CARTOCEAN

VIRTUALDIVE

Cahier Technique du Gestionnaire
...
Analyse comparée des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies



agence de l'eau
rhône méditerranée & corse
établissement public du ministère chargé du développement durable

Région
Provence-Alpes-Côte d'Azur

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
PROVENCE ALPES-CÔTE D'AZUR

Auteurs

Quatre auteurs ont participé à l'écriture du cahier technique du gestionnaire sur l'analyse comparée des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies

Claire NOËL
CARTOCEAN, Centre Associatif de Recherche et Technologie de l'OCEAN

Pierre BOISSERY
Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse

Nathalie QUELIN
Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement PACA

Valérie RAIMONDINO
Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur

Infographie et PAO

Alain DINIS
VIRTUALDIVE

SIG

Christophe VIALA
CARTOCEAN

Remerciements

Les auteurs remercient les acteurs, spécialistes et experts du domaine pour leur contribution au travers d'entretiens et discussions de travail :

Institutions

- Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur — B. VASSELIN
- Direction Départementale des Territoires et de la Mer 13 — MC. BERTRANDY
- Direction Départementale des Territoires et de la Mer 83 — G. SELLIER

Gestionnaires locaux

- Site natura 2000 "Posidonies du Cap d'Agde" — S. BLOUET ADENA
- Observatoire marin du littoral des Maures — JP. MORIN - B. CASALTA
- Parc Marin de la Côte Bleue — E. CHARBONNEL - F. BACHET
- Conseil Scientifique des Iles de Lérins — F. LOQUES
- Ports-Toulon Provence — G. ARDUIN
- GIPREB — N. MAYOT - G. BERNARD

Bureaux d'études

- Andromède Océanologie — P. DESCAMP
- SEMANTIC TS — M. COQUET - E. BAUER - S. MARCHETTI C. VIALA - S. HERNANDEZ

Scientifiques

- ECOMERS - Université de Nice — A. MEINESZ
- IFREMER — S. SARTORETTO
- IFREMER — N. GANZIN qui a largement contribué à la synthèse de la partie télédétection aérienne.

Ce document doit être cité comme :

C. Noël. P. Boissery. N. Quelin. V. Raimondino. 2012
Cahier Technique du Gestionnaire : Analyse comparée des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies. 96 p
CartOcean, Agence de l'eau RMC, Dreal PACA, Région PACA

Cet ouvrage peut être téléchargé sur le site http://cartocean.fr/

Artistes

GILLES DEMARET
MAROULE NOËL qui a illustré ce guide ...



AVANT-PROPOS

A qui s'adresse ce cahier technique ?

Ce document s'adresse aux élus, gestionnaires et techniciens qui gèrent un espace maritime public ou privé, et/ou souhaitent l'aménager.

Tout projet d'aménagement est instruit par les services de l'État, la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) qui demande une analyse préalable de l'impact sur les herbiers, et de l'environnement plus généralement, voire un suivi spécifique de **l'herbier.**

Ce cahier technique rappelle le besoin de connaissances nécessaires en termes de **surveillance des herbiers de posidonies.**
Il présente les outils et les méthodes disponibles pour mettre en place une surveillance (ou un suivi) des herbiers adaptée à leurs champs de compétences et aux problématiques de leur territoire.

Ce cahier présente un cadre de référence. Il préconise les moyens à mettre en œuvre en termes de suivi. Ces moyens doivent être économiquement faisables et les plus simples possibles, tout en satisfaisant aux objectifs de connaissances.

Ce cahier se veut être un outil d'aide à la gestion, pragmatique et à la portée des élus, gestionnaires et techniciens. Il fait le point sur les méthodes existantes et vise à compléter le guide "Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*" [Boudouresque *et al.* 2006] réalisé dans le cadre de l'Accord RAMOGE entre la France, l'Italie et Monaco. Nous invitons le lecteur à consulter ce guide pour plus de détails sur l'écologie de la posidonie et sur les pressions qui menacent les herbiers.

Pourquoi un cahier technique sur le suivi ?

Ces dernières années, les technologies ont beaucoup évolué et ont vu en particulier l'avènement de nouvelles méthodes de cartographie et de suivi (ou de **monitoring**) qui permettent une approche à la fois plus large et plus précise, et à des coûts abordables, que l'on peut donc mettre en œuvre plus souvent et avec une grande précision, aboutissant à un suivi scientifique plus complet et plus performant de l'évolution des herbiers.

Tout en restant simples, ces nouveaux outils permettent de compléter les technologies plus anciennes qui ont montré leurs limites, notamment en ce qui concerne la faible superficie de l'herbier qu'elles permettaient d'étudier et la difficulté de synthétiser un ensemble de données ponctuelles.

D'autre part, en parallèle de ces méthodes, de nouveaux outils permettant une consultation aisée des données et une bancarisation simplifiée ont été mis au point. Ces outils exploitent des formats standardisés et pérennes. Ils sont conviviaux et facilement utilisables par tout public, expert ou non. Ils permettent à faible coût (voire gratuitement) de diffuser et de consulter les données sans SIG, ni qualification spécifique en sciences de la terre.

Que présente ce cahier technique ?

Cet ouvrage :

- rappelle les **besoins de suivi de l'herbier** de posidonies : son rôle écologique, les pressions qu'il subit et leur impact, les réglementations qui le protègent (Chapitre 1) ;
- explicite les **notions scientifiques** nécessaires à la compréhension des méthodes de suivi (Chapitre 2) ;
- présente la **boite à outils de suivi disponible**, c'est-à-dire les technologies de suivi (Chapitre 3) ;
- préconise enfin, et surtout, les **méthodes les plus adaptées à chaque typologie d'impact** (Chapitre 4).

Il s'agit d'une première version d'un cahier technique du gestionnaire sur l'analyse comparée des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies. Ce dernier devrait être amené à être revu dans quelques années pour tenir compte de la progression des connaissances scientifiques, tant du point de vue du développement des technologies et des méthodes d'acquisition d'informations en mer qui évoluent extrêmement rapidement, que pour le suivi de l'état de conservation des habitats marins benthiques.

Pour une meilleure compréhension de la terminologie et des sigles utilisés dans le présent cahier nous invitons le lecteur à consulter le lexique et l'index lexical situés à la fin du document.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : BESOIN DE SURVEILLANCE DE L'HERBIER DE POSIDONIES 7

I .LE RÔLE ÉCOLOGIQUE DE L'HERBIER 7

II .L'HERBIER DE POSIDONIES EST SOUMIS À DES PRESSIONS LOCALES : TYPOLOGIES D'IMPACT 10

III .L'HERBIER DE POSIDONIES EST PROTÉGÉ 12

IV .POURQUOI FAUT-IL SURVEILLER L'HERBIER DE POSIDONIES ? QUE FAUT-IL SURVEILLER ? 13

CHAPITRE 2 : NOTIONS SCIENTIFIQUES DE CARTOGRAPHIE ET DE SUIVI 15

I .GÉODÉSIE, POSITIONNEMENT & GPS 15

II .CARTOGRAPHIE & PROJECTIONS 16

III .LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES GPS & LEURS PRÉCISIONS RESPECTIVES 17

IV .PARAMÈTRES DE LA CARTOGRAPHIE (OBSERVATIONS SURFACIQUES) 19

V .PARAMÈTRES DES OBSERVATIONS LINÉAIRES OU PONCTUELLES 22

VI .PARAMÈTRES GÉNÉRAUX D'UNE MÉTHODE DE SUIVI 23

VII .CRITÈRES D'ÉVALUATION DES MÉTHODES DE SURVEILLANCE (OU MONITORING) 23

VIII .CONCLUSIONS : DU BESOIN DE CONNAISSANCE AU CHOIX DE LA MÉTHODE DE SUIVI 24

CHAPITRE 3 : BOITE À OUTILS DE CARTOGRAPHIE ET DE SUIVI 27

I .GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODOLOGIES DE SUIVI 28

1.Méthodologie générale de cartographie (observation surfacique) 28
2.Méthodologie générale de monitoring par observations surfaciques 31
3.Évaluation phase par phase de la fiabilité des méthodes de cartographies et de suivis surfaciques 32

II .MÉTHODES SURFACIQUES GLOBALES : CARTOGRAPHIES ET SUIVIS 33

1.Télédétection aérienne : Image aérienne ou satellitale 33
2.Télédétection acoustique 36
3.Classification acoustique des végétations et des fonds sous-marins 39
4.Monitoring acoustique (RTK / sonar de coque) 42
5.Techniques de vérité de terrain associées (observations) 44

III .MÉTHODES LOCALES DE SUIVI : SURFACIQUES ET LINÉAIRES 46

1.Carré permanent 46
2.Transect permanent & Line intercept 46
3.Suivi d'une limite par balisages multi-points (RSP) 47
4.Télémétrie acoustique : observation d'un linéaire et micro-cartographie 48

IV .MÉTHODES PONCTUELLES D'OBSERVATION ET DE SUIVI 50

1.Recouvrement 50
2.Densité 51
3.Type et profondeur de limite 52
4.Phénologie (ou biométrie) 52
5.Lépidochronologie 52
6.Déchaussement des rhizomes 53
7.Compacité de la matte 53
8.Nature du substrat. Granulométrie 54
9.Biomasse des épiphytes 54
10.Protocoles de suivis ponctuels 55

V .CRITÈRES D'ÉVALUATION DES MÉTHODES DE SUIVI 57

1.Critère : « Export » 57
4.Paramètre « Précision » 59
5.Paramètre « Résolution » 59
6.Critère «Profondeur» 59
7.Critère «Besoin en VT (vérité terrain)» 60
8.Critère «Couverture» 60
9.Critère «Reproductibilité» 60
10.Critère «Coût» 61
11.Synthèse comparative des méthodes de suivi 61

VI .BANCARISATION DES DONNÉES ACQUISES EN MER 64

1.Données à bancariser, acquises lors du suivi 64
2.Besoin de standardisation, de lisibilité, d'ergonomie 65
3.Référentiel de bancarisation 65
4.Format des données bancarisées 66
5.Exemple : consultation d'un dossier GOOGLE EARTH complet sur une zone type 66

CHAPITRE 4 : QUELLE MÉTHODE POUR QUEL SUIVI? 69

I .SUIVI À LONG TERME (CONNAISSANCE PATRIMONIALE AU TITRE DE LA CONSERVATION DES HABITATS ET DE LA DCE)..... 70

1.Suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre de la conservation des habitats au titre de la DHFF (Natura 2000)..... 70
2.Suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre de la surveillance DCE..... 71
3.Et malgré tout : L'herbier est-il un bon indicateur de la santé du milieu ?..... 72
4.Approche globale surfacique 73

II .AMÉNAGEMENTS LITTORAUX..... 76

1.Rappel de l'impact 76
2.Et malgré tout : les aménagements littoraux répondent-ils toujours aux enjeux actuels ?..... 76
3.Règles ou recommandations 76
4.Conclusions : Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre d'un aménagement littoral 77

III .RECHARGEMENT DES PLAGES..... 80

1.Rappel de l'impact 80
2.Et malgré tout : Le rechargement règle -t-il de façon durable le recul des plages?..... 80
3.Règles ou recommandations 80
4.Conclusions : Préconisations de suivi dans le cadre du rechargement des plages 80

IV .AQUACULTURE (FERMES PISCICOLES ET MYTILICULTURE)..... 81

1.Rappel de l'impact 81
2.Et malgré tout : le développement de l'aquaculture est-il antagoniste avec la préservation des herbiers de posidonies? 81
3.Règles ou recommandations 81
4.Conclusions : Préconisations de suivi dans le cadre des fermes aquacoles 81

V .STATION ÉPURATION..... 84

1.Rappel de l'impact 84
2.Et malgré tout : les stations d'épuration arrivent-elles à traiter toutes les pollutions d'origine terrestre?..... 84
3.Règles ou recommandations 84
4.Conclusions : Préconisations de suivi dans le cadre des station d'épuration 84

VI .BALISAGE DES ACTIVITÉS NAUTIQUES - ANCRAGES - MOUILLAGES ORGANISÉS..... 85

1.Impact du balisage des activités nautiques..... 85
2.Impact des ancrages des petits navires 85
3.Impact des ancrages des gros navires..... 85
4.Et malgré tout : les dégradations liées aux ancrages ne sont-elles pas attribuées par erreur aux plaisanciers?..... 86
5.Préconisations de suivi de l'impact des ancrages sur l'herbier de posidonies..... 86

VII .RÉCIFS ARTIFICIELS 87

1.Rappels de l'impact..... 87
2.Préconisations de suivi..... 87

VIII .DÉBLAIS DE DRAGAGE – DÉCHETS SOLIDES..... 88

1.Rappel de l'impact 88
2.Règles ou recommandations 88
3.Préconisations de suivi..... 88

IX .CANALISATION ET CÂBLES SOUS-MARINS..... 89

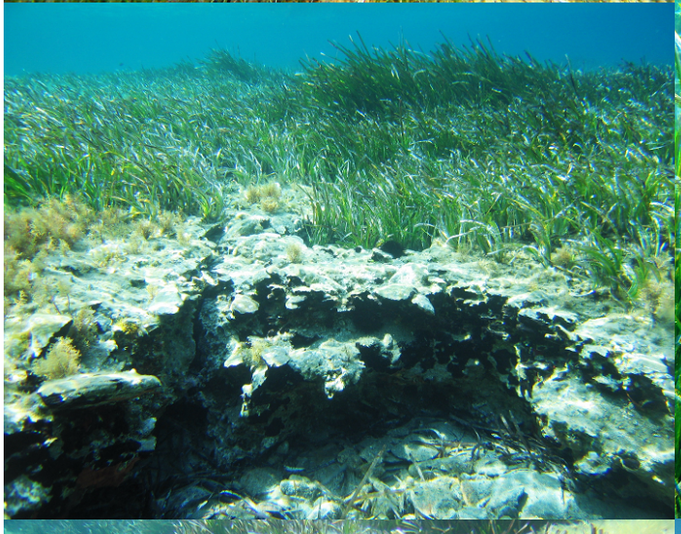
1.Rappel de l'impact 89
2.Règles ou recommandations 89
3.Préconisations de suivi..... 89

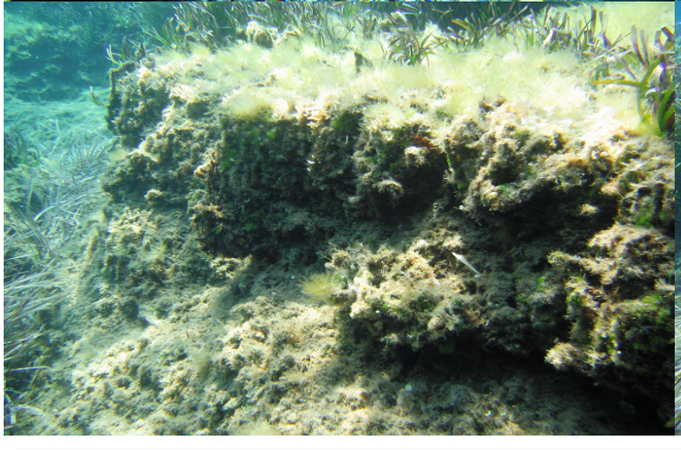
X .CONCLUSIONS 90

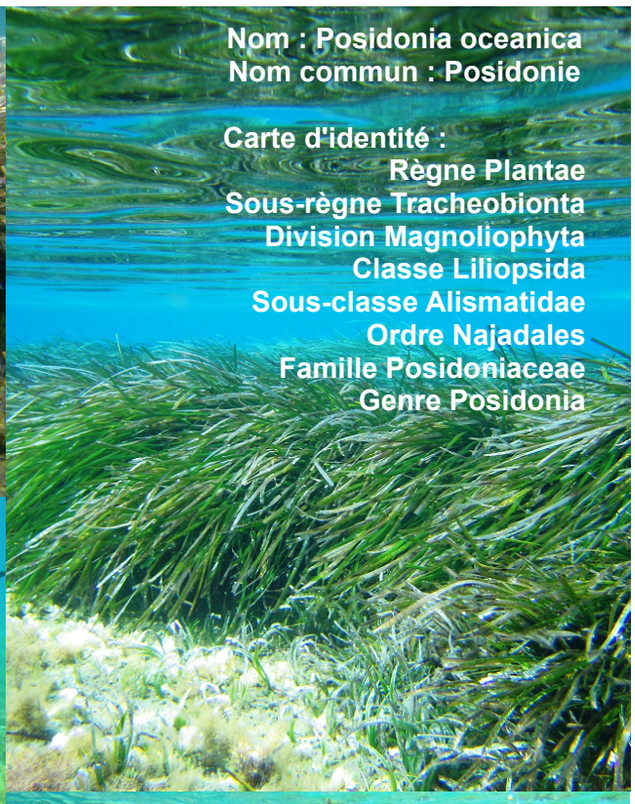
CHAPITRE 5 : LEXIQUE – BIBLIOGRAPHIE..... 92

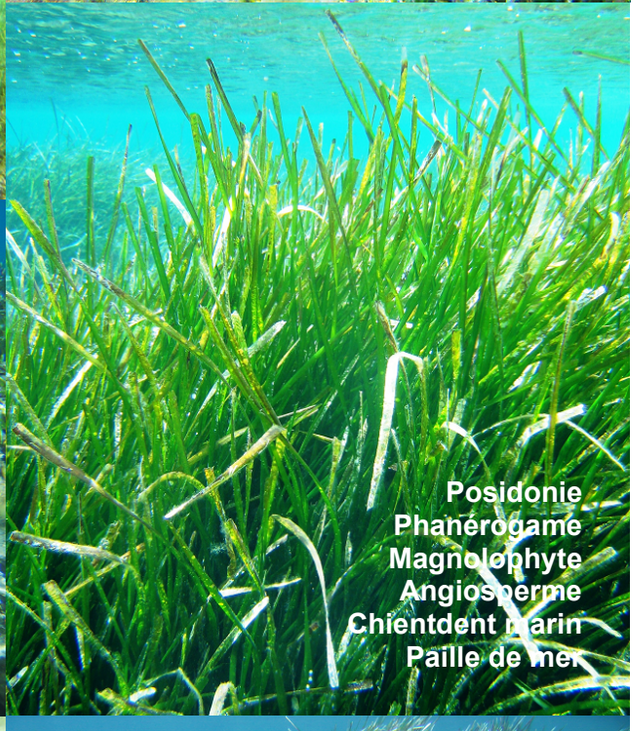


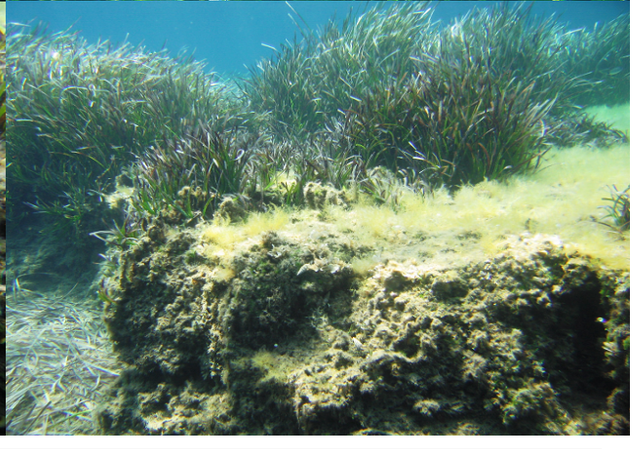







Nom : Posidonia oceanica
Nom commun : Posidonie
Carte d'identité :
Règne Plantae
Sous-règne Tracheobionta
Division Magnoliophyta
Classe Liliopsida
Sous-classe Alismatidae
Ordre Najadales
Famille Posidoniaceae
Genre Posidonia


Posidonie
Phanérogame
Magnolophyte
Angiosperme
Chientdent marin
Paille de mer



Chapitre 1 : Besoin de surveillance de l'herbier de posidonies

Ce chapitre explicite les raisons pour lesquelles l'herbier de posidonies requiert une surveillance. Il rappelle son intérêt, sa fragilité et ses caractéristiques d'évolution dans le temps. Il liste les impacts majeurs que ce dernier subit et cite les principales réglementations qui le protègent.
Il explique ensuite les paramètres du besoin de connaissance auxquels la surveillance doit répondre.

I. Le rôle écologique de l'herbier

L'herbier de posidonies

La posidonie, dont le nom scientifique est *Posidonia oceanica*, est une **plante à fleurs** sous-marine qui fait partie de la famille des **magnoliophytes marines**.
Elle se développe par l'intermédiaire de tiges souterraines appelées **rhizomes** qui s'étendent pour former, entre 0 et 40 mètres de profondeur, de vastes prairies appelées **herbiers.** Ces herbiers caractérisent **l'étage infralittoral** où ils colonisent majoritairement les substrats meubles.
La posidonie présente la particularité d'être une **espèce endémique** de la Méditerranée : sa répartition est uniquement circonscrite à cette zone géographique.
C'est une espèce **sténohaline** : elle est sensible aux variations de la salinité de l'eau et ne supporte pas la dessalure. C'est pourquoi elle est absente à proximité de l'embouchure des fleuves. De plus, la posidonie est très exigeante en lumière : c'est une plante **photophile**.

La posidonie se présente sous la forme de rhizomes rampants (**plagiotropes**) ou dressés (**orthotropes**) terminés par des bouquets de 5 à 6 feuilles rubanées (faisceaux), larges d'environ 1 cm, longues de 30 à 120 cm (pouvant n'atteindre que quelques centimètres après broutage par les saupes et oursins) et à croissance basale. 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.

La posidonie est une plante à fleurs endémique de la Méditerranée. La **densité des faisceaux** est un paramètre important qui caractérise sa **vitalité**.

L'herbier de posidonies est indispensable

Les feuilles de posidonie ralentissent les mouvements de l'eau et diminuent ainsi l'énergie cinétique des particules sédimentaires transportées. Celles-ci sédimentent donc au sein de l'herbier, entre les feuilles. Il s'y ajoute les restes des organismes calcifiés qui vivent dans l'herbier (échinodermes, mollusques). Au total, le fond s'élève 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. Dans l'épaisseur du sédiment, les rhizomes et les racines sont très peu putrescibles et se conservent pendant des millénaires. 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 [Boudouresque *et al.* 1980].

- L'herbier de posidonies **protège de l'érosion** les fonds et les rivages. En régulant l'hydrodynamisme, les herbiers contribuent au maintien des équilibres littoraux et atténuent l'action des vagues sur les plages.
- Il contribue à l'oxygénation de l'eau : 1 m² d'herbier soit 1 200 à 1 300 mètres de longueur de feuilles produit 10 à 14 litres d'oxygène par 24 heures : c'est le poumon de la mer. Grâce à cette importante production d'oxygène, il **intervient** ainsi **sur la qualité des eaux littorales et sur leur transparence** par le piégeage des particules en suspension.
- Il constitue un **puits de « stockage » du CO_2.** Il permet en moyenne de stocker 48 litres de CO_2 par jour et par m^2 (soit 3 fois plus que de dégagement d'O_2). Une étude publiée par la revue Nature Geosciences montre que les herbiers pourraient jouer un rôle primordial dans la régulation des changements climatiques, s'ils réussissent à survivre aux activités humaines [Fourqurean *et al.* 2012].

  Intitulée «Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock», cette étude est la première du genre à analyser le cycle du carbone des prairies d'herbiers côtiers. Les scientifiques de l'université de Floride, en collaboration avec une équipe internationale, ont pu démontrer que cet écosystème peut

stocker jusqu'à 83 000 tonnes métriques de carbone par kilomètre carré, principalement dans le sol autour des plantes. Par comparaison, une forêt stocke environ 30 000 tonnes métrique par km², dont une grande partie sous forme de bois. D'après les scientifiques américains, ces herbiers stockent 90% de leur carbone dans les sols. ***Ainsi, si les herbiers ne couvrent que 0,2% de la surface des océans, ils permettent de capturer 10% du carbone piégé par les océans chaque année.***

L'herbier de posidonies est un écosystème à grande valeur patrimoniale

En savoir plus → Cap sur la posidonie du Réseau Mer

L'herbier de posidonies est un écosystème pivot pour la Méditerranée. Il joue un rôle déterminant pour l'ensemble des équilibres biologiques et sédimentologiques du littoral :

- Il offre des **habitats variés** à de très nombreuses espèces de vertébrés et d'invertébrés (abris, nourriture, frayères, nurseries) ;
- Il constitue un vaste **écosystème** (communauté d'êtres vivants) dont la **production primaire** (production de matière organique) est l'une des plus fortes de Méditerranée.

C'est une véritable oasis...

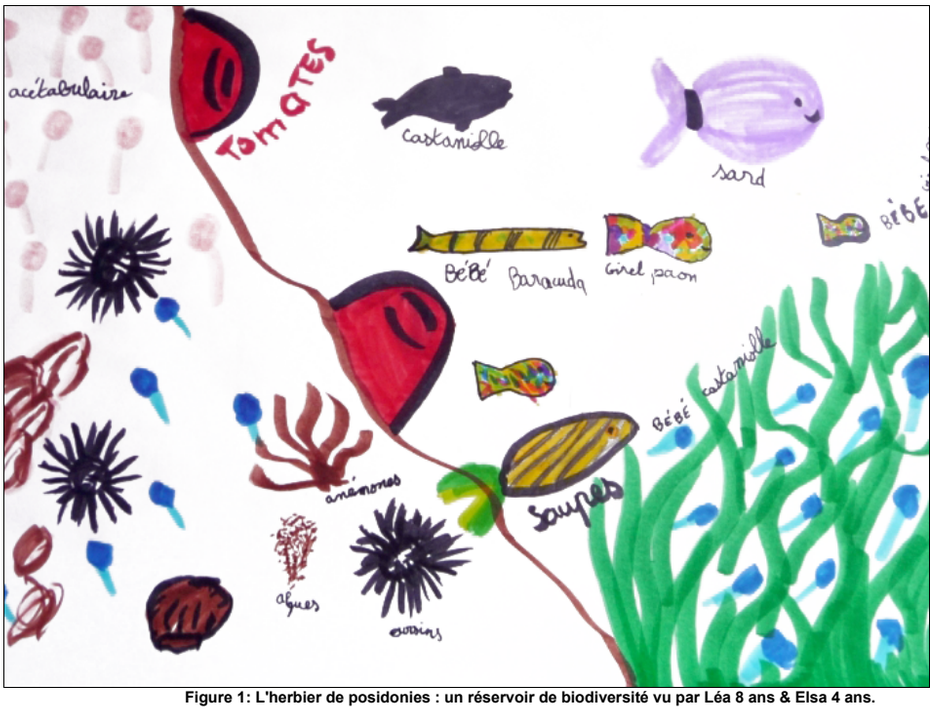


Figure 1: L'herbier de posidonies : un réservoir de biodiversité vu par Léa 8 ans & Elsa 4 ans.

L'herbier de posidonies est utile : il **protège** les côtes de l'érosion, **abrite** les alevins, constitue un **réservoir de biodiversité**, **oxygène** les eaux, contribue au **maintien de leur bonne qualité** et constitue un **puits de $C0_2$**.
Pour ces raisons, il est protégé par la loi et il est essentiel de le préserver.

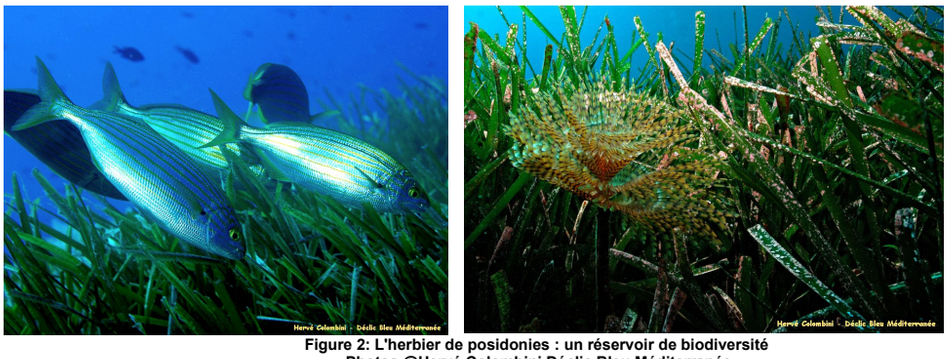


Figure 2: L'herbier de posidonies : un réservoir de biodiversité
Photos @Hervé Colombini Déclic Bleu Méditerranée

L’herbier de posidonies croît très lentement

La croissance des rhizomes de posidonies est très lente. La progression annuelle d'un rhizome orhotrope est en moyenne de 2 cm par an (maximum observé : 7.7 cm). La progression des rhizomes plagiotropes est un peu plus rapide et peut dépasser 10 cm par an. Toutefois, sur le long terme, la progression d'un front d'herbier, grâce à la croissance des rhizomes plagiotropes, ne dépasse pas 3 à 4 centimètres par an en moyenne. Il en résulte que **la destruction d'un herbier de posidonies est irréversible à l'échelle humaine**.

La posidonie est fragile

La posidonie craint :

- la déssalure et la sursalure,
- les températures extrêmes,
- un hydrodynamisme trop intense,
- une forte turbidité (manque de lumière),

pour ces raisons, elle est extrêmement fragile.

La progression de l'herbier est extrêmement lente, à peine quelques cm par an. La posidonie est extrêmement fragile. D'où le besoin d'une surveillance régulière pour avoir le temps de réagir en cas de signes de dégradation.

Les autres herbiers de Méditerranée

D'autres magnoliophytes marines (cymodocées, zostères) jouent un rôle similaire à celui de la posidonie.
Les cymodocées sont en particulier très présentes dans les petits fonds côtiers méditerranéens. Elles préparent le terrain pour l’herbier de posidonies [Boudouresque & Meinesz 1982] et sont protégées. Pour ces raisons, bien que ce ne soit pas directement l'objet de ce guide, et dans la mesure où elles sont le plus souvent cartographiables en même temps que les posidonies, sans travail supplémentaire, nous en recommandons le suivi simultané.



Herbier de posidonies et cymodocées



Cymodocées



Feuille de cymodocée et feuille de posidonie



Herbier épars de cymodocées

II . L'herbier de posidonies est soumis à des pressions locales : Typologies d'impact

Au cours du 20ème siècle et sans doute plus particulièrement depuis les années 1950, l'herbier de posidonies a considérablement régressé, en particulier autour des grands centres urbains et portuaires.
Il est clair que les activités humaines constituent le principal facteur de régression. Bien que ces causes agissent le plus souvent en synergie et qu'il ne soit pas facile de les isoler, nous allons les considérer séparément et fournir aux lecteurs des méthodes performantes pour mettre en œuvre un suivi des herbiers adapté aux problématiques identifiées.

Les principales pressions locales identifiées sont les suivantes :

- Ouvrage maritime,
- Rechargement des plages,
- Déblais de dragage – Déchets solides (macro déchets),
- Balisages des activités nautiques,
- Ancrages,
- Aquaculture (fermes piscicoles et mytiliculture),
- Canalisations sous-marines,
- Rejet d'une station d'épuration,
- Récifs artificiels.

Les impacts des différentes pressions locales sont explicités en détails au chapitre 4. Mais il convient néanmoins, pour une meilleure compréhension de ce document, de rappeler, dès à présent, les règles essentielles et communes de l'impact de toute cette liste de pressions sur l'herbier de posidonies :

L'herbier de posidonies est dégradé :

- par **destruction directe :** arrachement de la matte ou des faisceaux ;
- par **étouffement** (recouvrement aménagements littoraux) ou par **déchaussement**. Ce peut être :
  - par le sable (flux sédimentaire),
  - par des dépôts ou objets ou aménagements littoraux,
  - par des eaux chargées en matières en suspension.

Il s'en suit qu'une mauvaise gestion des conséquences des pressions sur l'herbier peut s'avérer rapidement catastrophique.

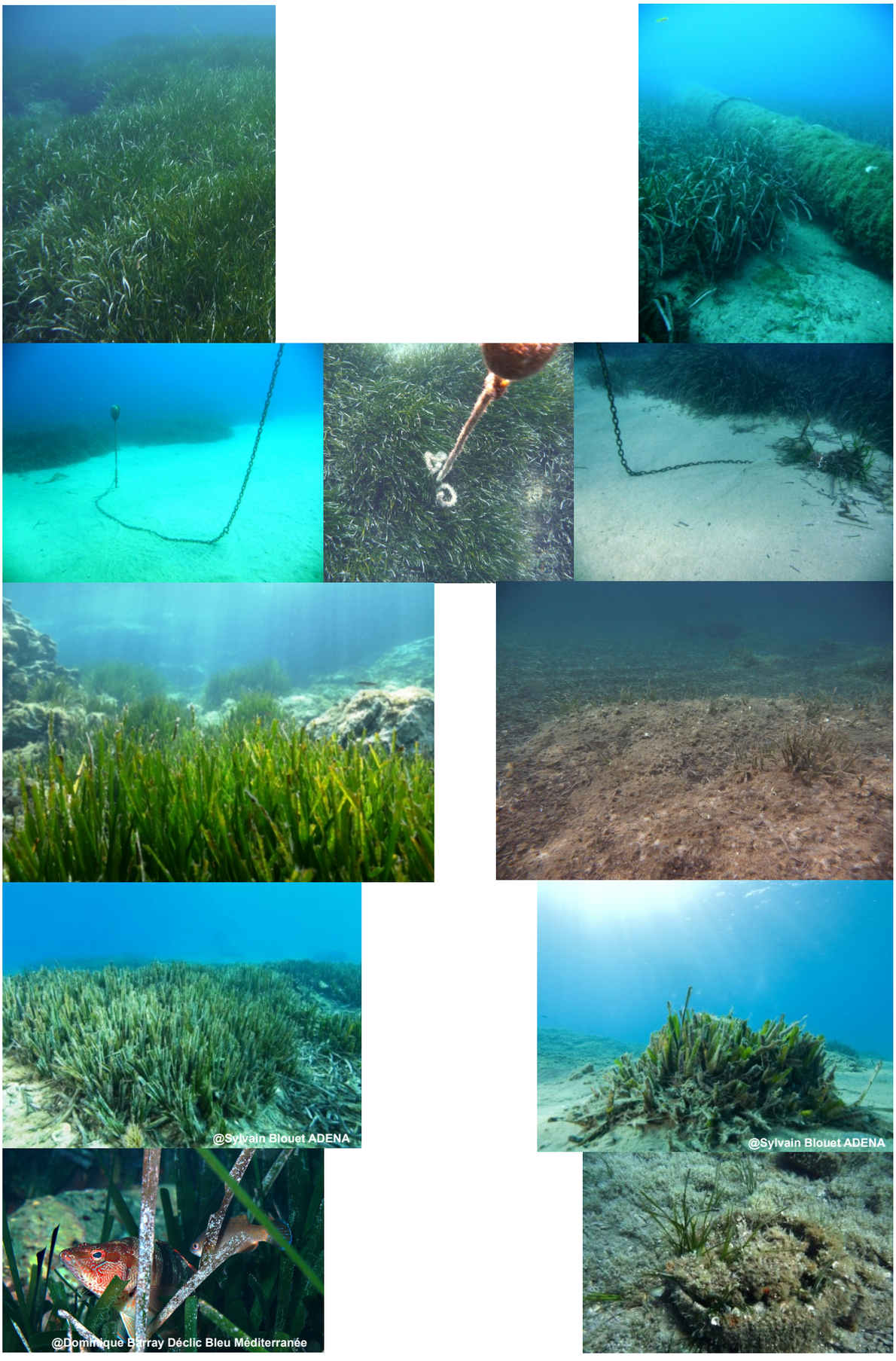


Figure 3: A gauche : Herbier de posidonies en bonne santé - A droite : Herbier soumis à des pressions

III . L'HERBIER DE POSIDONIES EST PROTÉGÉ

Puisqu'il est utile, fragile et extrêmement sensible aux activités humaines, l'herbier de posidonies fait l'objet depuis 1976 de protections légales dans le cadre des réglementations relatives à la protection des espèces marines et du littoral et des habitats marins. Le cadre de gestion principal est déterminé par quatre lois majeures :

- Loi de protection de la posidonie,
- Loi littoral,
- Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (déclinaison en droit français de la Directive Cadre sur l'Eau),
- Directive Habitats Faune & Flore.

La législation relative à l'herbier de posidonies est synthétisée ci-après.

Réglementation relative à la protection des espèces marines		
Loi	**Application**	**Conséquence pour la gestion**
Loi N°76-629 du 10 juillet 1976 **Protection de la nature**	**Arrêté ministériel du 19 juillet 1988 actualisé**	Protection des magnoliophytes marines sur l'ensemble du territoire français : posidonies, cymodocées. **Il est interdit "de détruire, de colporter, de mettre en vente, de vendre ou d'acheter et d'utiliser tout ou partie" de la plante.**
Arrêté du 9 mai 1994 **Espèces protégées**	Liste des espèces végétales protégées en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.	La liste des espèces végétales protégées inclut les zostères.
Recommandations	**Application**	**Conséquence pour la gestion**
Convention de Berne du 19 septembre 1979 **Conservation de la vie sauvage et des milieux naturels en Europe**	Annexe I de la convention depuis le 1er mars 2002.	La liste des espèces de flore strictement protégées inclut : posidonies, zostères, cymodocées.
Convention de Barcelone de 1976 – Révisée en 1995 **Protection de la Méditerranée**	Annexe II : Protocole relatif à la conservation des Aires Spécialement Protégées - Décembre 2002.	Liste des espèces en danger ou menacées identique à celle de la convention de Berne sans les cymodocées.
Réglementation relative à la protection du littoral et des habitats marins		
Loi littoral du 3 janvier 1986 **Préservation des milieux naturels côtiers**	Mesures relatives à la protection et à l'aménagement du littoral. Codifiée dans les articles L.146-1 à L.146-9 du Code de l'urbanisme. **Décret d'application** (n° 89.694 du 20 septembre 1989).	Herbier en tant que biotope du décret. **Le décret impose la réalisation d'une notice d'impact spécifique sur le milieu marin et en particulier sur l'herbier de posidonies** pour tout projet d'aménagement littoral. La présence d'herbiers doit également être **prise en compte dans les dossiers d'aménagement et les études d'impact.**
Directive Cadre Eau (DCE) (DCE : 2000/60/CE) **Protection des ressources en eau.**	Annexe V. Article 1.1.4 Règlemente la protection des ressources en eau.	Elle vise la protection de l'environnement et des écosystèmes avec réduction des pollutions. Cf. LEMA ci-dessous
Loi sur l'eau et milieux aquatiques (LEMA) du 30 décembre 2006 **Politique de l'eau**	**Cette loi traduit dans la législation française la «directive cadre de l'eau» (DCE) européenne.** L'eau est un patrimoine commun. Elle complète la loi sur l'eau du 3 janvier 1992.	La destruction des frayères est qualifiée de délit et le tribunal peut ordonner la remise en état du milieu aquatique. **En tant qu'indicateur de la qualité des eaux l'herbier de posidonies doit faire l'objet d'un suivi.**
Directive Habitats Faune & Flore 22 mai 1992 (DHFF : 92/43/CEE) **Préservation des habitats**	Annexe I Définition en 1998 de ZSC : Zones Spéciales de Conservation, qui bénéficieront de plans de gestion pour leur préservation à long terme. Les ZSC sont une des composantes du **réseau Natura 2000**.	L'herbier de posidonies est un habitat d'intérêt communautaire de type prioritaire. Il requière la désignation de zones spéciales de conservation. **L'état de conservation de l'habitat « herbier de posidonies» doit être suivi.**
Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin - 17 juin 2008 (DCSMM : 2008/56/CE) Gestion du milieu marin et conservation des écosystèmes	Transcription en droit français : l'autorité administrative pour chaque sous-région marine doit élaborer et mettre en œuvre un plan d'action pour le milieu marin (PAMM). Réaliser ou maintenir un bon état écologique du milieu marin des mers européennes.	Cadre de gestion plus vaste (200 milles marins) En cours de définition.

IV . Pourquoi faut-il surveiller l'herbier de posidonies ? Que faut-il surveiller ?

Les problématiques nécessitant un suivi sont donc liées au besoin de connaissances nécessaires dans les trois cas suivants, en réponse ou non à une contrainte réglementaire :

- **Dans le cas d'une analyse à long terme**, pour laquelle il n'y a pas de lien avéré entre l'état de l'herbier et la pression des activités humaines.
  - C'est le cas des **suivis à long terme** demandés par les directives européennes relativement à la qualité des eaux (DCE contrôle de surveillance, DCSMM) et pour laquelle **l'herbier de posidonies est considéré comme un indicateur biologique de la qualité globale des masses d'eaux littorales** ; ou encore dans le cadre de la **conservation des habitats**, pour laquelle l'herbier de posidonies est un habitat lui-même et l'objet du suivi est d'améliorer les connaissances et de mieux comprendre le fonctionnement de cet habitat prioritaire (NATURA 2000).
  - On parle alors de besoin de connaissances patrimoniales, la base des données d'observations stockées sur le long terme constituant alors le patrimoine.

- **Dans les cas où le lien entre l'état de l'herbier de posidonies et la pression locale est avéré** :
  - Soit lorsqu'il s'agit de **suivre la réponse de l'herbier de posidonies à une mesure de gestion** et dans ce cas il n'y a pas forcément de contrainte réglementaire.

  - Soit **pour répondre à la réglementation en vigueur** (DCE contrôle opérationnel, demande des services de l'Etat (demande de suivi après étude d'impact par exemple).

En savoir plus → Cf. tableau p 69, chapitre 4

Puisqu'il est utile, fragile et extrêmement sensible aux activités humaines, et qu'il faut le protéger à ce titre, il est nécessaire de surveiller son évolution, c'est-à-dire l'évolution dans le temps de sa répartition géographique et de sa vitalité.

L'objet de la surveillance est la **répartition** et **vitalité** de l'herbier de posidonies.

Les différentes échelles

Les outils de surveillance des herbiers se situent à trois échelles spatiales :

- l'**échelle de l'écosystème** : cartographie à base de moyens acoustiques et utilisation de photographies aériennes pour la mesure du recouvrement ;
- l'**échelle locale** : mesure très précise des limites de l'herbier sur un secteur restreint ou micro-cartographie ;
- l'**échelle de la plante** (micro-échelle) : phénologie (densité des faisceaux, taux de couverture et biomasse des épiphytes), déchaussement des rhizomes.

La question est ensuite de savoir à quelle échelle et avec quel degré de finesse, il est besoin de connaitre ces informations pour analyser l'évolution de l'herbier sous impact.

Il est nécessaire de savoir avec quelle **précision**, quelle **résolution,** quelle **fréquence** temporelle et à quelle **échelle** spatiale il faut procéder à ces observations.
Le chapitre 2 a pour objectif d'aider le gestionnaire à comprendre ces paramètres et à définir la finesse de son besoin de connaissances.

Nous notons un changement récent et important dans la notion d'échelle d'observation. Jusqu'à présent les observations relatives au suivi étaient essentiellement ponctuelles, en raison de l'absence de méthodes fiables de plus grande couverture. Aujourd'hui, l'avènement de nouvelles méthodes, nous incite à **préconiser une approche globale**, tout d'abord parce que celle-ci est faisable tant techniquement que financièrement, et parce que l'approche ponctuelle ne permet pas à elle seule d'expliquer les phénomènes observés.



POSIDONIE

Papille méditerranéenn**E**
Ossature d'un monde jol**I**
Sagesse longue de l'océa**N**
Image calme d'un lent éch**O**
Dédale où l'eau retrouve son far**D**
Olifant muet d'un doux par**I**
Nimbe dont se pare nos futur**S**
Illuminant le cœur écol**O**
Etalant de plus en plus son cam**P**

Gilles DEMARET
Double acrostiche
13/07/2011

Chapitre 2 : Notions scientifiques de cartographie et de suivi

L'objet de ce second chapitre est de présenter les notions scientifiques nécessaires et suffisantes pour gérer la problématique du suivi de l'évolution de l'herbier de posidonies.
Il explicite les paramètres des méthodes de surveillance, avant de définir les critères qui caractérisent chaque méthode et permettent d'en analyser les performances.

Réaliser la **surveillance de la répartition et de la vitalité** de l'herbier de posidonies nécessite d'effectuer des mesures et des observations régulières dans le temps. Pour cela il est nécessaire de **positionner** le point d'observation sur le globe terrestre. Les observations sont alors **géoréférencées** dans le but d'être synthétisées sur une carte et de permettre un retour sur le même site d'étude afin de pouvoir comparer les résultats.

Établir une cartographie consiste à représenter géographiquement des informations ou des observations. Il peut s'agir d'information surfacique (répartition spatiale de la présence de l'herbier) ou d'observations ponctuelles (lieu précis d'analyse) ou d'une suite d'observations ponctuelles (ligne).

Cartographier c'est géoréférencer des observations ou informations.

I. GÉODÉSIE, POSITIONNEMENT & GPS

Géodésie

Pour manipuler les coordonnées d'un point, on utilise la **géodésie**. La géodésie est la science qui étudie la forme et les dimensions de la terre ; c'est aussi une partie des mathématiques qui traite des opérations nécessaires pour lever la carte d'un pays. Il n'est pas utile de comprendre en détails la géodésie pour commander une carte ou la comprendre. Mais il est nécessaire de connaître un minimum de notions de géodésie afin de pouvoir pleinement utiliser et exploiter la carte ensuite. Ce paragraphe présente ce minimum.
Il est par contre essentiel de maîtriser cette science de la géodésie pour réaliser des cartes.

Repérer un point sur la terre

La forme de la terre (sans ses reliefs) est modélisée par un ellipsoïde. Un point M de la surface terrestre est alors repéré par **coordonnées géographiques** ou **géodésiques** : **Longitude** et **Latitude** (cosinus directeurs de la verticale en ce point) dans le repère terrestre absolu, ainsi que la **hauteur géodésique** h mesurée suivant la normale à l'ellipsoïde.

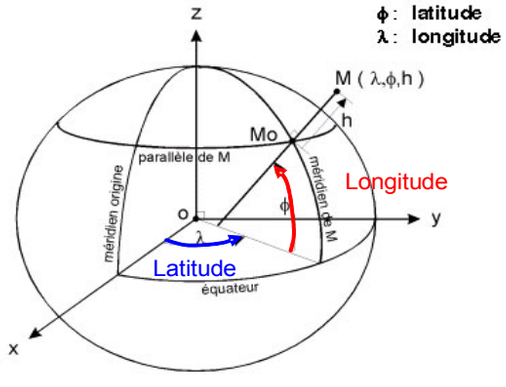


Figure 4: Coordonnées géographiques (Latitude, Longitude) d'un point M de la surface de la terre

Le GPS et le système géodésique WGS84

Le GPS ou Global Positioning System, traduit en français par « système de positionnement mondial », est un système de géolocalisation (c'est-à-dire de localisation sur le globe terrestre) fonctionnant au niveau mondial.

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. Des satellites sont répartis tout autour du globe terrestre. La constellation (c'est-à-dire la répartition spatiale des satellites) a été conçue de telle manière que n'importe où sur Terre, on puisse voir au moins quatre satellites à tout moment.
Un récepteur GPS fonctionne sur le principe de la télémétrie : il mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues. Il définit ainsi des sphères centrées sur des satellites et dont l'intersection donne la position de l'utilisateur.

La position calculée par un récepteur GPS se réfère au système géodésique WGS 84. Elle s'exprime en (Latitude, Longitude).

Systèmes géodésiques (ou de coordonnées géographiques) fréquemment utilisés

Le système de coordonnées géographiques positionne un point sur le globe :

- Le système **WGS84** (pour World Geodetic System 1984 : Système géodésique mondial, révision de 1984) est le **système géodésique associé au GPS** ; il s'est rapidement imposé comme une référence pour la cartographie.
- Le système **RGF93** (Réseau Géodésique Français 1993) est le **système français légal** (décret 2000-1276 du 26 décembre 2000). Il est compatible avec le WGS84 pour des précisions égales ou supérieures à 10 m.

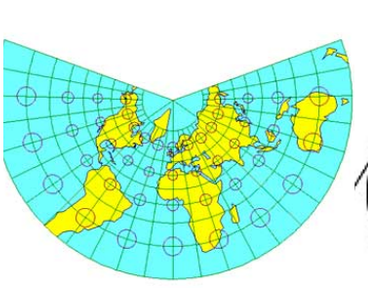
II . CARTOGRAPHIE & PROJECTIONS

La carte

La position d'un point disposé à la surface terrestre et qui est connue en coordonnées géographiques ne peut être représentée que sur un globe, ce qui est très encombrant et peu maniable sur le terrain. Aussi pour beaucoup d'opérations, il faut arriver à une représentation cartographique plane, permettant de travailler sur papier que l'on appelle projection plane.

De la sphère terrestre à la carte plane...

Le passage de ces coordonnées fastidieuses à des coordonnées rectangulaires planes en deux dimensions suppose de ramener tout d'abord tous les points de la surface réelle terrestre sur un ellipsoïde de référence et au final, de l'ellipsoïde à un plan.
Dans la pratique, on définit une surface développable autour de l'ellipsoïde (plan, cône, cylindre) et on détermine une transformation amenant le point de l'ellipsoïde sur cette surface : c'est le système de projection.



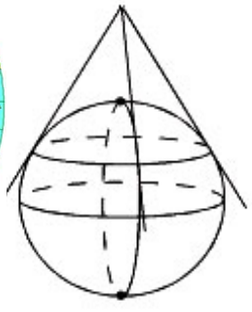
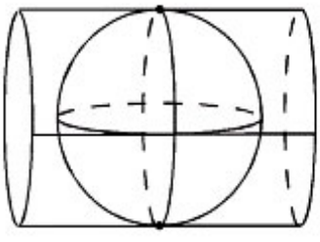
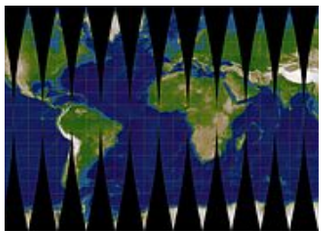


Figure 5: Projection conique de Lambert
Système de coordonnées projetées légal en 2012





Projection cylindrique de Mercator
Système de coordonnées projetées utilisé par GOOGLE EARTH

La légende de chaque carte signale toujours le système géodésique de référence utilisé et la majorité des récepteurs GPS modernes peuvent être programmés pour exprimer la position calculée dans un système géodésique différent du WGS 84, et éventuellement dans la projection cartographique souhaitée (par exemple UTM ou Lambert), plutôt qu'en coordonnées géographiques.

Systèmes de projection fréquemment utilisés

Pour la France Métropolitaine, seule la projection Lambert 93 est légale (décret n°2006-272 du 3 mars 2006) et rendue obligatoire à partir du 11 Mars 2009 code 2154). De plus, pour que l'altération des longueurs reste négligeable pour les travaux topographiques courants, la France est divisée en 9 zones conique-conformes qui ont chacune leur système de projection Lambert (Lambert CC42, CC43... à CC50).
Tous les professionnels se réfèrent au réseau de bornes IGN, points géodésiques, dont leurs coordonnées sont exprimées dans ce système de **projection Lambert93.**
Les autres systèmes de projections : Lambert II étendu (Lambert I, Lambert II, Lambert III, Lambert IV), UTM, Mercator … sont périmés, mais pas dépréciés.
La projection de Mercator est en particulier très utile pour le gestionnaire. Elle est un peu moins précise, mais permet d'apporter rapidement des informations de qualité à l'aide du logiciel gratuit GOOGLE EARTH. Elle est fondée sur WGS84 et utilisée dans les cartes marines récentes du SHOM.

En savoir plus → http://fr.wikipedia.org/wiki/Système_de_coordonnées_géoréférencées

En résumé nous recommandons au gestionnaire l'utilisation des deux premiers systèmes de coordonnées suivants :

Syst. géo.	Projection	Légalité / utilité
WGS84	**Mercator**	Périmé mais pas déprécié **Très utile au gestionnaire**. Dans ce cas la projection de Mercator est effectuée par le SIG et le gestionnaire ne gère que des coordonnées Lat-Lon exprimées en WGS84. (Applications type GOOGLE EARTH par exemple) A demander en double livraison → **recommandé**
RGF93	**Lambert 93**	**Légal → recommandé**
RGF93	Lambert CC42 à CC50	Légal Peu utile dans les applications suivi d'herbier sauf grand linéaire (digue ou port) et travaux en prévision
NTF (Paris)	Lambert Zone II III, IV , II étendu	Périmé mais pas déprécié Essayer de passer au système Lambert93 dès que possible

Cartographie
Une carte géographique est une représentation. Elle s'inscrit dans une démarche de communication. Les conventions graphiques utilisées pour représenter les phénomènes sur une carte sont décrites dans sa légende. Traditionnellement les cartes géographiques sont représentées sur un support plan.
Trois informations majeures doivent être mentionnées : **système géodésique, ellipsoïde et projection.**

III . Les différents systèmes GPS & leurs précisions respectives

La précision de la cartographie est directement liée au système de positionnement utilisé.

Le Système GPS standard

La précision d'un système GPS standard est de l'ordre de 5 à 15 mètres pour un usage civil.
Le coût approximatif d'un GPS standard est de l'ordre de 200 € à 1300 €.

Le GPS différentiel (DGPS)

Le GPS différentiel (Differential Global Positioning System : DGPS) permet d'améliorer la précision du GPS en réduisant la marge d'erreur du système. Il utilise un réseau de stations fixes de référence qui transmet l'écart entre les positions indiquées par les satellites et leurs positions réelles connues. Le récepteur peut ainsi déterminer l'erreur du système et l'appliquer à ses mesures de position afin de les corriger.
La transmission des corrections au récepteur mobile peut se faire de deux manières : DGPS et RTK.

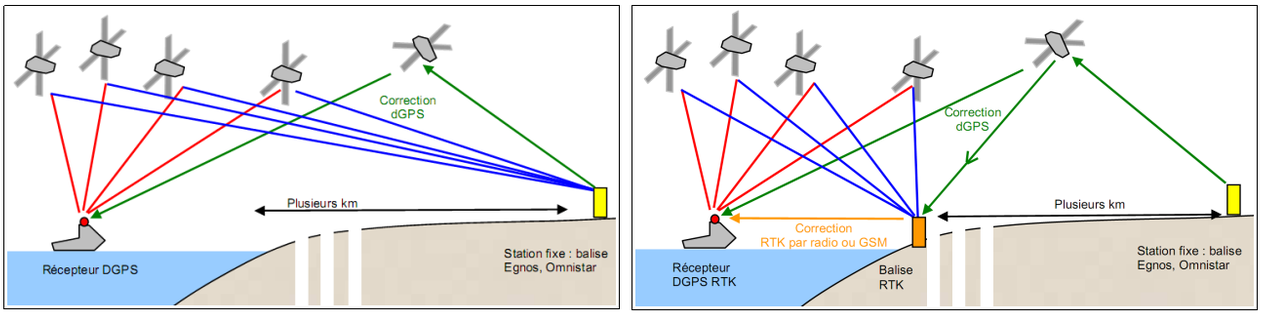


Figure 6: Principe du DGPS : GPS différentiel. En rouge la position du navire (Récepteur)
A Gauche : DGPS- Précision métrique **A Droite : DGPS RTK. Précision accrue : 2 à 3 cm**

La précision d'un système DGPS est de l'ordre du mètre. Le coût approximatif d'un tel appareillage est de l'ordre de 4000 €.

Le GPS différentiel RTK (DGPS RTK)

Le mode RTK signifie Real Time Kinematic, ou Cinématique temps réel. Dans ce cas, une station de référence doit être implantée à proximité cette fois du site à mesurer. Cette station est positionnée à l'aide du réseau RGP (réseau de stations GPS permanentes de l'IGN) ou après un temps d'observation suffisant en mode statique. Le transfert des corrections en temps réel au navire s'effectue par liaison radio ou GSM DATA (téléphonie mobile).
Cette technique est basée sur le même principe que la précédente, mais elle utilise une base qui est plus proche et qui a été spécialement installée à proximité de la zone d'intérêt.
La précision d'un système DGPS RTK est de l'ordre de 2 à 3 cm. Ce système nécessite l'utilisation de deux GPS haut de gamme (type Thales, Leica ou Trimble), d'une radio et d'un logiciel de traitement spécifique dans le cas où le traitement se fait en différé. Coût approximatif d'un tel appareillage : de l'ordre de 40 000 €.

Le GPS différentiel RTK couplé à une centrale inertielle (DGPS)

Ce système combine les avantages du positionnement GPS et inertiel en s'affranchissant de leurs défauts:

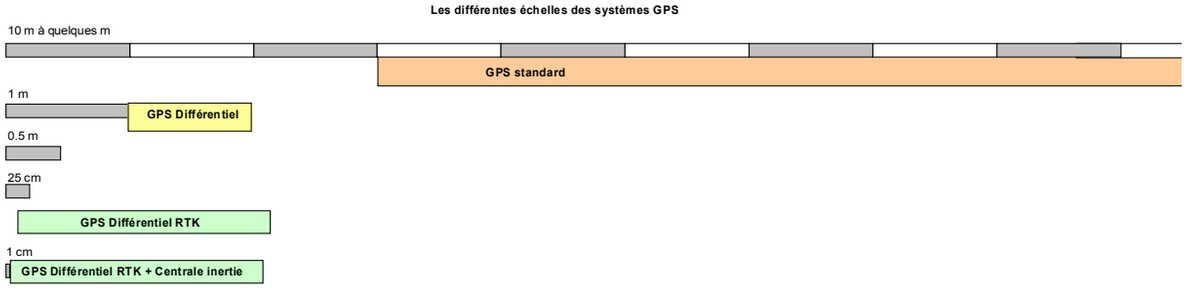
- En cas de coupure du signal GPS, la centrale inertielle est capable de fournir un positionnement de qualité pendant plusieurs minutes. Cette fonction est indispensable pour le positionnement du navire en dessous des ponts ou d'ouvrages portuaires.
- En navigation, la centrale inertielle permet une plus grande précision en corrigeant les erreurs de positionnement GPS.

Les informations inertielles viennent améliorer la précision par rapport à un GPS différentiel RTK.
Le coût d'un tel appareillage est celui du système précédent auquel il faut ajouter une centrale inertielle, soit 80 000 € environ.

En résumé les caractéristiques des familles de positionnement par GPS sont :

Sigle	Système	Précision moyenne
GPS	Système standard usage civil	5 – 15 m
DGPS	Différentiel	< 1 m
DGPS RTK	Différentiel cinématique en temps réel	2 à 3 cm
DGPS RTK Centrale	Différentiel cinématique en temps réel et couplage avec centrale inertielle	1 cm

Schéma comparatif de synthèse des précisions des divers systèmes GPS :



Echelle numérique : Une notion obsolète ?

L'échelle numérique était un paramètre fort utile par le passé. Elle permettait de définir la relation entre une longueur sur la carte papier et une longueur réelle sur le terrain.
Exemple d'échelles utilisées dans le cadre du suivi de l'herbier :

- Echelle régionale (1:25 000 à 1:50 000) , dans ce cas 1 cm représente 250 m à 500 m ;
- Echelle d'un site Natura 2000 (1:5 000 à 1:10 000), 1 cm pour 50 m à 100 m ;
- Cadre d'un projet d'aménagement côtier (type étude d'impact au niveau local 1:1 000 à 1:5 000).

Cette notion perd son utilité avec l'avènement des cartes numériques que l'on peut zoomer et agrandir à souhait.
La notion importante est alors celle de la **taille du pixel informatif** (Cf. page suivante) puis d'autre part, **l'étendue de la zone** à cartographier.

Zoom

C'est le facteur de zoom, défini par la **taille du support d'impression**, qui va définir l'échelle.
On peut toujours étirer une image de la taille d'un timbre poste sur un A0, mais dans ce cas, le mot échelle n'a plus aucun "bon" sens !
De la même façon une photo de qualité n'est plus qualifiée en 2012 par la taille du support papier, mais par son nombre de pixels pour une taille donnée c'est-à-dire sa densité de pixels.
Les trois images de la page suivante illustrent ces notions. Elles sont toutes à la même échelle : 7 cm sur le papier correspondent à 50 m sur le terrain, et l'on voit bien que cette échelle ne caractérise pas la qualité de la carte.
En résumé :

Il faut **définir:**
→ **l'étendue** de la zone d'intérêt → exemple : 1 km par 800 m
→ **la résolution** souhaitée → exemple : taille du pixel informatif = 50 cm
→ le **format** de restitution si le gestionnaire souhaite un format papier→ exemple : A0, A1, A2, A4 etc...

L'échelle en sera déduite et indiquée dans la légende sous la forme d'une **règle ou échelle graphique**, ainsi que la taille du pixel informatif.

L'échelle graphique ou la règle

Il s'agit d'une ligne divisée, à la façon d'une règle, en intervalles égaux représentant des longueurs exprimées en mètres, en kilomètres ou en milles. La distance entre deux points sur le terrain peut être déterminée facilement par la mesure de la distance entre ces deux points sur la carte, quelque soit son zoom ou son format d'impression, qui sera comparée à celle inscrite sur l'échelle graphique.
Lors d'une réduction ou d'un agrandissement photographiques ou par photocopie, l'échelle graphique est réduite ou agrandie automatiquement, tout comme la carte qu'elle accompagne.

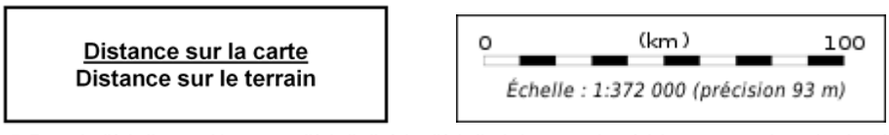
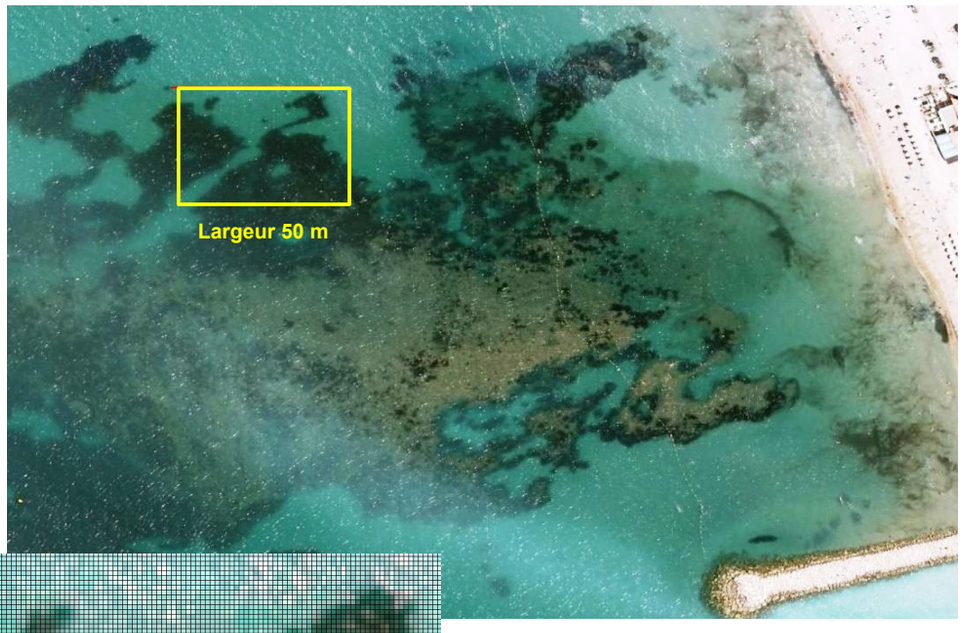
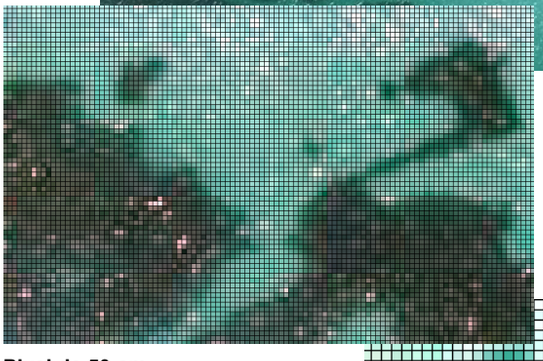


Figure 7: Exemple d'échelles graphiques avec l'échelle linéaire, l'échelle de la carte et la précision correspondante des données.

Résolution (ou sensibilité) d'une image ou d'une cartographie

La résolution d'une image ou d'une carte est directement liée à celle de l'appareillage de mesure. Elle correspond à la taille du pixel informatif. C'est la plus petite information que l'image permette de déceler. Les figures ci-dessous présentent une image relative à une même zone (représentée en jaune), à différentes résolutions.



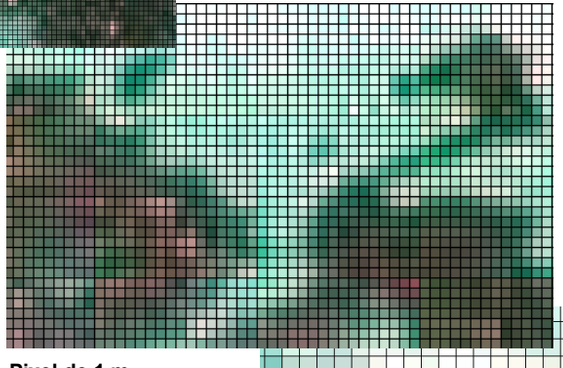


Pixel de 50 cm

Note : Pour ces 3 images : 7 cm sur le papier (c'est-à-dire sur cette page) correspondent à 50 m sur le terrain

→ l'échelle est identique pour les 3 images. (Elle est de 1 pour 700)

L'échelle ne caractérise pas la qualité de l'image.



Pixel de 1 m



Pixel de 2 m

Figure 8: Diverses résolutions d'une même image. L'échelle est identique pour les trois images.
La résolution des images est égale à la taille du pixel informatif. Plus le pixel est fin plus l'on peut observer de détails.

Une carte présente une bonne résolution si elle permet de bien voir les détails, donc si ses pixels informatifs sont petits.
Il faut **définir la résolution** de l'image ou de la cartographie nécessaire.

Précision d'une cartographie

La précision d'une cartographie est directement liée à la précision avec laquelle les relevés d'informations ont été effectués, c'est-à-dire celle des GPS utilisés. Elle indique la distance maximale entre l'information représentée sur la carte et la position réelle du lieu d'observation.

Une carte précise est une carte sur laquelle les objets et surfaces sont bien positionnés :
→ Il faut définir **la précision** de l'image ou de la cartographie.

Précision et résolution d'une cartographie

Ces deux paramètres sont complémentaires. Ils définissent complètement la qualité de l'information disponible sur la carte. La figure suivante présente trois exemples types.

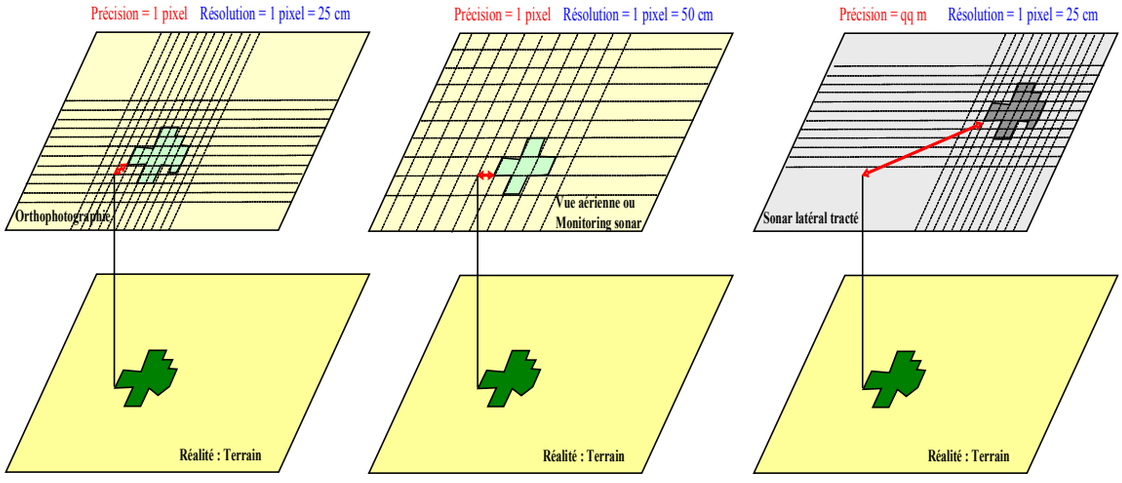


Figure 9: Précision et résolution des cartographies obtenues pour différentes méthodes

La résolution et la précision sont excellentes (25 cm) ; elles permettent de bien représenter la réalité du contour de la tache de l'herbier qui est elle même bien positionnée dans l'espace.	La résolution et précision sont dégradées (50 cm) : cela engendre un décalage du positionnement et un contour approché de la tache d'herbier.	La résolution est excellente (25 cm) et permet de définir précisément le contour de la tache, mais celle-ci n'est pas bien positionnée dans l'espace (Précision de quelques m).

Légende - Code de couleurs

Nous recommandons d'adopter la nomenclature et la charte graphique utilisée dans la base de données pour la cartographie de l'herbier de posidonies SEXTANT gérée par l'IFREMER.

En savoir plus : [www.ifremer.fr/sextant]

Codes couleurs ArcGis TSL (%) et RVB	Infralittoral	Circalittoral Upper circalittoral	Circalittoral Deep circalittoral	Deep Sea Bathyal	Deep Sea Abyssal
Substrats durs	A3 360,100,100 255,0,0	A4.26 320,100,100 255,0,170	A4.27 360,60,100 255,100,100	A6.1 360,40,100 255,150,150	
Sédiments grossiers	A5.13 25,100,50 30,55,0				
Détritique		A5.46 35,100,90 230,135,0	A5.47 35,70,100 255,180,75	A6.2 35,50,100 255,200,130	
Détritique envasé			A5.38 50,100,75 190,160,0		
Sable	A5.23 45,100,100 255,190,0			A6.3 45,40,100 255,230,155	
Sablo-vaseux				A6.4 60,60,100 255,255,100	
Vase sableuse	A5.33 70,100,70 150,180,0			A6.511 70,70,90 200,230,70	
Vase	A5.34 85,100,40 60,100,0	A5.39 85,100,60 90,150,0		A6.51 85,100,75 110,190,0	A6.52 85,25,90 205,230,170
Posidonia	A5.535 160,60,100 100,255,205				
Cymodocea	A5.531 160,100,70 0,180,120				

Figure 10: Palette de couleurs finales pour la Méditerranée utilisées dans la BDD Sextant. Les couleurs sont codées en TSL (teinte,saturation, lumière en %) et RVB pour chaque habitat.

V . PARAMÈTRES DES OBSERVATIONS LINÉAIRES OU PONCTUELLES

En ce qui concerne les mesures ou observations linéaires ou ponctuelles, effectuées généralement par plongeur, c'est le géoréréfencement de la méthode qui en détermine les performances.

Deux grandes classes de précision sont disponibles:

Positionnement absolu des informations dans le référentiel terrestre (précision 5 à 15 m)

Ce sont les méthodes basées sur un positionnement par GPS en surface (sur une bouée) relié à un plongeur évoluant au fond. Dans ce cas, les observations sont positionnées en absolu dans le référentiel terrestre et les performances des observations sont liées aux GPS utilisés en surface et à la façon de reporter vers la surface, l'information observée au fond.

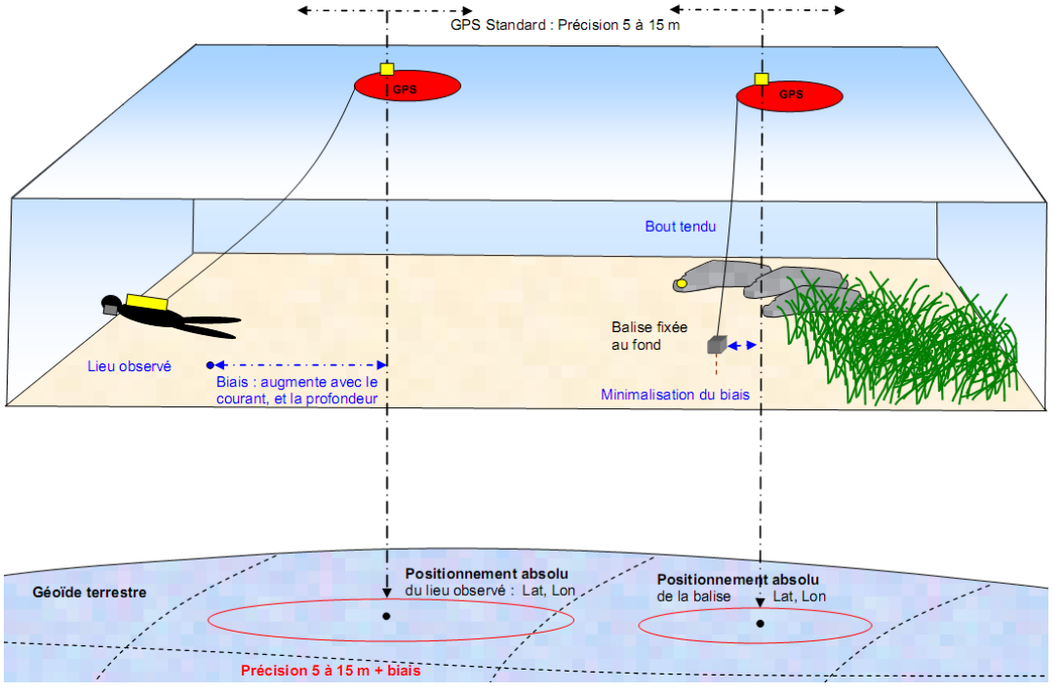


Figure 11: Précision du positionnement absolu des informations observées par plongeur

Positionnement relatif très précis (Résolution 0.05 m) des observations par rapport à un référentiel fond, avec possibilité ensuite d'un référencement en absolu (Précision 5 à 15 m)

Un seconde famille de méthodes utilise un référencement relatif, par rapport à des **balises**.
Celles-ci peuvent être des balises installées au fond en tout temps et la méthode consiste à réaliser des observations par rapport à cette balise fixe, dont le positionnement est effectué ensuite sur la géoïde terrestre à l'aide d'un report par bouée.

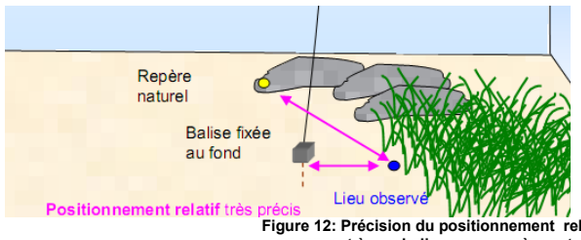


Figure 12: Précision du positionnement relatif par rapport à une balise ou un repère naturel

Enfin de nouvelles méthodes d'observation, basées sur la télémétrie acoustique permettent, à présent de **s'affranchir des balises fixes, et utilisant des repères naturels ou existants**, et de réaliser des observations dans un périmètre d'une centaine de mètres, tout en conservant le degré de précision des méthodes utilisant des balises fixes.

Remarque

Ces considérations de précision permettent de comprendre, que pour suivre l'évolution d'une plante, dont la croissance est de quelques centimètres par an, il est nécessaire d'utiliser, pour référencer des observations, une instrumentation admettant une précision et une résolution compatibles avec le besoin.

VI . Paramètres généraux d'une méthode de suivi

Surveillance – Monitoring – Suivi temporel – Evolution dans le temps

Nous venons de voir comment géoréférencer des observations surfaciques, linéaires ou ponctuelles.
Réaliser une **surveillance** ou un **suivi temporel,** ou encore, en anglais, un **"monitoring"** , consiste à réitérer ces observations régulièrement et à les comparer avec les observations initiales.
Il est donc essentiel que les méthodes d'observations utilisées ne présentent pas de régression en terme de précision/résolution entre les observations initiales et les suivantes.

Récurrence

Enfin, et surtout, puisque nous sommes dans le cadre d'un suivi temporel, il est nécessaire de définir, en fonction du phénomène à suivre, **la fréquence ou la récurrence des observations.** Cette valeur dépend, nous allons le voir, de l'impact des pressions et des phénomènes en jeu.

VII . Critères d'évaluation des méthodes de surveillance (ou monitoring)

Ce paragraphe présente les critères qui vont permettre par la suite (chapitre 4) de qualifier les performances des méthodes de suivi, à la fois de la répartition et de la vitalité des herbiers de posidonies, puis de sélectionner les plus intéressantes en regard de l'impact ou de l'application visée.
Bien entendu, l'adéquation de la méthode aux besoins de connaissance (**précision**, **résolution**, **étendue**) est primordiale.
Ensuite parmi les méthodes permettant d'atteindre ce degré de performances, les critères de répétabilité, de fiabilité, de coût, facilité de mise en œuvre, permettent de comparer les méthodes disponibles actuellement et de mettre en évidence les méthodes les plus intéressantes adaptées à chaque objectif poursuivi.

Répétabilité (système d'acquisition, équipement) & Reproductibilité (opérateur)

Tout d'abord se pose la question de la capacité de la méthode d'observation à reproduire exactement la même mesure afin de bien associer un changement dans la cartographie à une évolution du terrain et non pas à une différence de mesure. La méthode doit donc être **répétable**. La répétabilité quantifie la dispersion des mesures.
Cela signifie que le système d'acquisition doit présenter des caractéristiques en termes de précision/résolution au moins égales à celles utilisées initialement.
De même, la méthode doit être **reproductible**, c'est-à-dire qu'elle doit pouvoir être **indépendante de l'opérateur.**

Fiabilité

Le système d'acquisition doit être fiable : il doit permettre de réitérer la mesure. Un système à base de balises fixées au fond de la mer, est moins fiable par exemple qu'un système à base de balises positionnées par triangulation, dans la mesure où les balises implantées sur fond peuvent être arrachées par des arts traînants, ancres ou ensevelis par des mouvements sédimentaires.

Nous utilisons par la suite le terme "reproductibilité" pour l'ensemble de ces notions.

Coût

Le coût de la méthode, inclue l'ensemble des opérations nécessaires à sa mise en œuvre.
Il dépend de l'inter-opérabilité des systèmes instrumentaux. Cela signifie que les moyens peuvent être opérés en même temps qu'une autre action. Par exemple un système de classification acoustique des fonds peut être mis en œuvre simultanément à un lever au sonar latéral. Cette caractéristique est intéressante dans la mesure où elle permet d'optimiser les coûts d'acquisition en mer.

Profondeur

La gamme de profondeur dans laquelle la méthode peut être opérée est un critère essentiel. Elle traduit à la fois la facilité de mise en œuvre et sa capacité d'observation en eaux profondes ou turbides. Les méthodes utilisant des plongeurs fonctionnent dans toute la gamme de profondeur où l'herbier est présent mais sont moins faciles à mettre en œuvre qu'une méthode télé-opérée. Les méthodes télé-opérées aériennes ne fonctionnent plus dans les eaux profondes ou turbides ; les méthodes télé-opérées acoustiques fonctionnent pour toute la gamme de profondeur.

Taux de couverture

Le taux de couverture représente la superficie que la méthode est capable d'observer par unité de temps. Elle est liée aux moyens mis en œuvre et directement au coût par unité de surface. C'est un élément essentiel d'un point de vue budgétaire.

Besoin en vérité terrain

Les méthodes requièrent plus ou moins de besoin en vérité terrain, selon qu'elles sont mises en œuvre par des plongeurs ou de façon télé-opérées.

Export

Ce critère permet de qualifier le potentiel de la donnée collectée par la méthode de suivi par rapport aux objectifs du gestionnaire. La donnée collectée peut être un jeu de paramètres prélevés sur des stations ponctuelles, ou un ensemble de données surfaciques.

L'objet du suivi est :
l'observation de l'évolution temporelle de la répartition et de la vitalité des herbiers de posidonies.

Phase préliminaire : Spécifications du besoin de connaissance

Avant tout, il convient au gestionnaire, pour chaque **impact** et/ou dans le cadre de la **réglementation en vigueur**, de **définir son besoin de connaissance** et de **spécifier les objectifs de la surveillance**, c'est-à-dire :
En ce qui concerne le suivi de la répartition spatiale de l'herbier : définir les quatre paramètres suivants :

- Etendue spatiale de la zone à surveiller,
- Résolution,
- Précision,
- Fréquence.

Pour la prise d'informations linéaires ou ponctuelles :

- Précision,
- Fréquence.

Ces paramètres sont liés à la pression subie par l'herbier de posidonies ou au cadre de gestion.

Les quatre paramètres suivants définissent le besoin de connaissance du gestionnaire :
1 - Étendue,
2 - Précision (géoréférencement),
3 - Résolution (pixel),
4 - Fréquence.

Remarque

L'analyse des besoins du gestionnaire **doit être faite dans son ensemble**. Nous recommandons dans un premier temps de réfléchir au projet à l'échelle d'un site ou d'un secteur homogène, même si le projet initial ne concerne a priori qu'une petite zone. En effet, une cartographie peut servir à plusieurs projets dans un même secteur et quitte à mettre en œuvre une instrumentation embarquée, il est intéressant de vérifier que d'autres projets connexes n'ont pas des besoins dans le même secteur géographique, ce qui permettrait de diminuer considérablement les coûts.

Une cartographie peut servir plusieurs projets, dans la mesure où, par exemple, un projet d'extension de port requiert bathymétrie et répartition de l'herbier, un rechargement de plage à proximité aussi.

Nous recommandons donc d'essayer de grouper les cartographies, afin d'une part de ne pas les multiplier et d'autre part d'optimiser les ressources. De même, réaliser en même temps que la cartographie de l'herbier, celle des autres végétations protégées ou non (exemple : caulerpes) est un travail qui n'est, avec certaines méthodes, pas plus long ; ce serait dommage de s'en priver, d'autant plus que ces herbiers de végétations sous-marines, cymodocées pour l'essentiel, sont connus pour être précurseurs d'herbier de posidonies.

Il est intéressant d'évaluer à quel point les données déjà disponibles (veille régulière des sites GOOGLE EARTH qui intègrent régulièrement de nouvelles données BD Ortho ou satellites), à un niveau de qualité adéquat (lacunes, données manquantes ou non satisfaisantes), devront être complétées par de nouveaux levés.

En résumé, nous recommandons :
- de grouper les cartographies dans un même secteur géographique, car celles-ci servent à la fois aux projets divers et à la surveillance.
- de procéder simultanément à la cartographie des autres végétations protégées ou non dans la mesure où cela n'engendre pas de travail et de coûts supplémentaires.

Phase 1 : Quelles sont-les méthodes qui permettent d'atteindre les objectifs fixés ?

Une fois les objectifs de connaissance définis, il s'agit ensuite de parcourir la boite d'outils et de méthodes de suivi disponibles qui permettent d'atteindre ces objectifs.

Le chapitre 3 de ce cahier présente les différentes méthodes en détail et renseigne pour chacune d'entre elles les paramètres caractérisant leurs performances.

Phase 2 : Quelles sont les méthodes les plus adaptées ?

Connaissant les paramètres des méthodes de surveillance, ainsi que les critères d'évaluation de leurs performances, il est alors possible de mettre en regard :

L'objectif de connaissances
= ce que l'on veut savoir
= étendue, résolution, précision ...

avec

ce que la méthode est capable de faire
= sa couverture, sa résolution, sa précision.

Les critères suivants permettent de juger objectivement de la **pertinence scientifique des méthodes** utilisables, et donc de l'adéquation de la méthode de suivi aux objectifs de connaissance visés :

- Profondeur,
- Reproductibilité (inclus reproductibilité, répétabilité et fiabilité),
- Export.

tandis que les critères complémentaires suivants permettent de juger de la **faisabilité budgétaire de l'opération de suivi** :

- Interopérabilité,
- Besoin en vérité terrain,
- Taux de couverture.

Les six critères principaux permettant d'évaluer les méthodes et de les comparer dans un cadre spécifique sont :
1 - Profondeur,
2 - Besoin en vérité terrain,
3 - Couverture,
4 - Reproductibilité,
5 - Coût,
6 - Export (intérêt des données restituées).

Le chapitre 4 met les différentes méthodes en regard des objectifs de suivi et préconise les méthodes les plus adaptées.

Phase 3 : Quels sont les formats de restitution adaptés ?

En parallèle, il convient de **spécifier les formats de restitution** adaptés à l'exploitation des données, à leur diffusion et leur bancarisation :
- Système géodésique, ellipsoïde et projection,
- Format de la carte papier → l'échelle en découle,
- Légende, nomenclature et charte graphique.

Le chapitre 3 fournit une aide à la spécification des formats de restitution dans le cadre du suivi de l'herbier.

Ce cahier a pour but d'aider le gestionnaire à parcourir ces phases.



L'herbier de posidonies est un écosystème pivot pour la Méditerranée.
Il joue un rôle déterminant pour l'ensemble des équilibres biologiques et sédimentologiques du littoral.

→ Il protège de l'érosion les fonds et les rivages. En régulant l'hydrodynamisme, les herbiers contribuent au maintien des équilibres littoraux.

→ Il offre des habitats variés à de très nombreuses espèces de vertébrés et d'invertébrés (abri, nourriture, frayères, nurseries).

→ Il constitue un vaste écosystème dont la production primaire (de matière organique) est l'une des plus fortes de Méditerranée.

→ Il contribue à l'oxygénation de l'eau : c'est le poumon de la mer !

→ Il constitue un puits de CO_2

… d'où l'intérêt qui lui est porté.

Chapitre 3 : Boîte à outils de cartographie et de suivi

Ce chapitre explicite les différentes méthodes d'observation de la répartition spatiale et de la vitalité de l'herbier de posidonies disponibles en 2012, ainsi que leurs performances.
L'adéquation de leurs performances en regard des objectifs de la surveillance, permettra dans le chapitre 4 de proposer pour chaque type d'impact les méthodes les mieux adaptées.

Comment surveiller l'herbier de posidonies ?

Les outils de surveillance de l'herbier s'utilisent à différentes échelles:

- A l'échelle globale sur l'ensemble du territoire : il s'agit d'une approche par zone ;
- A l'échelle d'un secteur restreint, en approche locale ;
- A l'échelle de la plante, en approche par station.

Les méthodes et outils sont présentés selon ces trois échelles.

- Méthodes **surfaciques globales** de cartographie et de suivi ;
- Méthodes **surfaciques et linéaires locales** de cartographie et de suivi ;
- Méthodes **ponctuelles** d'observation et de suivi.

Avant de présenter une fiche outil par méthode, nous rappelons tout d'abord le principe d'une observation surfacique, à savoir la r**éalisation d'une cartographie**, qui s'effectue en huit étapes bien distinctes.

Un **suivi surfacique** consiste alors à **réitérer la cartographie selon une fréquence temporelle donnée**, puis à effectuer l'analyse des variations observées.

Nous présentons ensuite les méthodes de suivi ponctuelles.

I . GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODOLOGIES DE SUIVI

1. Méthodologie générale de cartographie (observation surfacique)

Les huit étapes de la réalisation d'une cartographie sont les suivantes :

Etape 1 : Acquisition en dalles ou en bandes + Data complémentaires (SACLAF*, bathymétrie ...)	**Etape 2 : Mosaïquage** Constitution de l'image globale géoréférencée	**Etape 3 : Segmentation** Contourage de zones homogènes	**Etape 4: Plan d'échantillonnage** Vérités terrain (observations et vitalité) : choix des waypoints
Etape 5 : Export des WPT pour la navigation sur les images segmentées	**Etape 6 : Vérités terrain** & mesures ponctuelles vitalité	**Etape 7 : Interprétation** Classification à partir des vérités terrain et SACLAF*	**Etape 8 : Production de la cartographie** Format d'export

*SACLAF : Système Acoustique de Classification Automatique des natures de Fonds

Etape 1 : Mesures par télédétection et production de bandes ou de dalles géoréférencées

L'objectif de cette étape est la production de bandes ou de dalles géoréférencées. Elle s'appuie sur des méthodes surfaciques de mesures par télédétection.

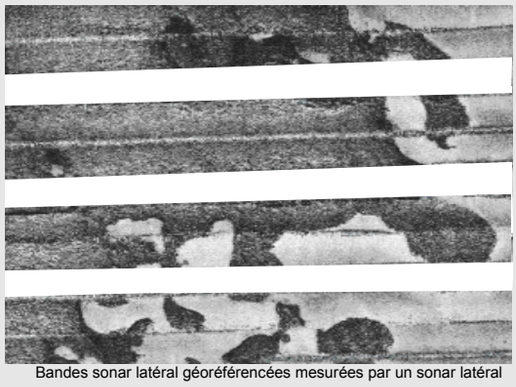
Télédétection surfacique

La **télédétection** désigne, dans son sens le plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) de systèmes instrumentaux permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement : appareils photographiques, lasers, radars, sonars.... La télédétection moderne intègre des traitements numériques. Sont employées pour la cartographie et le suivi des herbiers de posidonies les deux familles suivantes de **techniques surfaciques de télédétection** :
- les **techniques aériennes (satellitaires ou aéroportées)** pour les zones de petits fonds (profondeur inférieure à 10 m)
- les **techniques acoustiques** (**sous-marines**) pour les zones de petits fonds et de plus grands fonds.

Ces techniques sont surfaciques : elles produisent des images. Ces images servent de fonds cartographiques dans les Systèmes d'Information Géographiques.

Des images en bande sont enregistrées latéralement à la direction d'avancée de la plateforme de mesures (satellite, avion, drone, navire...). Les mesures s'effectuent selon les trajectoires bien définies (Plan de vol ou plan de navigation) afin d'assurer la couverture de la zone.

Dans cette étape, la précision et la résolution de l'image en bande ou de la dalle, sont déterminantes pour la qualité du suivi ultérieur. Elles dépendent directement des caractéristiques des capteurs physiques réalisant la mesure. Les pages suivantes explicitent ces valeurs pour les différents appareillages disponibles actuellement.



Bandes sonar latéral géoréférencées mesurées par un sonar latéral

Optimisation de l'Étape 1 : Acquisition simultanée de données complémentaires

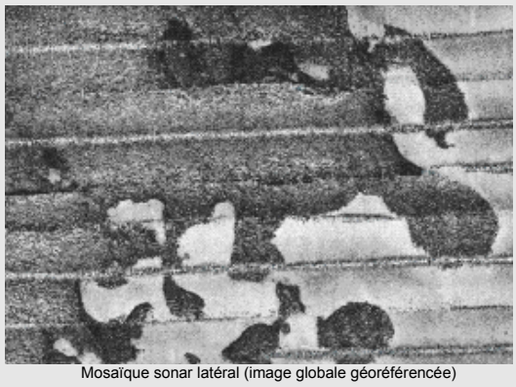
Des données complémentaires peuvent être acquises simultanément selon la chaine instrumentale utilisée : données de bathymétrie multifaisceaux, données de classification acoustique (SACLAF). Ces données permettront une aide au zonage de l'image globale ainsi qu'à son interprétation et une réduction des besoins en vérité terrain.

Etape 2 : Production d'une image globale géoréférencée

L'objectif de cette seconde étape est la production, à partir des données sectorielles mesurées lors de l'étape N°1, **d'une image globale géoréférencée de la zone d'étude**.

L'opération de mosaïquage (ou dallage) permet de constituer, radiale sonar après radiale sonar, ou dalle après dalle, une image acoustique ou aérienne du fond. Elle est généralement effectuée par le prestataire qui réalise les mesures.

Dans cette étape, la méthode de constitution de la mosaïque est déterminante ; pour un suivi de bonne qualité la chaine de précision/résolution doit être entretenue pour chaque raccord ; cela nécessite l'utilisation d'une méthodologie et de logiciels spécialisés comportant un SIG (Système d'Information Géographique).



Mosaïque sonar latéral (image globale géoréférencée)

Etape 3 : Segmentation de l'image (ou zonage)

L'objectif de cette étape consiste à cerner, sur l'image globale, des zones de mesures homogènes.

L'opération de segmentation consiste à contourer des zones de faciès acoustique superficiel ou de comportement électromagnétique ou optique homogène.
Cette opération s'effectue manuellement ou à l'aide de logiciel de segmentation ou de zonage automatique.
Il ne faut pas confondre la phase de segmentation avec la phase d'interprétation qui consiste, elle à interpréter la nature des zones segmentées.

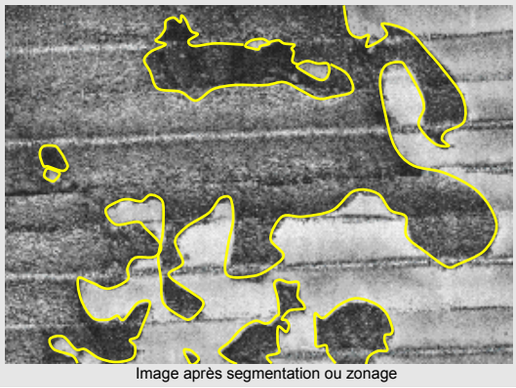
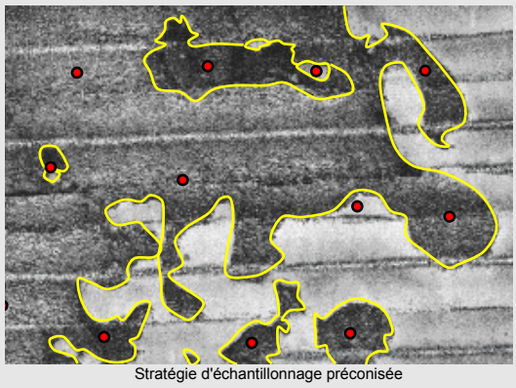


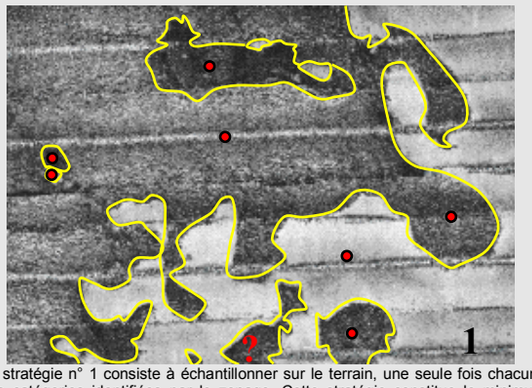
Image après segmentation ou zonage

Etape 4 : Stratégie et plan d'échantillonnage

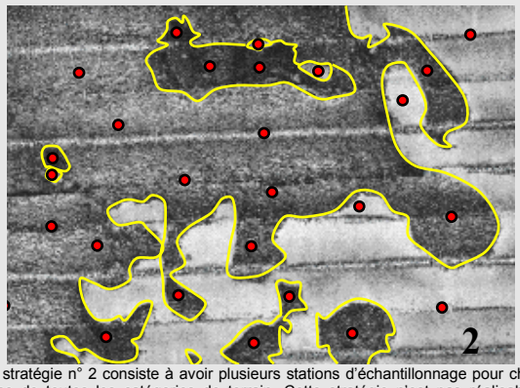
L'objectif de cette quatrième étape consiste à définir, compte tenu de l'image globale segmentée, une stratégie et donc **un plan d'échantillonnage** optimal, c'est-à-dire qui optimise le ratio : effort /coût d'échantillonnage.
Plusieurs stratégies existent. Dans la pratique, et dans le cas de l'herbier de posidonies, la solution pratique se situe quelque part entre les stratégies 1 et 2 exposées ci-dessous, avec un échantillonnage de toutes les catégories de terrain et un certain nombre de réplicats représentatifs de chaque catégorie. C'est la stratégie préconisée dans [Bajjouk 2009].
Le **plan d'échantillonnage** est défini d'après l'analyse de la carte segmentée, en plaçant des transects ou des waypoints sur les lieux à observer. Le choix des lieux du suivi de la vitalité est aussi déterminé durant cette phase.



Stratégie d'échantillonnage préconisée



La stratégie n° 1 consiste à échantillonner sur le terrain, une seule fois chacune des catégories identifiées par le zonage. Cette stratégie constitue le minimum pour un échantillonnage sur le terrain. Si une catégorie de terrain n'est pas échantillonnée, il est souvent impossible de la classifier.



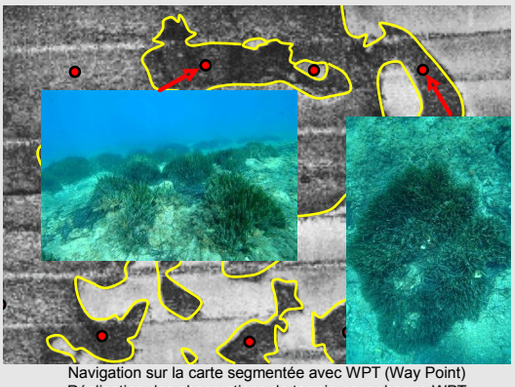
La stratégie n° 2 consiste à avoir plusieurs stations d'échantillonnage pour chaque zone de toutes les catégories de terrain. Cette stratégie n'est pas réalisable en raison du grand nombre de segments à échantillonner et n'apporte pas d'élément d'information essentiel dans le cas de l'herbier.

Etape 5 : Export pour la navigation des images segmentées et des WPT du plan d'échantillonnage

La mosaïque et les waypoints doivent être exportés vers le logiciel de navigation, afin que le navire puisse naviguer sur ces données et envoyer les moyens d'observations (plongeurs, caméra, vidéo …) sur les lieux sélectionnés. **Cette démarche permet d'optimiser les moyens en vérité terrain et d'apporter les informations nécessaires à l'interprétation de la mosaïque sonar.**

Etape 6 : Acquisition des vérités terrain

Cette étape consiste en la réalisation d'observations linéaires ou ponctuelles pour l'interprétation des observations surfaciques. Dans un souci d'optimisation, les observations pour le suivi de la vitalité peuvent être réalisées durant cette phase.

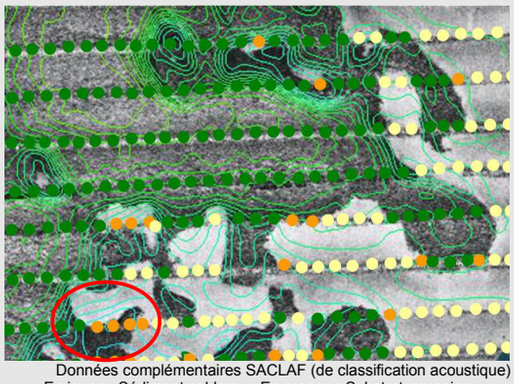


Navigation sur la carte segmentée avec WPT (Way Point)
Réalisation des observations de terrain pour chaque WPT

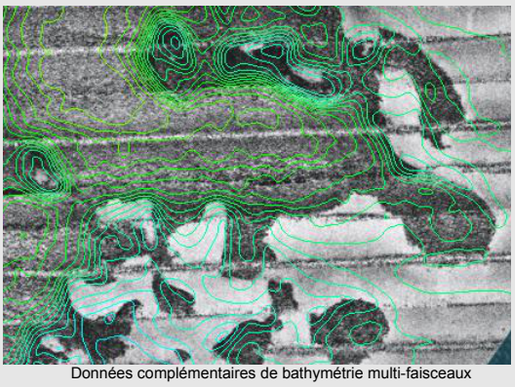
Etape 7: Interprétation de l'image globale géoréférencée

La phase d'interprétation de l'image globale aérienne ou acoustique consiste à classifier chacune de ces zones ; elle est effectuée à partir des vérités terrain.

L'usage complémentaire de méthodes de classification acoustique mono-faisceau ou de bathymétrie multi-faisceaux, dont les données sont alors collectées durant l'étape 1, simultanément au levé sonal et donc sans coût supplémentaire de levé, permet d'aider à la segmentation de l'image et à son interprétation et de réduire encore les besoins en vérité terrain.



Données complémentaires SACLAF (de classification acoustique)
En jaune : Sédiment sableux - En orange : Substrat grossier
En vert : Substrat de hauteur supérieure à 10 cm



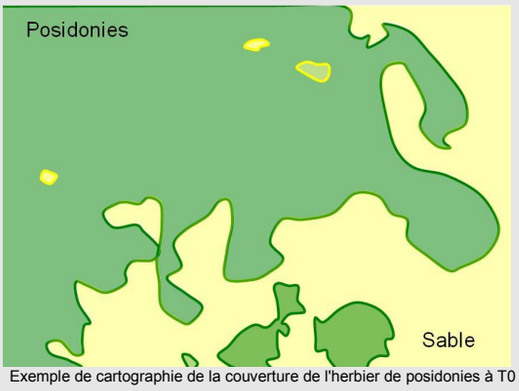
Données complémentaires de bathymétrie multi-faisceaux

L'exemple ci-dessus illustre l'intérêt des données de SACLAF pour l'interprétation : la tache sombre sur la mosaïque sonar latéral (cercle rouge) pourrait être interprétée comme de la posidonie ; cependant elle ne présente pas de remontée bathymétrique et la méthode de classification acoustique indique un sédiment plus rugueux que le sable.

Etape 8 : Cartographie à T0

Le travail de cartographie consiste à synthétiser les données observées, extraire et fournir les contours de la mosaïque interprétée.

Cette carte, obtenue à T0, est ensuite exportée aux formats compatibles avec le SIG du gestionnaire.



Exemple de cartographie de la couverture de l'herbier de posidonies à T0

2. Méthodologie générale de monitoring par observations surfaciques

Les trois étapes de la réalisation d'un suivi (ou d'un monitoring) par des observations surfaciques sont les suivantes :

Méthode de monitoring par observations surfaciques Les méthodes de monitoring par observations surfaciques peuvent être décrites par le schéma suivant :		
Etape 9 : Définir le lieu et la récurrence de chaque étape	**Etape 10 : Retour aux Étapes 1 à 8**	**Etape 11 : Monitoring** Analyse et rapport par comparaison entre les cartographies.

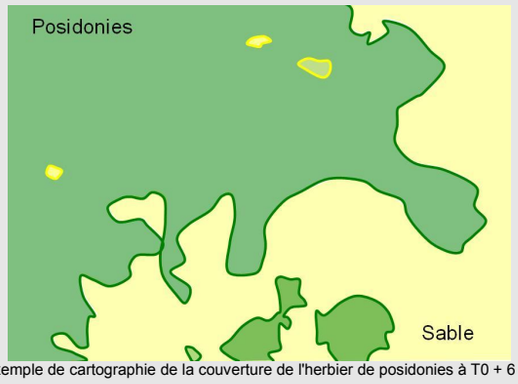
Etape 9 : Récurrence préconisée pour les méthodes globales de suivi par observations surfaciques

Le pas de temps préconisé pour les méthodes globales de suivi par observations surfaciques est de l'ordre de la dizaine d'années.
Il nécessaire de pouvoir suivre plus régulièrement les évolutions potentielles au sein des différents herbiers. Pour réaliser des suivis plus réguliers d'autres méthodes de suivi, locales et de type surfaciques ou linéaires peuvent être utilisées avec des pas de temps de l'ordre de 3 à 6 ans.

Etape 10 : Cartographie à T0 + Pas de temps (Retour étapes 1 à 8)

Le travail de cartographie est réitéré avec un pas de temps de l'ordre de 6 à 10 ans selon les objectifs du suivi.

La carte obtenue à T0 + Pas de temps, va pouvoir être comparée à la carte précédemment obtenue à T0.

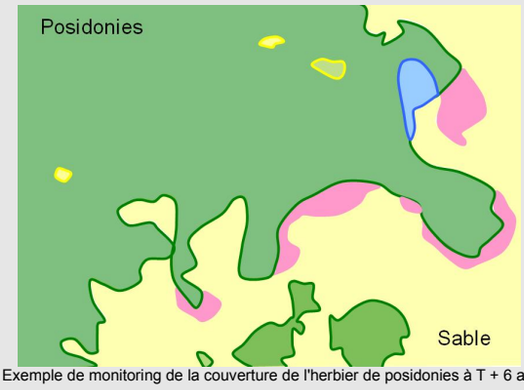


Exemple de cartographie de la couverture de l'herbier de posidonies à T0 + 6 ans

Etape 11 : Monitoring

Le travail de monitoring consiste à comparer les cartographies obtenues à T0 et à [T0 + Pas de temps].
Il permet de mettre en évidence les surfaces d'herbier détruites ou recolonisées.

Sur l'exemple ci-contre les zones de régression de herbier de posidonies sont représentées en rose, les zones de recolonisation de l'herbier en bleu.



Exemple de monitoring de la couverture de l'herbier de posidonies à T + 6 ans

3. Évaluation phase par phase de la fiabilité des méthodes de cartographies et de suivis surfaciques

La fiabilité d'une méthode de cartographie ou de suivi, doit être analysée en qualifiant chacune des étapes intermédiaires. Pour chaque étape il est essentiel de renseigner la précision et la résolution des données, ainsi que la façon dont les données sont mémorisées et géoréférencées.

Étapes	Paramètre qualifiant	Éléments d'évaluation de la fiabilité
Etape 1 : Acquisition en dalles ou en bandes + Data complémentaires (SACLAF, bathymétrie ...)	Précision et résolution du capteur	La chaine des précision/résolution (chaine P/R) doit être déclinée sur l'ensemble des étapes de la cartographie. La précision et la résolution de la cartographie obtenue sont les plus grandes de toutes les étapes. Par exemple, pour ces 2 premières étapes si la précision du sonar de coque est de 1 m, mais que le mosaïquage est effectué sous photoshop (15 m), la précision globale devient 15 m.
Etape 2 : Mosaïquage Constitution de l'image globale géoréférencée	Précision et résolution de la méthode de mosaïquage - Si effectué sous SIG, la précision et la résolution du capteur sont conservées - Si effectué sous un logiciel de traitement d'images (Exemple : photoshop), la précision se dégrade (15 m environ)	
Etape 3 : Segmentation Contourage de zones homogènes	Capacité de la méthode de segmentation - Si effectué manuellement, dépend de l'expertise humaine - Si effectué automatiquement par un logiciel de segmentation dédié, doit quand même être validé - Attention à l'utilisation de logiciel de traitement d'image qui segmente des micro-zones	Qualification de la phase de segmentation 1. Automatique dédiée sous SIG 2. Manuelle 3. Automatique sous traitement d'image Nb : les paramètres du logiciel de segmentation utilisés doivent être mémorisés Nb2 : la précision et la résolution de la méthode de segmentation sont à prendre en compte dans dans la chaine P/R
Etape 4: Plan d'échantillonnage Vérités terrain (observations et vitalité) : choix des WPT	Choix de la stratégie (Cf. stratégie optimale préconisée) Option : L'usage de méthodes de classification automatique (SACLAF) permet d'améliorer le plan d'échantillonnage	Objectif : réduction des coûts à connaissance égale de la zone 1. Stratégie optimale + SACLAF + VT 2. Stratégie optimale + VT 3. Stratégie N°2 & N°1 : non adaptées
Etape 5 : Export des WPT pour la navigation sur les images segmentées	La capacité à exporter les coordonnées des lieux à observer et à naviguer sur les images segmentées est essentielle pour optimiser l'effort de terrain et acquérir des certitudes sur la couverture du fond	1. Capacité à naviguer sur l'image géo-référencée (aérienne + acoustique) 2. Navigation uniquement sur WPT exportés 3. Navigation approchée
Etape 6 : Réalisation des vérités terrain + mesures ponctuelles vitalité	Positionnement des observations Capacité de la méthode à enregistrer et géo-référencer les observations prélevées	1. Dossier géo-référencé de données consultable sous SIG 2. Dossier de fichiers de données 3. Rapport incluant les données
Etape 7 : Interprétation Classification à partir des VT et SACLAF	Intérêt de l'apport de données complémentaires issues de SACLAF Capacité à fusionner les données issues des différents capteurs	1. Data complémentaires SACLAF + Fusion 2. Pas de SACLAF
Etape 8 : Production de la cartographie Format d'export	Capacité à restituer l'information dans le référentiel légal Capacité à restituer l'information simultanément et sans coût supplémentaire en WGS84 (utile et simple)	1. Export dans le référentiel standard WGS84 + référentiel légal 2. Export dans le référentiel légal 3. Export dans un référentiel quelconque Nb : Un usage sérieux des théories géodésiques est essentiel pour ne pas dégrader la chaine P/R lors de cette étape
A ce stade le cartographe doit être capable de qualifier la chaine P/R de la cartographie réalisée et donc la fiabilité de la cartographie. Les objectifs à chaque étape, sont de mettre en œuvre la ou les méthodologies qui permettent une optimisation des coûts pour une précision/résolution accrue.		
Etape 9 à 11 : Monitoring	Capacité de la méthode à reproduire les étapes précédentes avec une précision et une résolution au moins meilleure	Méthode capable de travailler à T0 + Pas de temps : 1. avec une chaine P/R meilleure qu'à T0 2. au moins égale à celle de T0 3. inférieure à celle de T0

Les paragraphes qui suivent présentent les différentes méthodes disponibles pour disposer des images globales géoréférencées, qu'elles soient aériennes ou acoustiques.

II . MÉTHODES SURFACIQUES GLOBALES : CARTOGRAPHIES ET SUIVIS

1. Télédétection aérienne : Image aérienne ou satellitale

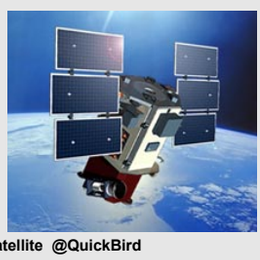
Fiche Méthode : Télédétection aérienne : Image aéroportée ou satellitale

Les **orthophotographies** ou **orthoimages** sont des **images aériennes** ou **satellitales** de la surface terrestre rectifiées géométriquement et égalisées radiométriquement. Elles se présentent sous forme de **dalles** et sont géoréférencées.

Comment ça marche ?

Les orthophotographies aériennes ou satellites sont obtenues actuellement par numérisation de clichés aériens. L'inclinaison de la prise de vue et celle des objets due aux pentes sont corrigées, afin d'obtenir une carte plane, dont tous les points semblent avoir été pris à la parfaite verticale, sur un terrain plat. Les dalles sont alors assemblées en mosaïques et les superpositions gommées. Il ne reste alors plus qu'à homogénéiser les couleurs, grâce à un processus baptisé correction radiométrique. [Denis *et al.* 2003]





Photographie aérienne aéroportée - Capteur d'image Drone Cyclope 4 (@Vision du ciel) - Satellite @QuickBird




Exemple de capteurs : A Gauche : L'avion d'InterAtlas avec caméra numérique UltraCam – A Droite Ballon captif Imagenciel Extrait [InterreglIIB Posidonia 2007 - b]

Les capteurs numériques des caméras couvrent le domaine du visible mais aussi de l'invisible, comme le rayonnement infrarouge.

Que voit-on sur l'image géoréférencée obtenue ?

Image aérienne aéroportée		Image satellitale
BD ORTHO IGN ou Campagne spécifique	**Drone - Ballon captif**	
Il s'agit de la BD ORTHO V2 (actualisée en Janvier 2012 suite à l'usage systématique de PVA (Prise de Vues Aériennes) numériques depuis 2005 - avant de 99 à 2004 : argentiques majoritairement avec ajout d'un canal dans le proche infra rouge). La résolution (taille terrain du pixel) est de 50, 40, 30 ou 20 centimètres. Résolution standard : 50 cm La radiométrie (contenu colorimétrique des images) de chaque pixel est codée sur 3 octets (24 bits) correspondant : - Pour l'orthophotographie couleur : aux 3 couleurs primaires rouge, vert, bleu, dans cet ordre. - Pour l'orthophotographie infrarouge couleur (IRC): à l'infrarouge, au rouge et au vert, dans cet ordre.	Il est possible aujourd'hui de réaliser des photographies aériennes à très haute résolution (pixel de quelques cm) grâce au développement des appareils numériques, de plus en plus légers et de plus en plus performants. Ces photographies peuvent être prises depuis des aéronefs pouvant voler à faible vitesse (ULM, hélicoptères, drones). Elles peuvent être réalisées, selon les objectifs de l'étude, en prises de vue verticales (orthorectifiables et géoréférençables sous certaines conditions) ou obliques.	**L'imagerie multi-bandes** (ou Mode MS), se base sur des mesures de réflectance réalisées à une dizaine de longueurs spectrales, relevés qui sont ensuite associés pour obtenir des images en couleurs ; **L'imagerie panchromatique** (ou Mode PAN) qui consiste en une mesure de la réflectance dans une large bande électromagnétique (obtention d'une image très résolue mais en Noir et Blanc). - Le **pas de renouvellement** est plus important que les photographies de la BD ORTHO® (quelques jours). - **Possibilité d'analyses spectrales** permettant un traitement plus complexe de l'information → pas forcément utile dans le cas de l'herbier de posidonies.
Un plan de vol très précis suivant des axes parallèles et un respect de l'altitude sont donc essentiels pour assurer le recouvrement		
Intérêt : On peut gérer la fréquence		Souvent aléatoire (sauf IKONOS /35j)

Paramètres de la méthode

La **précision** de ces méthodes est **le pixel de l'image** obtenue. Elle est considérée, pour cette famille de méthodes, comme **égale à la résolution** de l'image. Ces méthodes sont **limitées aux petits fonds** : la clarté de l'eau ne permettant la visualisation des fonds que jusqu'à une profondeur limite : 10 m à 15 m. De plus il faut gérer la disponibilité de ces images.

Notons que le renouvellement de l'Orthophotographie littorale 2000 (Projet OrthoLitto 2011-2013) correspondant à l'acquisition d'images aériennes sur la bande terrestre et littorale en continu sur le trait de côte de la région PACA) est en cours et que les données seront prochainement disponibles.
En savoir plus → [http://www.crige-paca.org] Accès aux données → [www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr]

Des résultats de suivis d'herbier de posidonies réalisés par le bureau d'études Andromède Océanologie à l'aide ces méthodes, sont donnés pour illustration au chapitre 4 (Cf.p 77 et 86).

Notons enfin que la technique du LIDAR aéroporté, utilisant un télémètre 3D et fournissant un modèle numérique 3D de la zone survolée, donne de bons résultats par très petits fonds.

Synthèse des méthodes surfaciques aériennes ou satellitaires

Le tableau suivant synthétise les caractéristiques des diverses méthodes de télédétection aérienne :

Méthode	**Précision**	**Résolution** = celle du capteur	**Couverture**	**Répétitivité (opérateur)**	**Répétabilité (acquisition) objectif / suivi**	**Coût**
Photo aérienne BD ORTHO	1 m	20 à 50 cm	Département : dalles de : 5 km x 5 km (avt 2009 : 1.5km x 1.5 km	BD ORTHO IGN	Tous les 5 ans 3 ans en 2014	gratuit (mission de service public)
Campagne spécifique aéroportée	0.5 m	10 à 50 cm	Typt qq km^2		À la demande	
Photo aérienne drone - ballon	1 m ld BD ORTHO	10 à 50 cm	Typt 1 km^2		À la demande	
Image satellitaire	= 1 pixel 1 m à 4m	1 m à 4 m (PAN à MS)	11 km x 11 km	IKONOS	Ts les 35 j	500 $ / 25 km^2
	0.7 à 2.8 m	0.7 m à 2.8 m (PAN à MS)	16.5 km x 16.5 km	QUICK BIRD	aléatoire	1000$/ 49 km^2
	2.5 à 5 m	2.5 m à 5 m (PAN à MS)	60 km x 60 km	SPOT5	aléatoire	1700 $ / 30 km x 30 km
	15 à 30 m	15 m à 30 m (PAN à MS)	180 km x 180 km	LANDSAT	aléatoire	gratuit
Toutes	Typt 0.5 m	10 cm à qq m typ 0.5 m	tout	GOOGLE EARTH	aléatoire	gratuit

GOOGLE EARTH

GOOGLE EARTH est une mappemonde virtuelle permettant de visualiser la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires ; ce logiciel est disponible pour tous en version gratuite et il est particulièrement utile pour le gestionnaire dans le cadre de l'application du suivi de l'herbier de posidonies.
GOOGLE EARTH permet de visualiser la totalité du globe en photos satellite. Certaines zones (en nombre limité) sont disponibles en photos aériennes.
Le niveau de détail des images fournies par GOOGLE EARTH a fortement évolué depuis 2006 et, pour cause, il **a dorénavant accès aux photographies aériennes de l'IGN**(BD ORTHO).

Les satellites au service de GOOGLE EARTH

Pour nous offrir son point de vue unique sur le globe et ses vingt niveaux de zoom, GOOGLE EARTH utilise plusieurs fournisseurs d'images :

- Satellite Haute Résolution :

- TERRAMETRICS (Base TruEarth : ensemble du globe en couleurs naturelles, avec une résolution de 15 mètres, obtenus par traitement d'images fournies par le satellite LANDSAT 7).
- SPOT IMAGE et GOOGLE ont signé un accord en 2009 pour améliorer la résolution des images dans GOOGLE EARTH, sur certaines zones du monde. Le spécialiste toulousain des images satellite SPOT IMAGE fournit à GOOGLE des images du satellite SPOT5 à 2.5 m de résolution (1 pixel représente 2.5 m au sol). Mais aussi : NASA, FORMOSAT 2, THEOS, CARTOSAT1.

- Satellite Très Haute Résolution

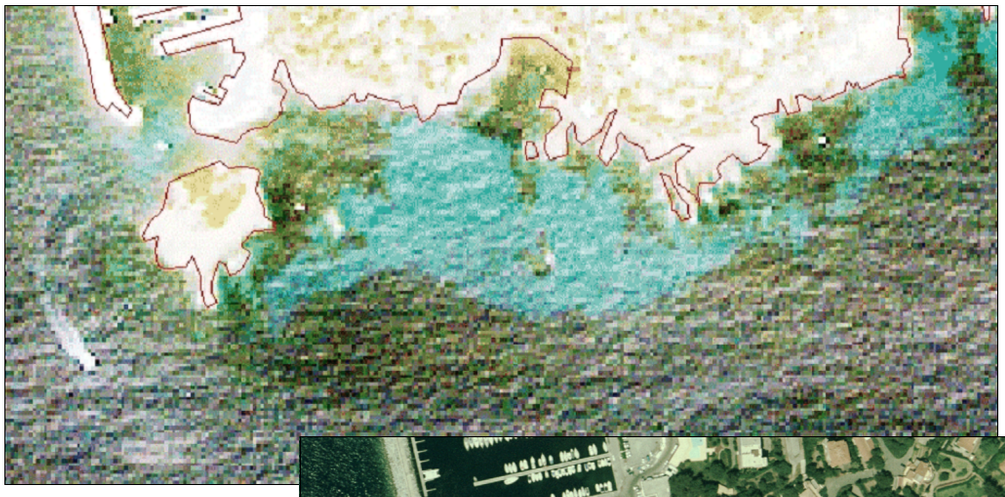
- DigitalGlobe fournit la majeure partie des images haute résolution de GOOGLE EARTH. Celles-ci sont issues du satellite QUICKBIRD, lancé en octobre 2001, qui acquiert des images noir et blanc à 70 cm de résolution et des images couleurs (4 bandes) à 2,8 m de résolution couvrant une surface de 16,5 km x 16,5 km).
- GEOEYE1 conçu pour prendre des clichés à quelque 681 kilomètres de la Terre, et se déplaçant à une vitesse de sept kilomètres par seconde, GEOEYE1 fournit depuis 2008 des images de 41 centimètres par pixel en noir et blanc et de 1,65 mètre en couleurs.)
- Mais aussi : TheGeoInformation Group, WORLDVIEW 1, IKONOS...

En résumé, quand les images aériennes satellitales ou aéroportées sont disponibles et que la profondeur de l'eau permet de les exploiter elles représentent la MEILLEURE solution pour la cartographie et le suivi, à condition que l'on puisse disposer d'une image de résolution/précision similaires lors de l'itération suivante.
De plus GOOGLE EARTH permet d'accéder gratuitement et simplement à des images de très haute résolution.

Notons qu'il existe à présent une fonction de suivi des images historiques sous GOOGLE EARTH :
Menu « Affichage » → « Images historiques »



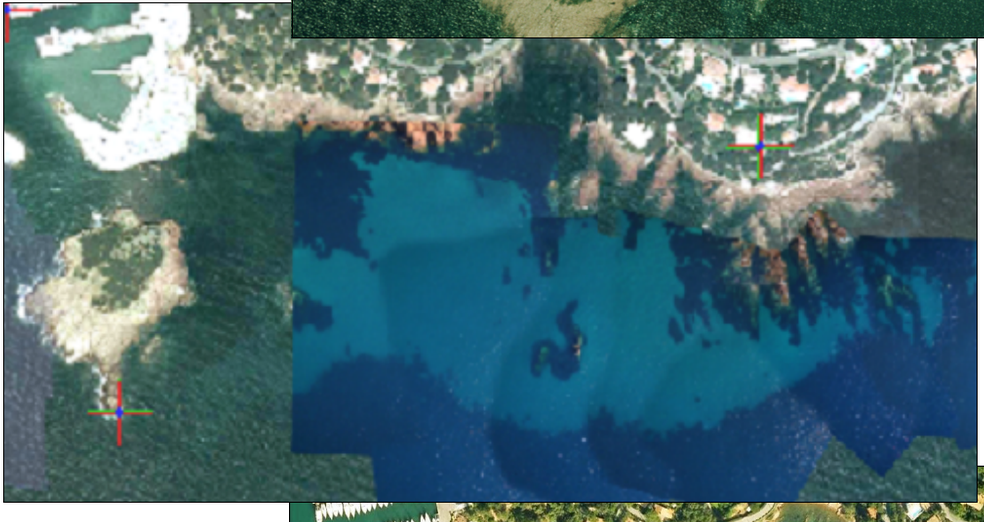
Suivi des images historiques sous GOOGLE EARTH



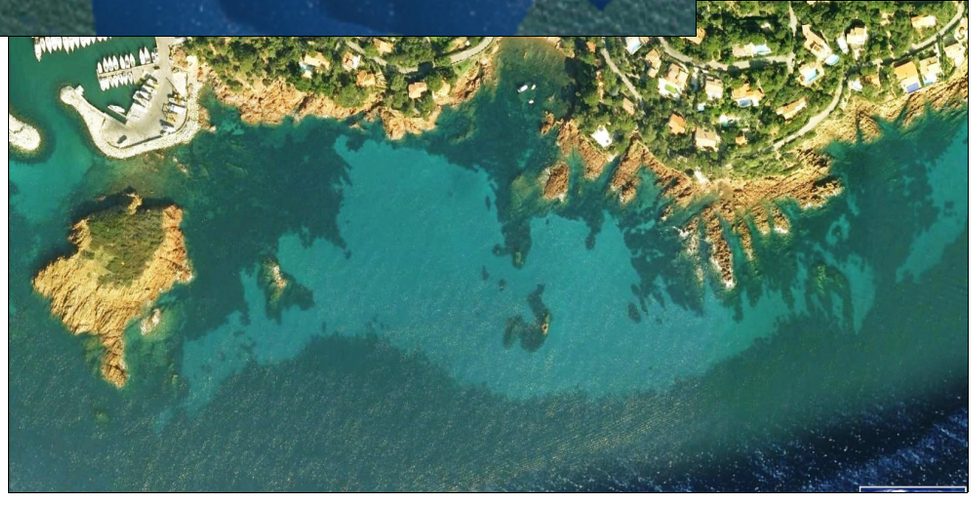
IKONOS 4/8/2001



BD Ortho 1998



Drone 2006



Google 2006
(DigitalGlobe 2011)

Figure 13: Zone de St Raphaël – Le Lion d'Or Extrait de [InterreglIIIB Posidonia 2007 – b : N. Ganzin- G. Cadiou]

2. Télédétection acoustique

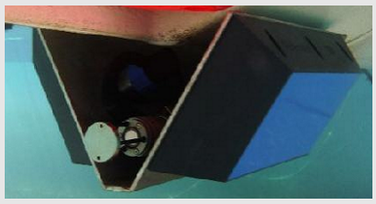
Fiche Méthode : Sonar latéral tracté ou sonar de coque

Comment ça marche ?

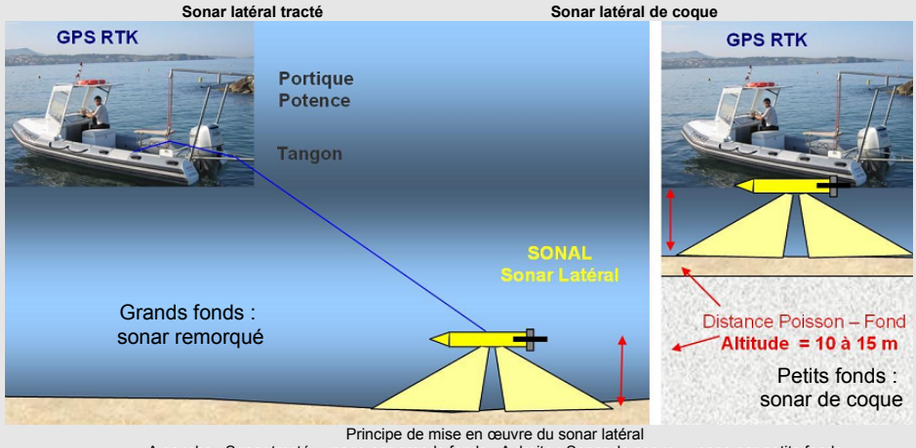
Le **sonar latéral**, ou **sonal**, réalise à l'aide d'ondes sonores des images acoustiques détaillées de la **réflectivité** des fonds marins. Ces images sont obtenues en balayant un faisceau sonore, en incidence rasante sur le fond. L'écho recueilli au cours du temps est une représentation de la rugosité du fond et surtout de la **présence d'irrégularités ou de petits obstacles**. Ce signal enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar, d'où son nom (side scan sonar), constitue une radiale sonar. Un **plan de navigation** précis est établi à l'avance. Il définit les radiales de mesure. L'opération de mosaïquage permet de constituer ligne après ligne une image acoustique du fond ou **mosaïque**.



Sonar latéral tracté



Sonar latéral de coque



Principe de mise en œuvre du sonar latéral

A gauche : Sonar tracté : usage par grands fonds - A droite : Sonar de coque : usage par petits fonds

Il est important de noter que ces méthodes ne sont pas réellement **limitées par la profondeur**, hormis dans les très petits fonds.

Le sonar latéral de coque opère typiquement dans des profondeurs allant du mètre à 40 m

Le sonal latéral tracté peut typiquement mesurer dans des fonds allant de 5 à 10 m jusqu'à 60 m

Que voit-on sur la mosaïque ?

Le sonar latéral fournit une image de la réflectivité acoustique de l'interface eau-fond représentée en niveaux de gris, d'autant plus sombre que la rugosité du fond est forte.

Paramètres de la méthode

Les paramètres de la méthode sont liés aux caractéristiques du sonar latéral utilisé : tracté ou de coque, fréquence des signaux. La résolution de l'image dépend du type de sonar utilisé. La figure de la page ci-contre montre le résultat d'une tache d'herbier vue par un sonar à 250 kHz en haut et un sonar à 450 kHz, plus résolvant (meilleure observation des détails), en bas.

Le choix du type de sonar latéral utilisé est primordial dans une opération de suivi : il doit être adapté à la problématique étudiée. Ainsi, s'il s'agit de cartographier la présence/absence d'herbier à l'échelle d'une baie, on privilégiera l'usage d'un sonar basse fréquence (typiquement 150 kHz) à large portée (400 m de part et d'autre du navire). S'il s'agit de mettre en évidence des reliefs particuliers dans la matte et d'observer l'évolution temporelle de l'herbier, il faut privilégier un appareillage plus résolvant, à plus haute fréquence (typiquement 250 kHz, 400 kHz ou même 900 kHz).

Il faut être attentif à la façon dont est effectuée l'étape de mosaïquage ; si la mosaïque est réalisée uniquement à partir de logiciel de traitement d'image sans SIG (type Photoshop), la chaine des précisions est rompue, et la qualité de la mosaïque peut être fortement dégradée.

Enfin, il est essentiel de demander en restitution finale, la mosaïque sonar latéral, et pas uniquement la cartographie réalisée, car la mosaïque peut resservir plus tard pour d'autres applications.

Notons enfin que les **méthodes à base de sonar latéral peuvent être mises en œuvre localement** dans le cadre de suivi (radiale sonar aux alentours des limites de l'herbier, sans forcément cartographier l'ensemble de l'herbier).

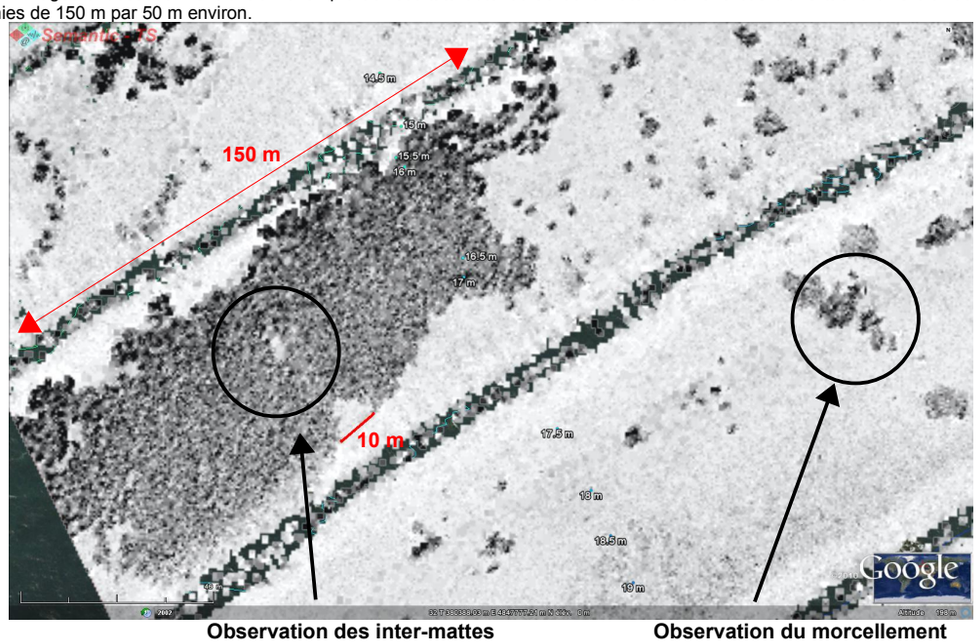
Méthode	Fréquence	Précision	Résolution	Couverture	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût /km²
Sonar latéral tracté	900 kHz	5 à 15 m	0.1 à 0.3 m	2 à 3 km² par jour	Oui, mesure à la demande	# 2000 €
Sonar latéral tracté	450 kHz	2* à 15 m	0.15 à 0.5 m	4 à 8 km² par jour	Id	# 1200 €
Sonar latéral tracté	150 kHz	2* à 15 m	1 à 2 m	10 à 15 km² par jour	id	# 500 €
Sonar latéral de coque DGPS	250 kHz	1 à 5 m	0.5 à 1 m	4 à 8 km² par jour	id	# 1200 €
Sonar latéral de coque DGPS RTK	250 kHz	0.5 à 1 m	0.5 à 1 m	4 à 8 km² par jour	id	# 1200 €

* si utilisation de pinger acoustique sur le sonar

Minimum 4 km² (10 km² pour le sonal à 150 kHz)

Synthèse et exemples de résultats obtenus au sonar latéral

Les deux images ci-dessous montrent un exemple de résultats obtenus au sonar latéral dans le cas d'une tache d'herbier de posidonies de 150 m par 50 m environ.



Observation des inter-mattes **Observation du morcellement**

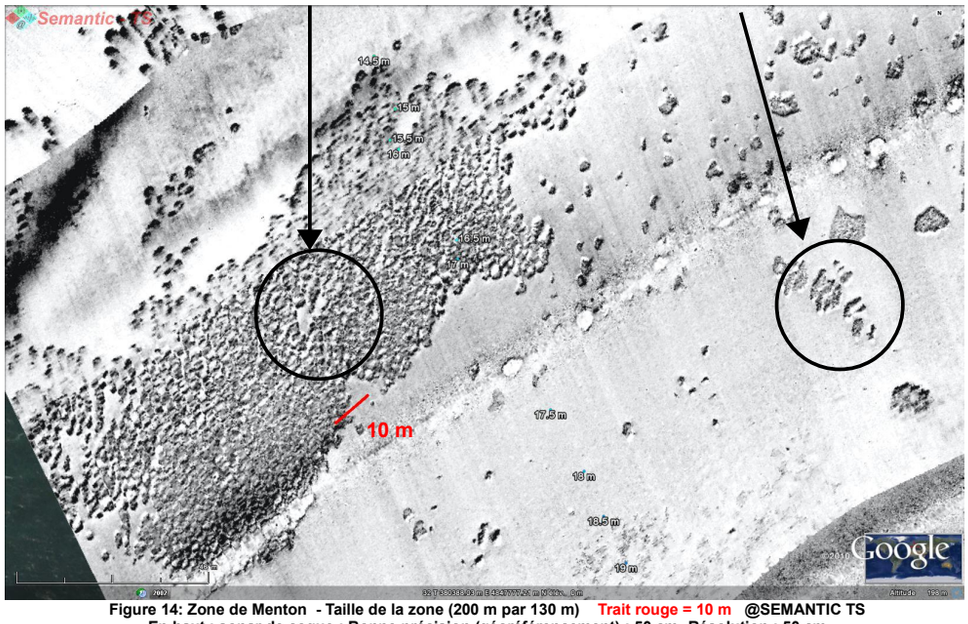


Figure 14: Zone de Menton - Taille de la zone (200 m par 130 m) Trait rouge = 10 m @SEMANTIC TS
En haut : sonar de coque : Bonne précision (géoréférencement) : 50 cm- Résolution : 50 cm
En bas : sonar latéral tracté Klein 3900 : Précision : 5 m- Bonne résolution : 25 cm

Sur la figure du haut, on observe l'herbier de posidonies à partir d'un sonar de coque présentant une bonne précision, à savoir un géoréférencement à 50 cm près. La résolution de l'image est de 50 cm (pixel de l'image).
Le trait rouge représenté sur la figure matérialise la « largeur » de l'anse de sable située dans l'herbier. Ce trait est géo-référencé à 50 cm près.

Sur la figure du bas, l'herbier de posidonies est « vu » par un sonar latéral tracté dont la résolution est de 25 cm. Cette haute résolution permet de mieux observer les détails de l'herbier (intermattes, petites taches périphériques) ainsi que sa texture. Par contre, ce sonar étant tracté, sa précision est moindre (5 m) ; c'est-à-dire que le géoréférencement de l'image est effectué à 5 m près.
Le trait rouge, qui n'a pas bougé dans le repère terrestre, apparait cette fois translaté sur la mosaïque enregistrée avec le sonar tracté. Il permet d'illustrer le fait que le positionnement des informations de cette mosaïque, n'est précis qu'à environ 5 m.

Cet exemple permet en sus d'illustrer la complémentarité des deux types de sonars, le sonar de coque présentant des images extrêmement bien géoréférencées et le sonar tracté des images bien résolues.

Exemples de résultats obtenus au sonar latéral avec en complément le SACLAF DIVA

Les deux figures ci-après illustrent les mosaïques sonar latéral accessibles à l'échelle d'une baie cette fois.
Les prairies d'herbier (de posidonies et de cymodocées) sont mises en évidence par la réflectivité accrue du fond.

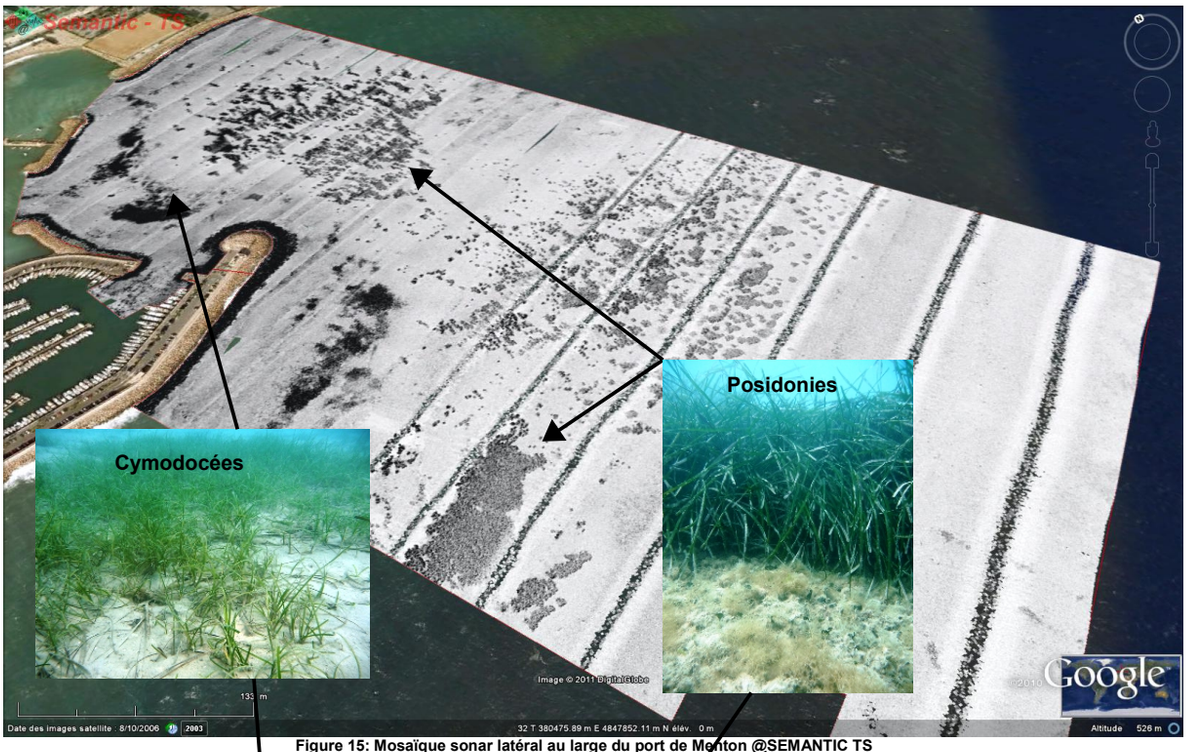


Figure 15: Mosaïque sonar latéral au large du port de Menton @SEMANTIC TS
Observation de zone de forte réflectivité du fond. Observations sur le terrain : cymodocées et posidonies

La figure ci-dessous, illustre le fait que les résultats du SACLAF DIVA permettent d'améliorer la connaissance du fond. Certaines zones de réflectivité accrue font état d'une signature DIVA négative (points jaunes) et ces zones sont recouvertes de sédiments plus rugueux ou de cymodocées de faible épaisseur végétale mais de forte rugosité acoustique. Les zones de signature DIVA positives (points verts) sont recouvertes de posidonies.

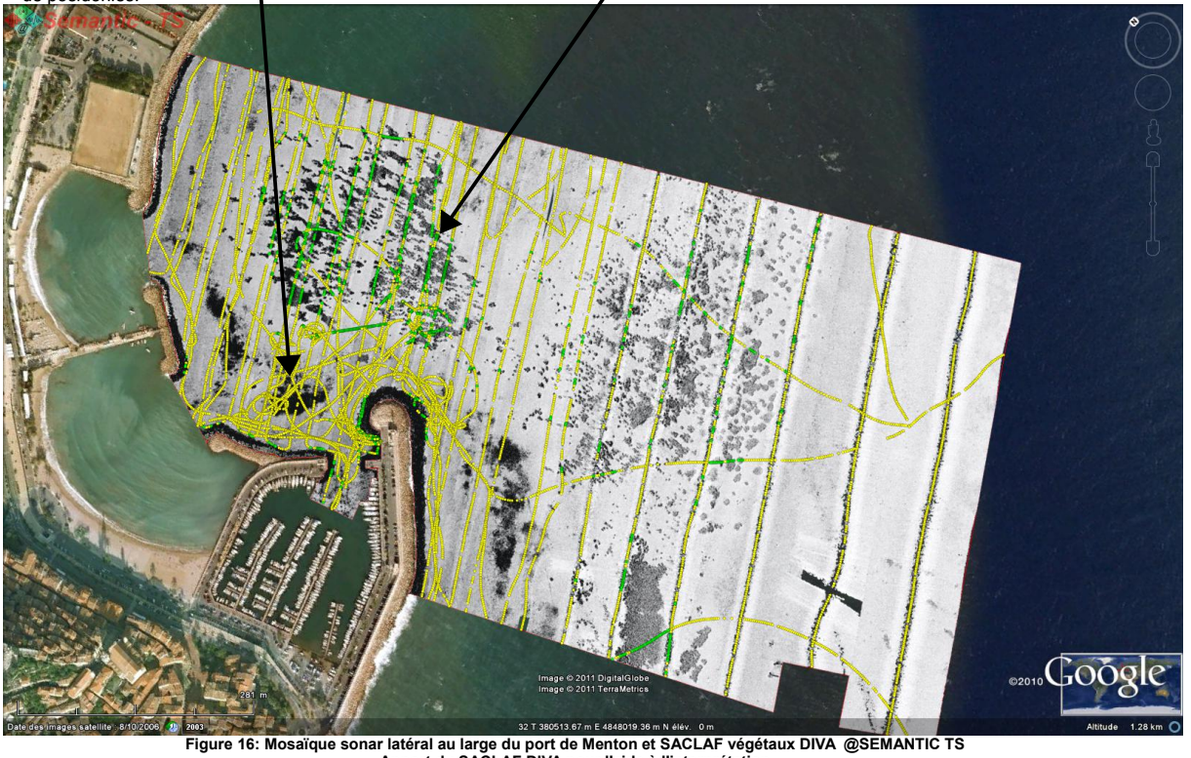


Figure 16: Mosaïque sonar latéral au large du port de Menton et SACLAF végétaux DIVA @SEMANTIC TS
Apport du SACLAF DIVA pour l'aide à l'interprétation

Système de Cartographie et de Classification acoustique des végétations (SACLAF Végétaux)

Fiche Méthode : Système Acoustique de CLassification Automatique des Fonds végétaux (SACLAF Végétaux)

Qu'est-ce qu'un SACLAF en général?

Un SACLAF est un Système Acoustique de Classification Automatique des natures de Fonds pour la cartographie). Il est couplé à un sondeur acoustique fixé sous la coque du navire. Ce dernier émet une onde acoustique qui se réfléchit au fond et revient vers la surface. Cette onde subit une déformation qui est fonction de la nature du fond [Ehrhold 2003]. Le signal reçu est enregistré par le sondeur et sa comparaison avec le signal émis permet au SACLAF de classifier les fonds.

SACLAF Végétation : Comment ça marche ?
Le système renseigne sur la présence d'un substrat végétal sur le fond.

Sur le sondeur utilisé, la réponse acoustique du sondeur est différente selon que le son se réfléchit sur une zone couverte de végétation ou non, comme l'illustre la figure ci-dessous :

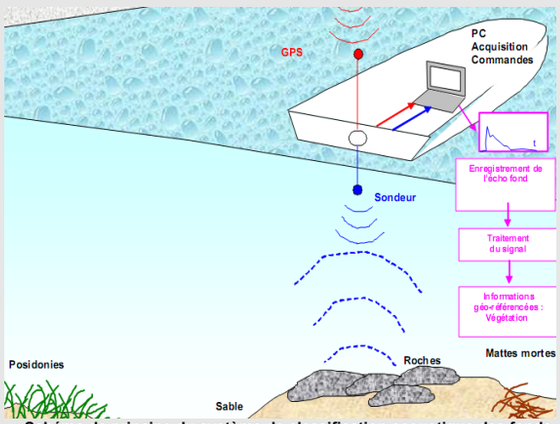
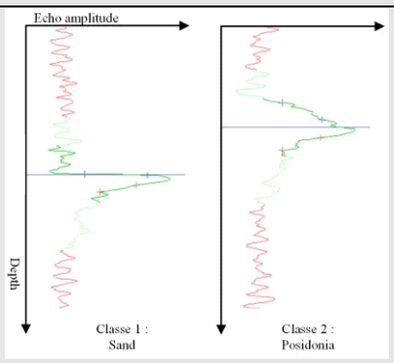
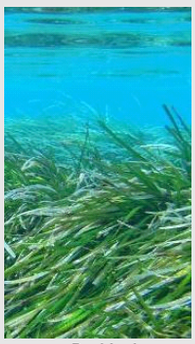


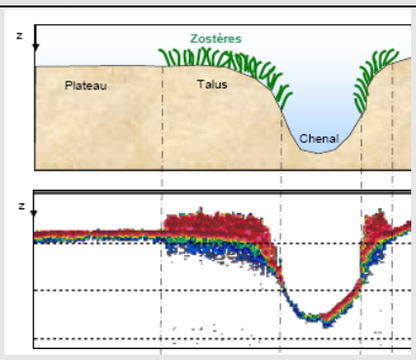
Schéma de principe du système de classification acoustique des fonds végétaux (SACLAF DIVA)



Réponses acoustiques
A gauche : fond de sable - A droite : posidonies



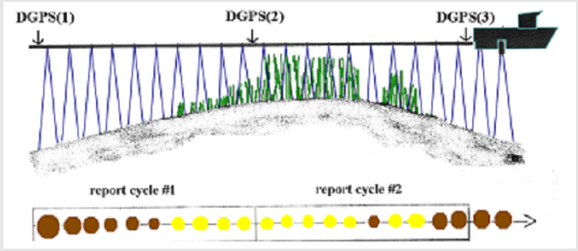
Posidonies



En haut : Schéma du milieu réel
En bas : Réponse acoustique du sondeur

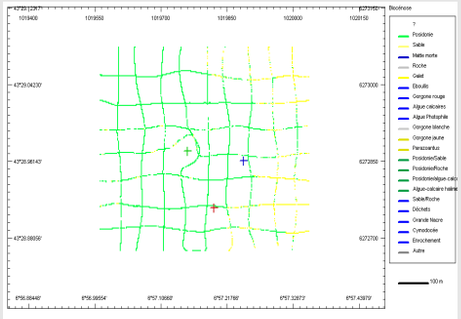
Que représentent les données collectées ?
Le SACLAF végétaux est complémentaire des méthodes classiques de cartographies des biocénoses ; en général il place sur une carte un point vert en présence de végétation dense et un point jaune en son absence.

Les SACLAF végétaux les plus connus sont les systèmes BIOSONICS, ou le SACLAF DIVA spécialement développé pour la posidonie par SEMANTIC TS en partenariat avec la DGA et l'Agence de l'Eau RMC. Ce dernier fonctionne sur herbier de plaine. Chaque point d'observation « acoustique » réalisé par DIVA remplace une observation visuelle de type présence/absence [Noël *et al.* 2009] [Viala *et al.* 2007].



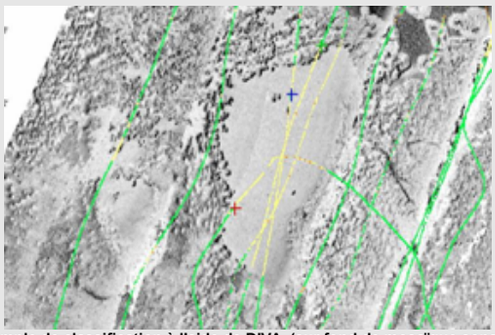
Principe du SACLAF BIOSONICS

En raison de son linéaire journalier (100 km/jour) important la méthode DIVA peut être utilisée en cartographie surfacique.



Exemple de cartographie surfacique avec la méthode DIVA

La méthode DIVA peut être utilisée en classification. Elle s'assimile à un échantillonnage « acoustique »



Exemple de classification à l'aide de DIVA (sur fond de mosaïque sonal)

Paramètres du SACLAF végétaux
La méthode acoustique mono-faisceau :
- Renseigne sur la présence de végétation : posidonies, zostères, laminaires ...
- Fonctionne pour sable/végétation (extension en cours pour la matte et la roche).
- Précision : 1 m à 10 m de profondeur, 3 m à 30 m, 6 m à 50 m.
- Récurrence d'acquisition : 5 par seconde (recouvrement des taches au sol).
- Vitesse acquisition : 7 Nd.
- Linéaire couvert : 80 km/jour soit quelques milliers de points d'observations «acoustiques » géoréférencés par jour.

Le SACLAF végétaux offre les plus values suivantes :
- Fournit simultanément la bathymétrie
- Fonctionne par toute profondeur (par grands fonds là où il est difficile d'envoyer des plongeurs, et à très basse profondeur où les engins remorqués ne peuvent aller)
- Est opéré simultanément avec d'autres appareillages (sonar, sondeur multi-faisceaux…)
- Fonctionne de jour ou de nuit, indépendamment du courant, de la température ou de la turbidité de l'eau
- Mise en œuvre extrêmement simple (*id*. navigation) (pas de mise à l'eau : ni homme, ni engin)
- Traitement quasi temps-réel qui permet donc de se repositionner rapidement (optimisation des levés)
- Mémorisations des informations : procédé répétitif : utile pour les suivis d'évolution
- Pas de coût de mise en œuvre si opéré en même temps qu'un sondeur bathymétrique ou sonar latéral

Le SACLAF végétaux permet de diminuer considérablement les vérités terrain et de conserver l'action plongée pour des observations de qualité.

Limitations du SACLAF végétaux DIVA
Ne fonctionne pas sur fond rocheux ; il est opérationnel sur herbiers de plaine.

Méthode	Fréquence	Précision	Résolution	Couverture	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût /km
SACLAF DIVA	200 kHz	0.5 à 3 m	< 2 m Typ. 10 m à 50 m	80 km par jour	Oui, mesure à la demande	# 40 € min 80

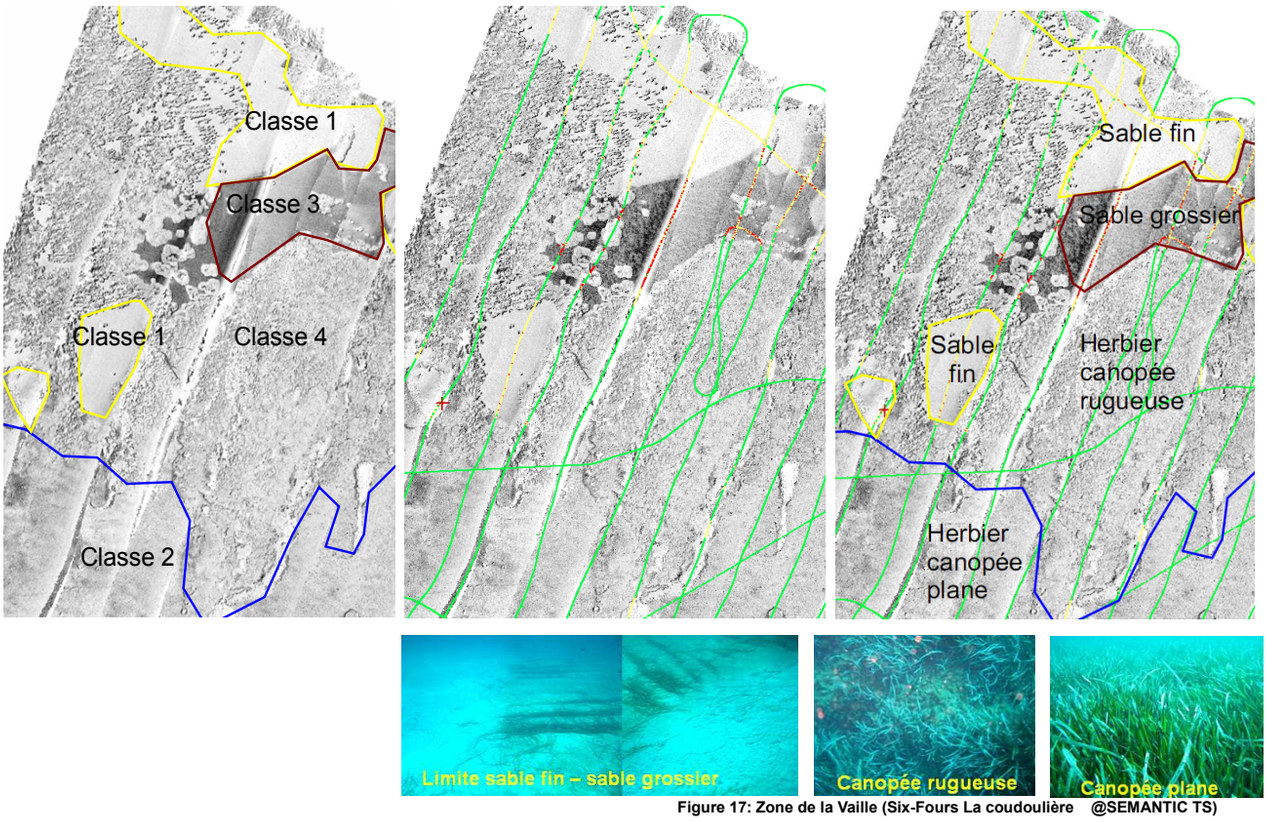


Figure 17: Zone de la Vaille (Six-Fours La coudoulière @SEMANTIC TS)

Interprétation a priori de la mosaïque sonal	Informations du SACLAF DIVA	Analyse et interprétation : Apport du SACLAF DIVA
La segmentation de la mosaïque sonar latéral met en évidence 4 classes de fond. Sans information a priori sur la vérité terrain, l'interprétation raisonnable de cette image : Classe 1 : sédiment superficiel de type 1, sable probablement Classe 2 : sédiment superficiel de type 2, sable mais de grain différent (pouvoir réfléchissant plus fort) Classe 3 : sédiment superficiel très réfléchissant acoustiquement, à déterminer Classe 4 : végétation	Le SACLAF végétaux DIVA indique du sable pour la classe 1 (en jaune) et de la posidonie pour la classe 4, ce qui est en accord avec l'interprétation a priori de la mosaïque sonal. Par contre, elle est en contradiction avec une interprétation classique de la mosaïque sonal en concluant que la classe 2 est de la posidonie.	La vérité terrain montre que la méthode DIVA a raison. Les changements de la dynamique de l'herbier et de son micro-relief associé, engendrent une modification de la rugosité de la canopée et permettent d'expliquer pourquoi, dans la partie nord de la zone, la réponse acoustique au sonal est plus forte que dans la partie sud, bien qu'il s'agisse d'herbier de posidonies dans les deux cas. Ce phénomène introduit une ambigüité lors de l'interprétation des mosaïques sonals. **Le seul moyen actuel de lever l'ambiguïté étant de disposer de la vérité terrain, DIVA offre un complément innovant en apportant des informations supplémentaires, nombreuses, précises et bien géoréférencées.**

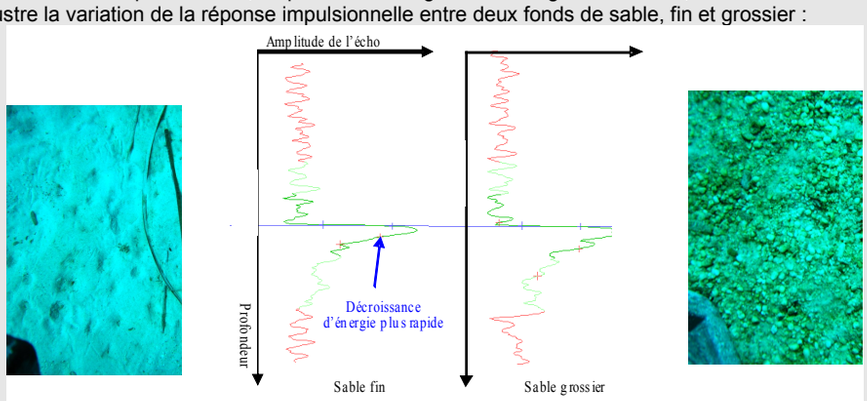
Remarque : Système de Cartographie et de Classification acoustique des Fonds (SACLAF)

Fiche Méthode : Système Acoustique de CLassification Automatique de nature des Fonds (SACLAF)

D'autres systèmes, de type SACLAF, peuvent être plus généralement utilisés comme aide à l'interprétation des images géo-référencées. Ils sont particulièrement intéressants lorsqu'ils sont opérés en même temps que les sonars, n'augmentant alors pas les coûts d'acquisition à la mer, mais apportant des informations complémentaires permettant de réduire les besoins en vérité terrain.

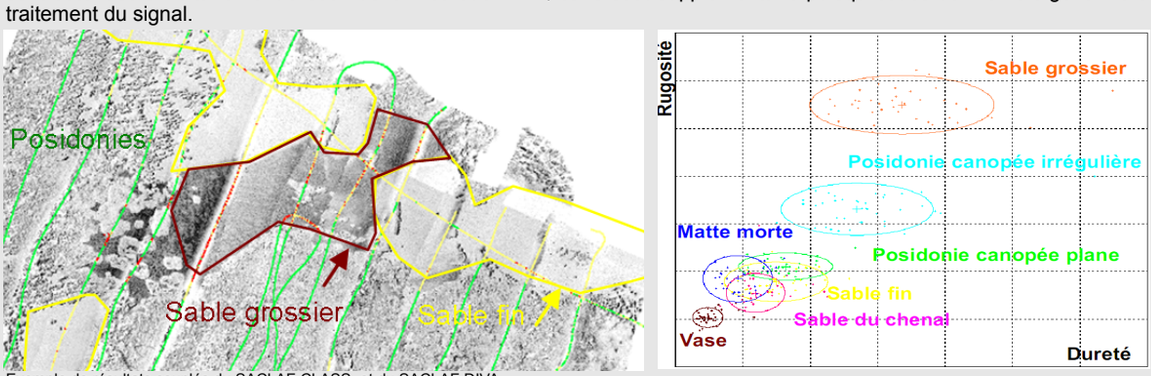
Comment ça marche ?
Un SACLAF peut aussi permettre aussi la classification acoustique des sédiments superficiels. Les SACLAF les plus souvent opérés sont le système ROXANN (sur le navire HALIOTIS de l'IFREMER par exemple) et QTC-view développés à partir d'écho sondeur SIMRAD ou ECHO PLUS [Ehrhold 2003].

Exemple : SACLAF CLASS (CLAssification des Sédiments Superficiels) développé par SEMANTIC TS à partir d'un écho-sondeur SIMRAD :
La méthode CLASS permet de renseigner sur la rugosité du sédiment superficiel. L'algorithme exploite la forme des deux premiers échos réfléchis par le fond ; le premier renseigne sur la rugosité du fond, le deuxième sur sa dureté. La figure suivante illustre la variation de la réponse impulsionnelle entre deux fonds de sable, fin et grossier :



Variation de la réponse impulsionnelle du sondeur mono-faisceau entre deux fonds de nature différente
A gauche: Sable fin – A droite : Sable grossier

Que représentent les données collectées ?
Ces données de classification sédimentologique apportent une aide à l'interprétation de la mosaïque. Notons qu'elles elles sont obtenues simultanément à ceux de la méthode DIVA, sans coût supplémentaire puisqu'issues du même algorithme de traitement du signal.



Exemple de résultats couplés du SACLAF CLASS. et du SACLAF DIVA
En jaune : Sable fin – En marron : Sable grossier - En vert : posidonies

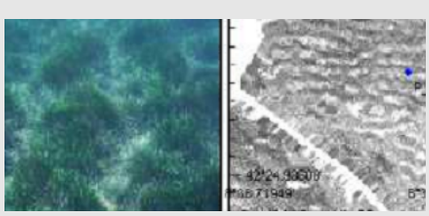
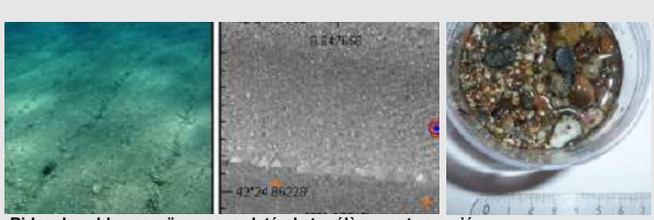


Figure 18: Herbier ondoyant et mosaïque sonal latéral



Rides de sable, mosaïque sonar latéral et prélèvement associé
Dans les deux cas la mosaïque présente des « rides ». Le SACLAF permet d'éviter l'erreur de classification.

4. Monitoring acoustique (RTK / sonar de coque)

Fiche Méthode : Monitoring acoustique (RTK/ Sonar de coque)

Comment ca marche ?

La méthode de monitoring RTK a été spécialement conçue pour des applications de suivi des fonds marins. Elle repose sur l'acquisition simultanée et synchronisée de plusieurs capteurs au sein du même SIG, puis sur la fusion de leurs données respectives [Noël *et al.* 2010] .

Les systèmes d'acquisition mis en œuvre sont les suivants : sonar latéral de coque, sondeur bathymétrique multi-faisceaux sonar latéral tracté, SACLAF DIVA pour la végétation et SACLAF pour la sédimentologie.

La plateforme d'acquisition est géoréférencée en mode RTK (GPS centimétrique) et ses mouvements sont enregistrés par une centrale d'attitude et corrigés.

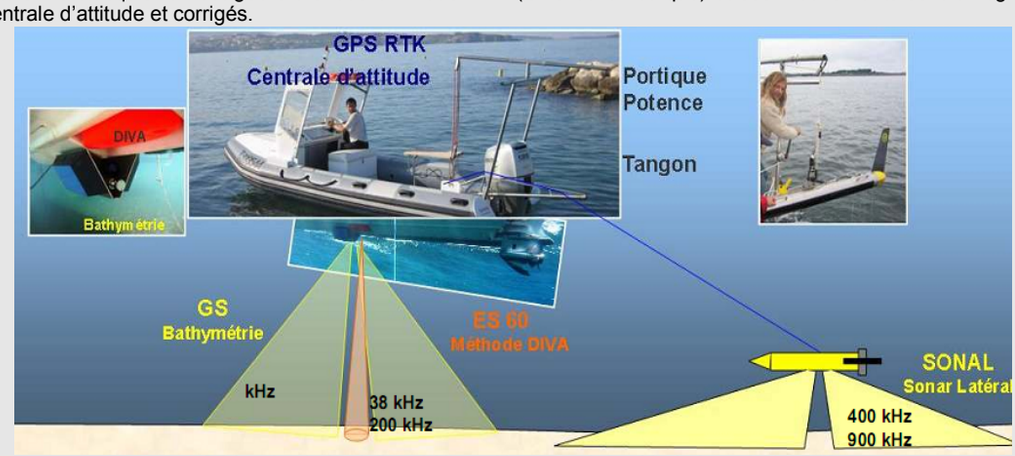


Schéma de principe de l'acquisition multi-capteurs de la méthode de monitoring RTK

Que représentent les données collectées ?

Les données collectées par la méthode sont issues de capteurs opérés simultanément. Elles sont constituées de :

- La **bathymétrie** renseignant sur la topographie du fond ;
- La **micro-rugosité bathymétrique** (extraite de la bathymétrie fine, c'est-à-dire haute résolution) fournissant des informations sur la couverture végétale du fond ;
- L'**imagerie sonar latéral** obtenue par le sonar de coque à 250kHz, le niveau de gris renseignant sur la réflectivité et donc sur la nature de la couverture (végétale ou non) du fond ;
- L'**imagerie sonar latéral** haute résolution complémentaire éventuelle obtenue par le sonar latéral tracté ;
- L'information de présence ou d'absence de végétations ou de peuplements benthiques fournie par le SACLAF DIVA ;
- La nature du fond fournie par le système de classification des fonds.

Fusion multi-capteurs

La fusion des informations provenant de ces différents capteurs est ensuite réalisée.

Le concept de fusion des données multi-capteurs est innovant et très puissant. Il permet d'établir des cartographies extrêmement précises des biocénoses situées sur le fond de façon aisée c'est-à-dire en diminuant les besoins en vérité terrain (plongeur, caméra).

Dans le cas de la méthode de **monitoring RTK haute résolution** (Monitoring RTK HR) la fusion multi-capteurs permet de recaler la mosaïque haute résolution du sonar latéral tracté à l'aide des données haute précision (bathymétrie, classification acoustique, mosaïque sonal) du sonar de coque pour lequel l'attitude est corrigée.

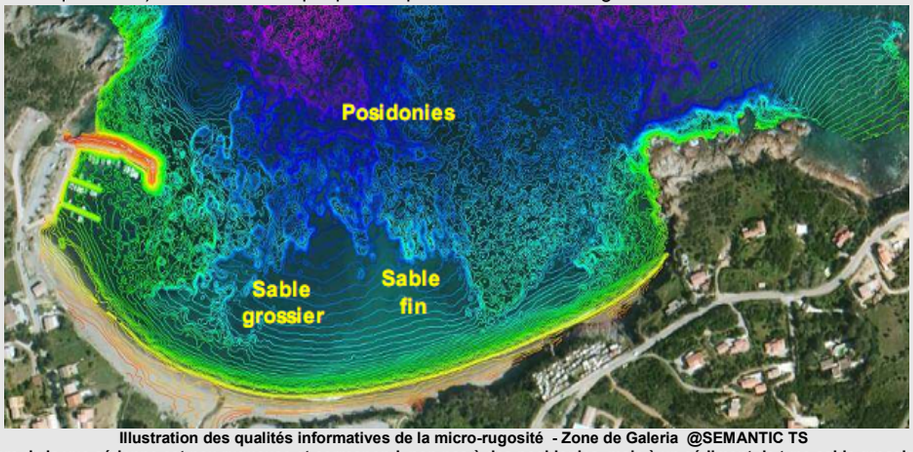


Illustration des qualités informatives de la micro-rugosité - Zone de Galeria @SEMANTIC TS

La zone sombre de la vue aérienne est peu rugueuse et correspond, non pas à des posidonies, mais à un sédiment de type sable grossier, la zone claire étant constituée de sable fin. Les zones rugueuses correspondent à l'herbier de posidonies.

Méthode	Fréquence	Précision	Résolution	Couverture	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût /km²
Monitoring RTK	250 kHz	0.5 m	0.5 m	4 à 8 km² par jour	Oui, mesure à la demande	# 1200 € min 4 km²
Monitoring RTK HR (haute résolution)	250 kHz 900 kHz	0.5 à 5 m	0.1 m à 0.3m	2 à 3 km² par jour	Id	# 2000 € min 3 km²

Exemples de résultats obtenus par les méthodes de monitoring RTK et de monitoring RTK HR

La figure suivante présente, pour illustration du résultat du monitoring RTK des herbiers des posidonies, les mosaïques de deux campagnes d'acquisition successives (en 2009 et en 2011).

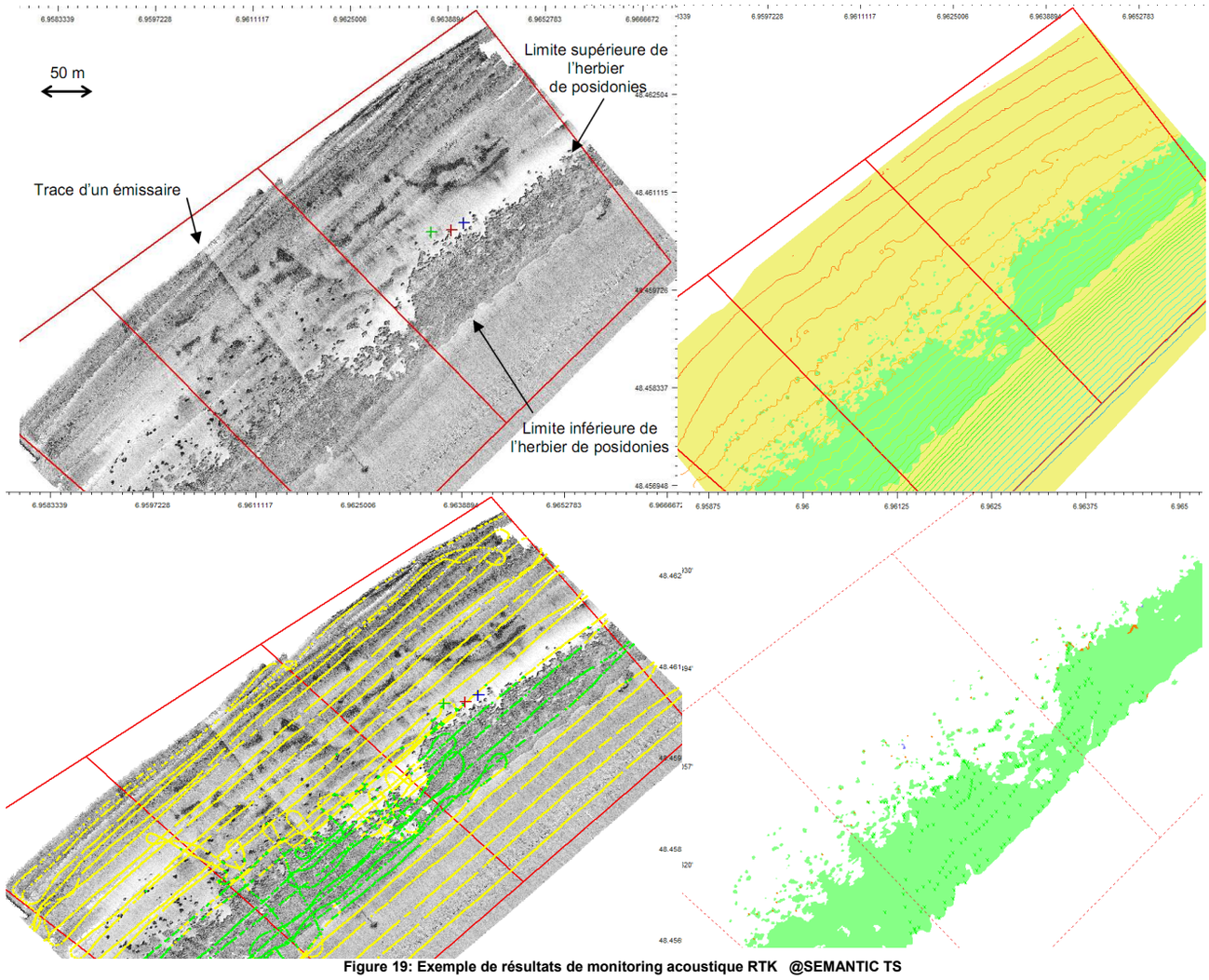


Figure 19: Exemple de résultats de monitoring acoustique RTK @SEMANTIC TS

En haut à gauche : Observation de l'herbier de posidonies à partir d'un sonar de coque (Monitoring RTK) présentant une bonne précision : géo-référencement à 50 cm près. La résolution de l'image est de 50 cm (pixel de l'image).	En haut à droite : Cartographie de l'herbier de posidonies par interprétation de la mosaïque sonar et à l'aide des données : - du SACLAF DIVA - de la bathymétrie - des vérités terrain
En bas à gauche : Mosaïque sonar latéral et résultat du SACLAF DIVA En jaune : sable - En vert : posidonies	En bas à droite : Résultat du monitoring entre l'année 2010 et l'année 2011 En vert : herbier de posidonies inchangé En rouge : lieux à suivre

La capacité de la méthode à remesurer à l'identique, sur une même zone est démontrée et la répétitivité de la méthode validée. La méthode de monitoring développée s'avère être un outil puissant pour les suivis environnementaux visant à surveiller le contour de l'herbier soumis aux pressions anthropiques.

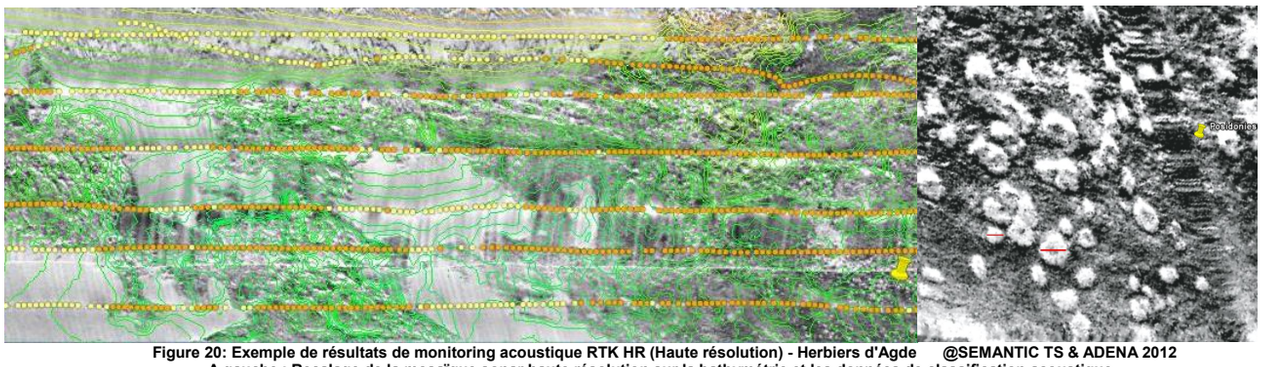


Figure 20: Exemple de résultats de monitoring acoustique RTK HR (Haute résolution) - Herbiers d'Agde @SEMANTIC TS & ADENA 2012
A gauche : Recalage de la mosaïque sonar haute résolution sur la bathymétrie et les données de classification acoustique.
A droite : Zone de taches d'herbier éparses de diamètre de diamètre 50 cm à 3 m. Ces taches sont positionnées à 2 m près. Traits rouges : 1 m et 1.5 m

Notons enfin que les méthodes de monitoring RTK, en raison de leurs grandes précision et résolution, peuvent être mises en œuvre localement dans le cadre de suivi (radiale sonar aux alentours des limites de l'herbier, sans forcément cartographier la globalité de la zone couverte de posidonies).

5. Techniques de vérité de terrain associées (observations)

Les techniques de terrain se répartissent généralement en deux catégories :

- les **techniques d'observation linéaires ou ponctuelles** qui servent de **vérité terrain** dans la réalisation d'une cartographie (traitées dans ce paragraphe),
- les **techniques de prélèvement** qui sont traitées plus loin, dans le paragraphe relatif aux méthodes de suivi de la vitalité.

Constituant la base du calage des méthodes de cartographie et de suivi, la vérité terrain est essentielle.

Observations et photographies par plongeur

Fiche Méthode VT : Plongeur : Observations et Photographies

Les plongeurs professionnels se conforment aux règles de sécurité édictées par le Ministère du Travail (décret n°90.277 du 28 mars 1990 et décret 2011-45 du 11 janvier 2011).

Méthodologie pour le levé géoréférencé synchrone par plongeurs professionnels

Comment ça marche ?
Un plongeur est déposé sur la zone à étalonner déduite des images sonar ou aériennes.

Avant l'immersion, la montre du plongeur, l'horloge de l'appareil photo ou de la caméra et l'heure du GPS sont synchronisées.

Le plongeur, relié à une bouée portant un GPS, photographie le fond.

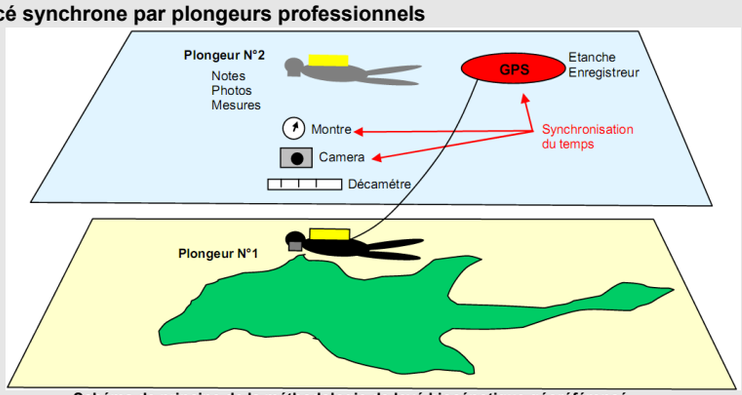


Schéma de principe de la méthodologie de levé biocénotique géoréférencé

La quantité de photos pouvant être importante, une gestion rigoureuse s'impose afin d'éviter les éventuels problèmes d'intégration dans le système de bancarisation final. **Ainsi il est nécessaire :**

- **d'associer un point de localisation GPS à chaque photo,**
- **d'attribuer à chaque photo un nom unique pour l'ensemble du site,**
- **de respecter la nomenclature des fichiers proposée dans les spécifications techniques de format de données.**

L'idéal est que les photos géoréférencées soient ensuite présentées sur une carte dynamique.

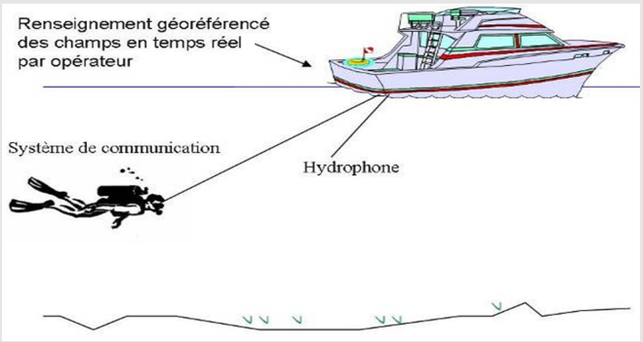
Performance de la méthode

La performance de la méthode dépend des modes de plongée suivants, selon que :

- la plongée a lieu à l'air ou aux mélanges, ou encore en recycleur (autorisation sous certaines conditions)
- le plongeur évolue à la palme en apnée, avec un scooter, ou en mode tracté. Dans ce dernier cas la législation impose qu'il y ait un système de communication entre le plongeur et le bord.

Méthode de transect plongeur-audio

Afin d'apporter de meilleures précisions et performances que la méthode traditionnelle de plongeur tracté, l'Oeil d'Andromède a développé un système tracté d'observation des fonds marins destiné à collecter en temps réel et avec une grande précision les données de vérité terrain nécessaires à la cartographie biocénotique des fonds. Cette méthode de transect plongeur-audio utilise un aquaplane tractant un plongeur. Ce dernier équipé d'un casque audio relié au navire (à la fois pour la sécurité et pour la transmission des informations), transmet oralement les informations observées : nature de la couverture végétale, densité, caractéristiques du sédiment… Celles-ci sont saisies à la volée par l'opérateur présent sur le navire.



Principe de la méthode transect plongeur-audio [Descamp *et al.* 2010]



Aquaplane @Andromède Océanologie

Les données transmises par le plongeur peuvent être positionnées avec une précision métrique grâce à l'utilisation d'un module USBL, le Micronav de Tritech.

Système de communication AQUACOM de RCH Système
Un matériel militaire qui permet à un ou plusieurs plongeurs de communiquer entre eux et avec la surface.
Cet équipement est composé d'une station de surface, d'un hydrophone, d'un boîtier portable pour le plongeur et d'un masque facial équipé d'écouteurs et de micros



Une station surface munie d'un hydrophone

Système de communication plongeur/surface AQUACOM de RCH système [Descamp et *al.* 2010]



Un émetteur-récepteur à la ceinture du plongeur



Un masque facial équipé d'écouteurs et d'un micro

Paramètres de la méthode
Il sont liés :
- au positionnement du plongeur et à sa performance en terme de déplacement ;
- à sa capacité à mémoriser et à géoréférencer l'information observée en plongée.

Vidéo sous-marine

Fiche Méthode VT : Vidéo sous-marine

La vidéo sous-marine est plus particulièrement utilisée pour des "vérités-terrain" lorsque de larges zones d'études sont à couvrir, ce qui permet, en outre, de limiter les investigations en plongée et de qualifier précisément les zones d'incertitude dans l'interprétation des sonogrammes. Lors des campagnes d'acquisition, les images sont visualisées à l'écran en temps réel, de façon à identifier et localiser les changements de faciès et tout autre élément caractéristique des fonds. Suite aux opérations maritimes, les images sont revisualisées et commentées pour obtenir une restitution cartographique par SIG de chacun des trajets réalisés.

Exemple de système de vidéo sous-marine tractée
Dans le cadre des études sur l'environnement sous-marin en zone côtière (en limite du plateau continental), le Laboratoire Environnement et Ressource Provence Azur Corse (LER/PAC) du Centre Ifremer de Méditerranée a en particulier développé, en collaboration avec la région PACA, un système vidéo léger d'observation des biocénoses par engin remorqué (MOBIDIC).





Système MOBIDIC HD (Module d'Observation des Biocénoses par Imagerie Digitalisée pour le Côtier à Haute Définition), mis au point par l'IFREMER : Châssis support de caméra & Régie surface @Ifremer

Ce dispositif se compose d'un caméscope numérique haute définition de marque Sony, modèle HDR HC1, placé à l'intérieur d'un caisson cylindrique transparent et étanche clos par un hublot sphérique permettant une vision grand angle, pouvant résister aux pressions rencontrées à grande profondeur. Un altimètre, placé dans l'enceinte du boîtier, permet de situer la position du dispositif par rapport au fond. Le système MOBIDIC HD est tracté derrière le bateau par un câble électro-porteur d'une longueur d'environ 30 m (100 m en eaux plus profondes).
La précision du géoréférencement de l'information fournie par le système vidéo tracté MOBIDIC est de 5 m à 1.5 nœuds (précision du GPS en point fixe). La récurrence des acquisitions est de 1 par seconde. La vitesse d'acquisition est de 1.5 nœuds, et compte tenu du mode opératoire, ce système permet de couvrir un linéaire de 5 à 10 km/jour.

Paramètres de la méthode
Ils sont liés au positionnement de la caméra, et à la capacité du système à associer les images prises à une heure donnée à leur position correspondante.

III . Méthodes locales de suivi : surfaciques et linéaires

Ce paragraphe présente les principales méthodes locales de suivis surfaciques et linéaires.

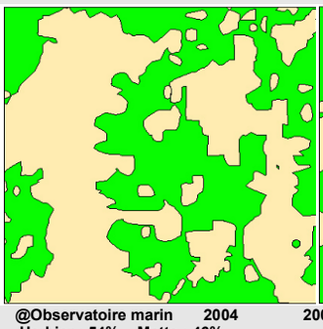
1. Carré permanent

Fiche Méthode : Carré permanent

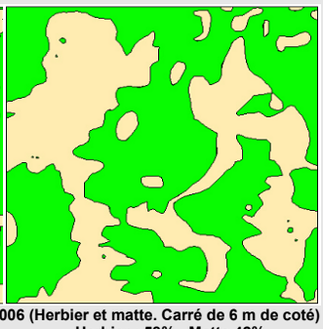
Comment ça marche ? Extrait de [Boudouresque *et al.* 2006]
Afin d'étudier la dynamique de ces herbiers dans le temps, en intégrant la notion de recouvrement ou de surface colonisée, la méthode du carré permanent délimite une zone de surface connue dans laquelle la mosaïque de posidonies est étudiée afin de mettre en évidence une progression ou une régression de l'herbier. Les carrés permanents sont disposés sur une zone représentative de l'herbier, dite zone de référence. Ils sont matérialisés par un balisage pérenne de 8 balises formant des carrés de 4 m x 4 m à 10 m x 10 m.



Plongeur effectuant des mesures @Adena [Blouet *et al.* 2011]



@Observatoire marin 2004
Herbier : 54% - Matte : 46%



2006 (Herbier et matte. Carré de 6 m de coté)
Herbier : 58% - Matte 42%

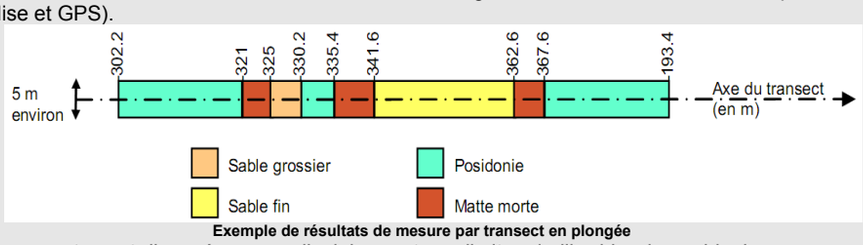
Paramètres de la méthode : Lors des suivis cartographiques en plongée, le carré permanent est divisé par des cordes en carrés de 1 m^2. Ces cordes sont retirées à l'issue de la cartographie. Dans chacun de ces petits carrés, les peuplements et types de fond (les mêmes que le long des transects permanents) sont cartographiés à 20 cm près ; la précision réelle, compte tenu de l'erreur possible sur le positionnement des cordes mises en place lors de chaque suivi cartographique, ne dépasse pas 40 cm [Boudouresque *et al.* 2006].

Méthode	Précision	Résolution	Couverture	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût
Carré permanent	5 à 15 m (GPS standard) 1 à 5 m (DGPS)	0.2 m [Ramoge]	16 à 100 m^2	Oui, mesure à la demande	4 à 6 plongées

2. Transect permanent & Line intercept

Fiche Méthode : Transect permanent

Comment ça marche ? Extrait de [InterregIIIB Posidonia 2007 - c]
Initialement mise au point pour l'étude de la végétation littorale terrestre, la méthode du transect permanent a été adaptée avec succès au milieu marin. Elle consiste à dérouler des rubans gradués sur le fond, entre deux points fixes positionnés précisément (Balise et GPS).



Exemple de résultats de mesure par transect en plongée

Ces transects permanents sont disposés perpendiculairement aux limites de l'herbier de posidonies, ou perpendiculairement aux isobathes. Ils sont longs de quelques dizaines ou de quelques centaines de mètres. Ils sont matérialisés sur le fond de façon permanente par des balises.
Les axes, ainsi matérialisés, sont parcourus en plongée, et les peuplements et types de fond sont identifiés sur 2,5 m environ, de part et d'autre du ruban gradué. A chaque modification de la végétation, la nature du peuplement, le type de substrat et la bathymétrie sont relevés. L'estimation de l'état de vitalité de l'herbier de posidonies fait appel à plusieurs paramètres standardisés, parmi lesquels, le recouvrement et la densité peuvent faire l'objet d'une représentation cartographique.

Paramètres de la méthode
Les limites entre peuplements et types de fond sont relevées à 20 cm près, mais la résolution effective ne dépasse pas 50 cm, en raison du degré d'imprécision du positionnement du ruban gradué [Gravez *et al.* 1995].

Remarque : Une méthode de type " line intercept " peut être utilisée pour déterminer le degré de morcellement de l'herbier. Elle consiste à dérouler en plongée, en ligne droite, de manière aléatoire, un ruban gradué de 10 m de long puis à dénombrer et mesurer la taille des intermattes traversées par le ruban [Ganteaume *et al.* 2005].

Méthode	Précision	Résolution	Couverture par jour	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût
Transect permanent	5 à 15 m (GPS standard) 1 à 5 m (DGPS)	0.5 m [Ramoge]	2.5 m X Longueur	Oui, mesure à la demande	2 plongées

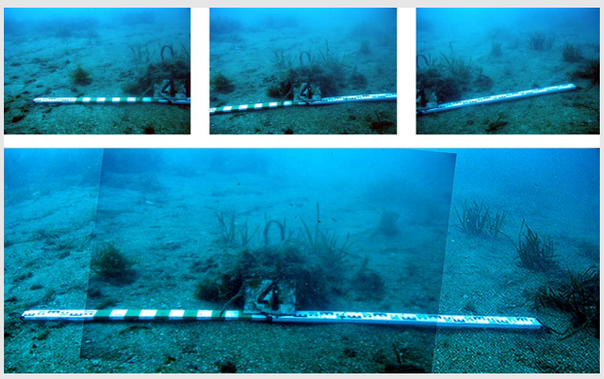
3. Suivi d'une limite par balisages multi-points (RSP)

Fiche Méthode : Suivi d'une limite par balisage (RSP)

Comment ça marche ?

La méthode par balises RSP, appelée ainsi puisque utilisée dans le cadre du Réseau de Suivi Posidonies en PACA, initialement mise au point par [Meinesz 1977], consiste à mettre en place des repères fixes sur le fond, au contact de l'herbier dont la limite doit être suivie. Un balisage est ainsi constitué d'une douzaine de balises de géomètre placées à la limite de l'herbier (une balise tous les 5 m environ) ou à sa limite supérieure (tous les 5 à 15 m). Un flotteur est placé au-dessus de chaque balise, afin de rendre plus facile sa localisation en plongée lors d'un retour ultérieur. Un piquet-photo de 0.5 m de haut est placé à 1.5 m en aval de chaque balise, face à la limite de l'herbier [Boudouresque *et al.* 2006].





Installation d'une balise FENO @Adena [Blouet *et al.* 2011] **Exemple de 3 photos prises par balise et assemblage @RSP Paca 2004 (Giens)**

Extrait [Boudouresque *et al.* 2006] Lors du premier suivi photographique et des suivis ultérieurs, 3 photographies (une décentrée à gauche, une centrée, une décentrée à droite) sont prises de chaque balise et de l'herbier qui l'entoure, ainsi que d'une échelle graduée placée devant la balise. Le suivi des balisages est destiné à mettre en évidence la stabilité, la progression ou la régression de l'herbier, au niveau de chaque balise. Les changements sont mesurés (au centimètre près). Lorsque des groupes de faisceaux (taches) sont bien individualisés, à proximité immédiate des balises, les faisceaux sont dénombrés dans ces taches. Le recul de la limite de l'herbier peut être relativement rapide, de telle sorte qu'une balise peut se trouver à plusieurs mètres de la nouvelle limite. Les photographies deviennent alors difficilement interprétables et la précision de la mesure in situ de la distance entre l'herbier et la balise diminue. Dans ce cas, une nouvelle balise doit être installée au niveau de la nouvelle position de la limite.

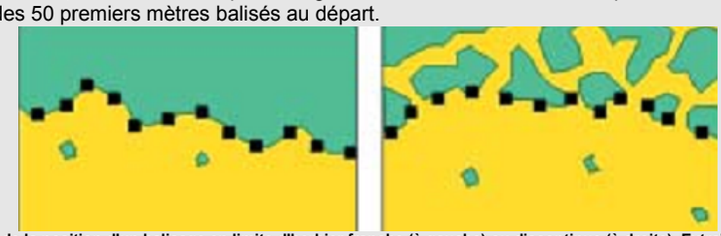
Cette méthode a été mise en œuvre dans le cadre du Réseau de Surveillance Posidonies en Région PACA (RSP PACA) de 1984 à 2004. En sus de la mesure du déplacement de la limite de l'herbier des mesures ponctuelles ont été réalisées au niveau de chacune des balises.
La technique classique de prises de vues horizontales peut être complétée par une mosaïque de prises de vues verticales de la limite inférieure de l'herbier entre les balises. Cette technique a été développée en Corse pour le Réseau de Surveillance Posidonies.

Paramètres de la méthode

Le nombre de balises mises en place pour un suivi de limite est en général de 12, correspondant à un linéaire d'environ 50 m. Compte tenu des règles de sécurité et de la règlementation en vigueur chaque équipe doit être composée d'au moins deux plongeurs ; au-delà de 30 m de profondeur les plongeurs ne doivent effectuer qu'une plongée par jour. La mise en place d'un balisage nécessitant plusieurs étapes : repérage de la limite, descente et positionnement des balises, fixation des balises et des piquets photos, prises de vues, (prélèvements et mesures scientifiques selon protocole), le nombre de plongées nécessaire à ces opérations est de l'ordre de 4 à 6 plongées.

Limitations de la méthode

La méthode est dépendante du choix initial de la position des balises par rapport à la limite. Ce choix est délicat lorsque celle-ci n'est pas franche, ou encore lorsque la régression est forte ensuite. De plus cette méthode présente un biais résultant du choix des 50 premiers mètres balisés au départ.



Importance du choix de la position d'un balisage en limite d'herbier franche (à gauche) ou discontinue (à droite). Extrait de [Boudouresque *et al.* 2006]

L'usage de cette méthode pose le problème de sa pérennité liée à la perte possible des balises (sensibles au chalutage, aux mouvements sédimentaires, au type de substrat (permettant ou non un bon ancrage) et du coût de l'entretien des balises.

Méthode	Précision	Résolution	Couverture	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût
Balisage multi-points	5 à 15 m (GPS standard) 1 à 5 m (DGPS)	cm [Ramoge]	Linéaire de 50 m environ	Oui si balise pérenne	4 à 6 plongées

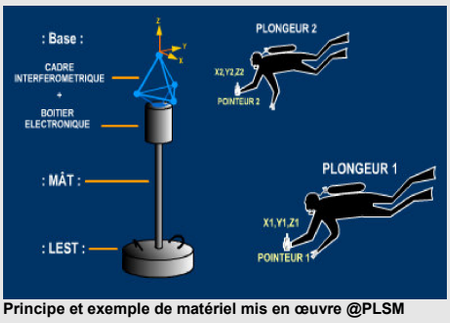
4. Télémétrie acoustique : observation d'un linéaire et micro-cartographie

Fiche Méthode : Suivi d'une limite & Micro-cartographie par télémétrie acoustique

La télémétrie acoustique est la mesure dune distance à l'aide du son. Elle est basée sur la mise en œuvre d'un positionneur acoustique permettant le positionnement centimétrique d'objets situés à plusieurs dizaines de mètres d'une antenne immergée. C'est une méthode alternative au balisage classique qui permet de multiplier facilement le nombre de points cartographiés, tout en évitant la pose de nombreuses balises.

Comment ça marche ?
Le positionneur acoustique est composé :
- d'**une base de mesure, dite base courte** et composée de 3 récepteurs acoustiques, (constituant l'origine du repère cartésien de mesure), montée à l'extrémité d'un mât d'environ 2 m de haut. Cette base est installée au début de la campagne de mesure et reste en place durant celle-ci.

- d'**un système de mesure mobile piloté par un plongeur**. Ce système est constitué d'un pointeur mobile et de son mât, permettant un dégagement du pointeur par rapport au fond, afin d'éviter les problèmes de réflexions et/ou masquages des ondes acoustiques. Léger et portable, le pointeur est muni d'un mini clavier et d'un écran à cristaux liquide, permettant au plongeur de pointer les limites de l'herbier à positionner et de les stocker en mémoire (la capacité mémoire du pointeur est supérieure à 1500 points). Le pointeur a la capacité d'effectuer 10 relevés par point pour en faire une moyenne afin d'en augmenter la précision. La base accepte jusqu'à huit pointeurs (soit huit plongeurs) simultanément, permettant ainsi d'augmenter la rapidité des relevés de la limite inférieure de l'herbier [Descamp *et al*. 2009].



Principe et exemple de matériel mis en œuvre @PLSM



Aquametre D100 @Andromède Océanologie


@E. Chéré ADENA

A chaque point de mesure le plongeur déclenche le pointeur mobile, qui envoie un signal à la base. Celle-ci est alors capable de positionner le pointeur mobile dans son référentiel, et la distance « Base-pointeur mobile » est calculée par le système.

Variante de type base longue : Système GIB @ACSA [InterregIIIB Posidonia 2007 - c]
Le système utilisé dans le cadre du programme INTERREGIIIB / POSIDONIA par l'ENEA est le GIB (GPS Intelligent Buoy), produit par ACSA Underwater GPS (France). Le GIB se compose de quatre bouées avec hydrophones et GPS et d'un émetteur acoustique sous-marin (pinger). Le système est comparable à un système "base longue" de surface. Les bouées mesurent les temps d'arrivée d'un signal acoustique dont l'émission est synchrone avec la prise de la position GPS. Les instants d'arrivée des signaux acoustiques sont datés avec une précision de 0.1 ms. Connaissant l'instant d'émission de ces signaux et la vitesse de propagation du son dans l'eau, on peut en déduire directement les distances entre le pinger et les 4 bouées. La profondeur est donnée par un capteur de pression. Le pinger envoie un deuxième signal avec un retard proportionnel à l'immersion. Ces distances sont ensuite ramenées au plan horizontal. Le point mesuré se trouve à l'intersection de cercles centrés sur les bouées (méthode des moindres carrés). Pour optimiser les opérations de cartographie de l'herbier le pinger peut être fixé sur un scooter sous-marin conduit par un plongeur. La distance maximale du pinger par rapport au centre du polygone formé par les 4 bouées peut alors être de 1500 m environ [Bechaz & Boucquaert 2006].

Paramètres de la méthode de mesure d'un linéaire
La stratégie de pointage doit être adaptée à la configuration de l'herbier et de sa limite. En cas de limite franche, il est aisé de suivre la base des rhizomes sur un linéaire (herbier continu) ou en balisant toutes les taches d'herbier présentes sur une surface (herbier en tache).
La résolution de la méthode est de 0.05 à 0.5 m ; sa précision est liée aux géoréférencements du plongeur et de la base.

Autre application : approche surfacique : Micro-cartographie par télémétrie acoustique
Cette méthode permet de réaliser des cartographies très précises sur des petites zones. Elle constitue une alternative au transect permanent et carrés permanent et au balisage des limites pour lequel elle permet de s'affranchir du biais lié au choix des 50 m premiers mètres balisés et à l'instabilité en cas de limite non franche. Elle réduit considérablement le problème de la pérennité lié à la perte de la balise par la possibilité de géoréférencer un point ou plusieurs points caractéristiques au fond et peut s'appliquer sur les balises précédemment mises en place (avec la méthode des balises multi-points RSP) afin d'assurer une continuité par rapport aux suivis antérieurs ou dans le cas où il n'y a pas de repère naturel fixe au fond.
Le suivi des herbiers de posidonie par télémétrie acoustique produit des microcartographies précises, réplicables et aisées d'interprétation. Ceci explique sans doute que les gestionnaires en fassent une utilisation de plus en plus répandue, même en l'absence de réseau établi, puisque des balisages sont d'ores et déjà en place à Monaco, Port Cros, Saint-Raphaël, Littoral des maures, Rade de Toulon, La Ciotat, Antibes, Marseille, Golfe d'Aigues-Mortes, Agde, Banyuls soit au total 22 sites répartis sur le littoral français [Descamp *et al*. 2009].

Méthode	Précision	Résolution	Couverture par jour	Reproductibilité (date acquisition & opérateur)	Coût / jour
Télémétrie acoustique	5 à 15 m (GPS standard) 1 à 5 m (DGPS)	0.05 à 0.5 m (constructeur)	100 m X 100 m	Oui, mesure à la demande	# 6000 €

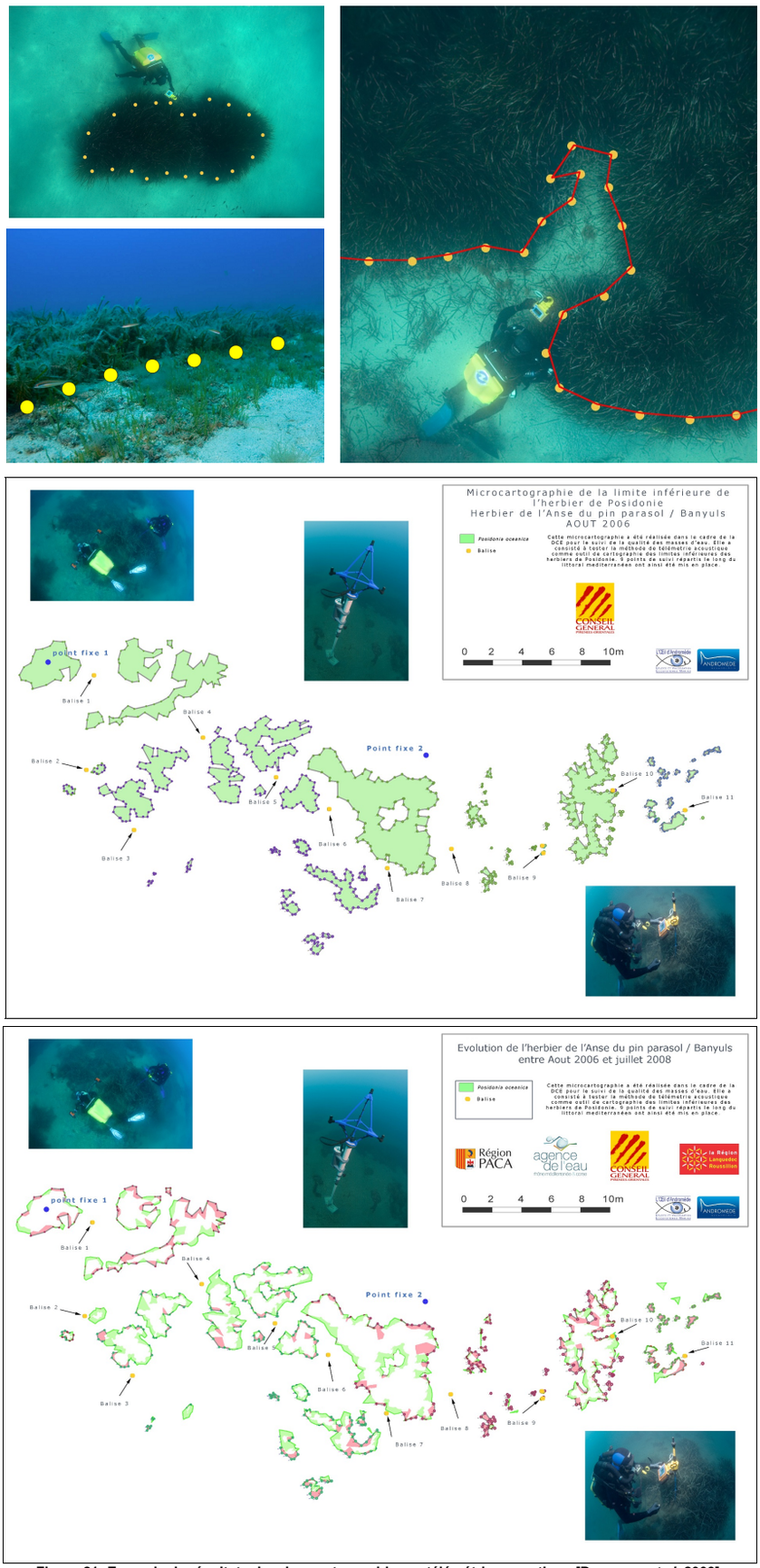


Figure 21: Exemple de résultats de microcartographie par télémétrie acoustique [Descamp *et al.* 2009]
La mise en place d'un balisage par télémétrie acoustique, comme la réalisation d'un point de suivi peut être réalisée en une journée.

IV . MÉTHODES PONCTUELLES D'OBSERVATION ET DE SUIVI

Ce paragraphe décrit les méthodes d'observations des principaux paramètres de la vitalité de l'herbier.

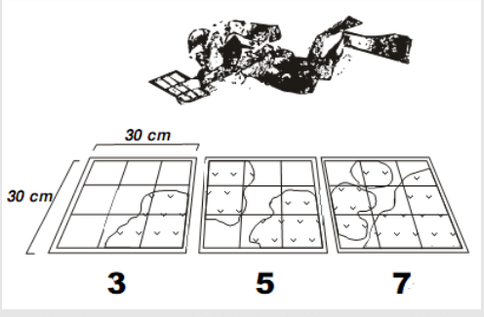
1. Recouvrement

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Recouvrement

Le recouvrement est le pourcentage moyen du substrat couvert (en projection verticale) par l'herbier de posidonies (quelle que soit la densité des faisceaux au sein de l'herbier ou des taches de posidonies), par rapport à la surface totale du secteur considéré (sable, vase, peuplements algaux de substrat dur, "matte morte" et herbier vivant). Dans les herbiers peu profonds et sains, le recouvrement peut être élevé (80 -100%). Au contraire, dans les herbiers soumis à un fort impact humain, le recouvrement est habituellement faible (entre 5 et 40%). Extrait [Boudouresque *et al.* 2006]

Mesure : effectuée par plongeur **Grille d'interprétation**

Le recouvrement est mesuré au moyen d'une plaque en plastique translucide de 30 cm x 30 cm, divisée en 9 carrés de 10 cm de côté. Le plongeur nage à 3 m au-dessus du fond en tenant la plaque à l'extrémité de ses bras et compte le nombre de carrés occupés (plus ou moins complètement) par les posidonies. Il effectue 30 mesures, à intervalle à peu près régulier (par exemple un même nombre de coups de palmes). La reproductibilité est bonne.



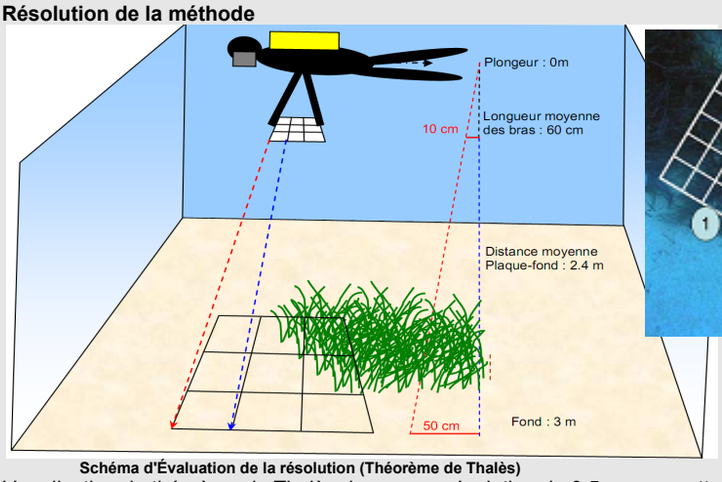
[Boudouresque *et al.* 2006] d'après [Gravez *et al.* 1995]

RECOUVREMENT (%)	INTERPRETATION
> 80 %	Très fort recouvrement
60 % ≤ valeur ≤ 80 %	Fort recouvrement
40 % ≤ valeur ≤ 60 %	Recouvrement moyen
20 % ≤ valeur ≤ 40 %	Faible recouvrement
< 20 %	Très faible recouvrement

[Charbonnel *et al.* 2000]

Mesure du recouvrement de l'herbier à *Posidonia oceanica* par un plongeur nageant à 3m au-dessus du fond et tenant une plaque de plastique translucide (en haut). Trois exemples de comptage du nombre de carrés occupés (plus ou moins complètement) par l'herbier (en bas).

Résolution de la méthode



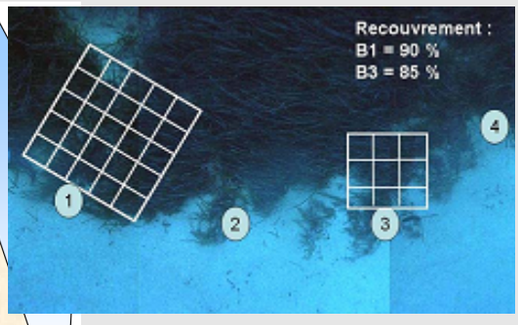


Schéma d'Évaluation de la résolution (Théorème de Thalès) **@[Pergent 2007]**

L'application du théorème de Thalès donne une résolution de 0.5 m pour cette méthode.

Paramètres de la méthode

Il sont liés au plongeur: géoréférencement de ce dernier, orientation de ses bras, de la plaque et de sa vision, choix du lieu...

Méthodes	Détermination de « Présence /absence »
Relevé direct	Estimation visuelle par le plongeur. Utilisation de carrés subdivisés en sous-carrés *Rq : problème de la localisation de la mesure → information liée au point d'observation*
Relevé indirect	Estimation du recouvrement à travers l'analyse de photographies ou l'analyse d'imagerie sonar de coque. *Mesure bien géoréférencée. Permet une cartographie du recouvrement.*

Méthode	**Précision**	**Résolution**	**Couverture**	**Reproductibilité (date acquisition & opérateur)**	**Coût /km²**
Par plongeur	**2 à 15 m**	**0.5 m**	**30 mesures/plongée**	**Dépend du plongeur**	**-**
Image aérienne (typt)	0.5 m	10 à 50 cm	Typt qq km²	Oui si Campagne spécifique	0 à 1000 €
Sonar latéral tracté 450 kHz	2 à 15 m	0.15 à 0.5 m	4 à 8 km² par jour	Oui, mesure à la demande	# 1250€
Monitoring RTK 250 kHz	0.5 à 1 m	0.5 à 1 m	4 à 8 km² par jour	Oui, mesure à la demande	# 1200 €
Monitoring RTK HR 250/900 kHz	0.5 à 5 m	0.1 à 0.3 m	2 à 3 km² par jour	Oui, mesure à la demande	# 2000 €

2. Densité

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Densité

La densité des faisceaux est le nombre de faisceaux vivants de posidonies par unité de surface. Seules les zones effectivement couvertes par l'herbier (à l'exclusion donc des intermattes) sont prises en considération pour la mesure de cette densité.

Mesure de la densité

Les mesures se font par comptage, en plongée, dans des quadrats de 20 x 20 cm, disposés au hasard [Panayotidis *et al.*, 1981], avec au moins 30 répliques par site, afin de disposer d'éléments suffisants pour les analyses statistiques (loi de poisson). Pour le RSP le nombre de mesures est de 3 par balise. Des quadrats de plus grande taille (40x40cm, par exemple) sont parfois utilisés, mais ils accroissent l'erreur possible sur la mesure ; pour un même effort d'échantillonnage (temps passé en plongée), il est préférable d'utiliser de petits quadrats, qui permettent d'accroître le nombre de répliques.
Il est typiquement recommandé d'utiliser des quadrats de taille 20 x 20 cm en limite inférieure et de taille 40 x 40 cm en limite supérieure.



@Mathieu Foulquié
Mesure de la densité, avec un quadrat de 20 x 20 cm par l'Adena
Site Natura 2000 « Posidonies de la Côte palavasienne »
A l'intérieur d'un carré métallique disposé au fond.

Classification de l'herbier en fonction de la profondeur (Prof., en mètres).
[Pergent *et al.* 1995]
DA = densité anormale,
DSI = densité sub normale inférieure,
DN = densité normale,
DSS = densité sub normale supérieure.

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	→

[Pergent *et al.* 1995] et [Pergent-Martini *et al.* 1996] ont proposé une classification qui met en relation la densité des touffes avec la profondeur, trouvant ainsi quatre types de densité. Il est important de noter que la profondeur explique 54% de la variabilité de la densité des faisceaux : celle-ci diminue naturellement avec la profondeur. Par ailleurs, la variabilité de la densité des faisceaux est considérable, à courte et moyenne distance, au sein d'un herbier, de telle sorte que l'interprétation de ce paramètre est très délicate et nécessite la plus grande prudence. [Pergent 2007] a proposé une grille plus récente avec 5 codes couleur. Il s'agit de la dernière grille validée à l'échelle méditerranéenne par le CAR-ASP.

En l'état actuel, il est difficile d'établir une grille de lecture lisible, valable par éco-région. Les scientifiques s'accordent à dire, compte tenu des connaissances acquises, que cette grille a encore besoin d'être révisée en fonctions des données en cours d'acquisition dans les différents programmes de suivi et dans les différentes éco-régions.

Notons alors, qu'il reste intéressant d'enregistrer une donnée de densité dite de départ pour classifier l'herbier, et de noter ensuite l'évolution de la densité au cours du temps, donc une analyse en relatif, à partir d'une valeur de départ, sans forcément de classement absolu.

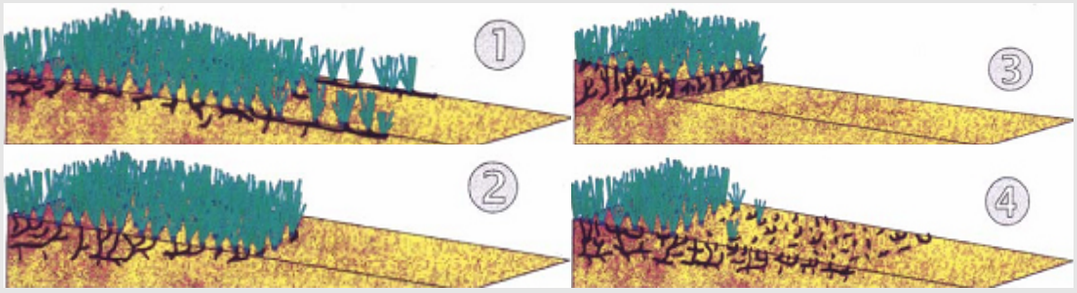
Paramètres de la méthode

Répétition de la mesure et du moyennage effectué.
Dépend du choix de l'opérateur et lié au point d'observation. Celui-ci peut être ou non balisé.
Sujette aux variations saisonnières.

3. Type et profondeur de limite

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Type et profondeur de limite

Il existe différents types de limite : progressive, franche, érosive, régressive. En cas de limite régressive, l'étendue de matte morte située en aval de la limite actuelle d'herbier est mesurée (mesure linéaire et profondeur).



Types de limites (d'après [Meinez & Laurent 1978] modifié par Boudouresque redessiné par Palluy)
1 : Limite progressive – 2 : Limite franche – 3 : Limite érosive – 4 : Limite régressive

En limite supérieure d'herbier, on rencontre en plus de ces 4 types de limites, une « limite morcelée ». Sous l'influence d'un déséquilibre du milieu, la limite supérieure de l'herbier, généralement franche, va se morceler. Selon l'importance du déséquilibre (rejets, aménagements, mouillages, dessalure, etc.), le morcellement de la limite de l'herbier sera d'abord visible sous formes d'ondulations puis d'invaginations de son rebord et enfin d'un véritable fractionnement en taches et îlots de posidonies dont les tailles diminueront progressivement selon le gradient de proximité de la nuisance, pour aboutir à de petites touffes et groupes de faisceaux isolés [Charbonnel *et al.*, 2000].
Sauf lorsqu'elle est érodée, la profondeur de la limite inférieure est corrélée à la transparence de l'eau.

Paramètres de la méthode
Les typologies étant définies, l'observation et la mesure de la profondeur de la limite sont effectuées par plongeur et dépendent des lieux sélectionnés par celui-ci.

4. Phénologie (ou biométrie)

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Phénologie

Les analyses phénologiques étudient divers paramètres utiles pour décrire l'état des plantes [Ifremer 2007 b] [Boudouresque *et al*. 2006] :
- Informations sur le développement végétatif de la plante : Mesure sur une vingtaine de faisceaux par station (DCE)
  - **Longueur des feuilles adultes** (dont la croissance est terminée) :
    - o Longueur de la première (F1) et la deuxième (F2) plus longue feuille du faisceau.
    - o Longueur moyenne des feuilles (Lg).
  - **Nombre moyen de feuilles par faisceau**
  - **Surface foliaire** moyenne par faisceau (exprimée en cm^2) :

SF = (Σ des longueurs des feuilles intermédiaires x moyenne des largeurs des feuilles Intermédiaires)
+ (Σ des longueurs des feuilles adultes x moyenne des largeurs des feuilles adultes)

  - **Leaf Area Index** (LAI : index de superficie foliaire), superficie de feuilles par m^2

- Informations sur la pression d'herbivorie (marques de broutage) ou sur l'hydrodynamisme (cassure des feuilles)
  - **Coefficient « A »** : pourcentage de feuilles sans apex (extrémité supérieure).

Paramètres de la méthode
Du fait des variations saisonnières, les comparaisons doivent se faire pour une même saison.
Ces méthodes de mesure ayant fait l'objet de protocoles précis, les résultats obtenus dépendent du choix du lieu des observations et prélèvements. Ce choix est effectué par le plongeur.

5. Lépidochronologie

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Lépidochronologie

L'analyse lépidochronologique s'apparente à la dendrochronologie dans le domaine terrestre. Elle consiste en l'étude des cycles de vie des feuilles de posidonies. Une fois morte, la feuille se détache du rhizome à sa base ; ces feuilles s'accumulant ont des variables qui changent selon des cycles annuels [Boudouresque *et al*. 2006]. On peut :
- estimer la biomasse produite par année, soit en termes de l'allongement des rhizomes, soit en production de feuilles.
- estimer la production des fleurs et le nombre de reproductions.
- mesurer la concentration de métaux lourds dans les tissus de la plante.

La mesure est effectuée sur une vingtaine de faisceaux par station.

Paramètres de la méthode
L'analyse étant standardisée, les résultats sont uniquement liés au choix du point de prélèvement par le plongeur.

6. Déchaussement des rhizomes

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Déchaussement des rhizomes

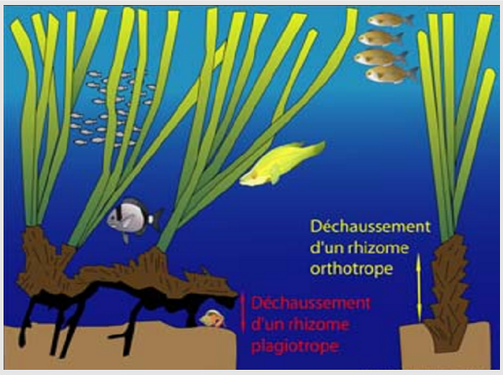
Les rhizomes de posidonie sont caractérisés par une croissance horizontale (rhizomes plagiotropes) et/ou verticale (rhizomes orthotropes). La croissance verticale est à l'origine de l'édification des mattes et permet à la plante de lutter contre l'enfouissement, lié à la sédimentation. Le déchaussement des rhizomes résulte d'un déficit sédimentaire dans l'herbier : la quantité de sédiment piégé par la canopée (ensemble des feuilles) et le sédiment biogénique produit in situ (restes d'organismes calcifiés ayant vécu dans l'herbier : coquilles de mollusques, tests et épines d'oursins, algues calcaires, etc.) est inférieure à la quantité de sédiment qui quitte l'herbier, par exemple lors des tempêtes.

D'après [Boudouresque *et al.* 2006]

Mesure du déchaussement

Par convention, le déchaussement est mesuré comme schématisé ci-contre [Boudouresque *et al.*, 1980] :

(i) Rhizomes plagiotropes (rampants): c'est la distance entre le niveau du sédiment ("sol") et la partie inférieure des rhizomes.
(ii) Rhizomes orthotropes (dressés): c'est la distance entre le sédiment et la base de la feuille la plus externe, diminuée de 2 cm.



Conventions pour la mesure du déchaussement des rhizomes plagiotropes (à gauche) et orthotropes (à droite). D'après [Boudouresque *et al.* 1980] [Pergent 2007]

Paramètres de la méthode
Le déchaussement est mesuré au cm près.
La mesure du déchaussement étant conventionnée, les résultats sont uniquement liés au choix du point de mesure par le plongeur ou au calcul des valeurs moyennes si plusieurs points de mesure sont effectués.

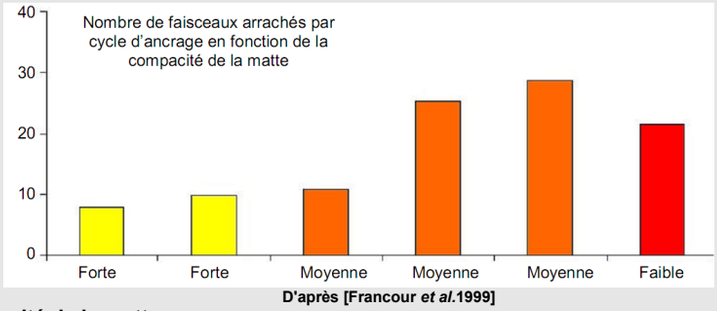
Une échelle d'évaluation du déchaussement (faible, moyen, important) est proposée en fonction des valeurs moyennes mesurées le long des balisages (5 mesures par station) :

Déchaussement inférieur à 5 cm : Faible // Déchaussement entre 5 et 15 cm : Moyen // Déchaussement supérieur à 15 cm : Important

7. Compacité de la matte

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Compacité de la matte

La compacité de la matte mesure la résistance de la matte à l'enfoncement d'un objet, par exemple une ancre. Une matte compacte est supposée moins vulnérable à l'arrachage des rhizomes et des faisceaux par les ancres qu'une matte peu compacte [Ganteaume *et al*. 2005]. L'utilisation de carottiers n'est pas raisonnable dans le cas de programme de suivi en raison des difficultés de mise en œuvre et des coûts inhérents.



D'après [Francour *et al.*1999]

Mesure de la compacité de la matte
Pour estimer la compacité, on utilise la méthode définie par [Francour *et al.*1999] et [Poulain 1986]. Le dispositif similaire à un pénétromètre, consiste à mesurer la distance d'enfoncement d'une tige en acier (2 m de long, 8 mm de diamètre) dans la matte sous l'effet d'un poids de 5 kg lâché à 50 cm au dessus du sommet de la tige.
La mesure s'effectue en plongée.
La grille d'interprétation est la suivante (moyenne sur 10 mesures) :

Distance d'enfoncement de la tige	Interprétation
Inférieure à 50 cm	Matte très compacte
Entre 50 cm et 1 m	Matte moyennement compacte
Supérieure à 100 cm	Matte faiblement compacte

Paramètres de la méthode
La mesure de la compacité étant standardisée, les résultats sont liés au choix du point de mesure par le plongeur.

8. Nature du substrat. Granulométrie

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Granulométrie du sédiment

La nature du substrat (sable grossier, sable fin, sable vaseux, matte morte ...) et la présence de ripple-marks, peut apporter des informations sur les conditions hydrodynamiques du site.
La granulométrie (taille des grains du sédiment et distribution en classes de taille) est indicative de l'hydrodynamisme. Le bilan sédimentaire peut rendre compte de certaines régressions d'herbiers de posidonies. En effet, quand le bilan annuel dépasse 6-7cm, la croissance des points végétatifs des rhizomes orthotropes est insuffisante pour compenser la sédimentation, et les points végétatifs meurent.

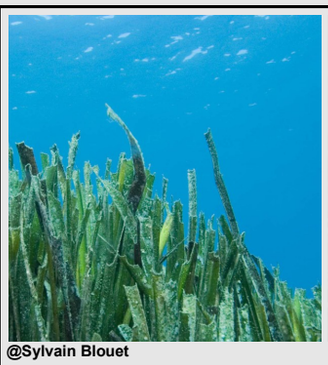
Mesure de la granulométrie
La mesure de la granulométrie s'effectue après prélèvement de sédiment par plongeur ou benne, et par analyse granulométrique (taille des grains du sédiment et distribution en classes de taille).

Paramètres de la méthode
La mesure de la granulométrie étant fiable, les résultats sont liés au choix du point de prélèvement par le plongeur ou la benne. Une mesure par secteur homogène bordant l'herbier de posidonies est préconisée.

9. Biomasse des épiphytes

Fiche Méthode Vitalité/Environnement : Biomasse des épiphytes

Les feuilles de posidonies constituent un substrat pour des épiphytes (organismes vivant sur les plantes). Leur biomasse présente un cycle saisonnier, avec un maximum de mars à septembre. Cette biomasse est particulièrement élevée dans les sites où l'apport en nutriments et/ou en matière organique est important. La biomasse des épiphytes constitue donc un indicateur de la qualité des eaux et permet de mesurer l'impact des rejets d'eaux usées, des fermes aquacoles et des ports de plaisance.



@Sylvain Blouet



@Marc Filippi

Feuilles de posidonies : observations des épiphytes (organismes vivants sur les plantes) et du broutage.

Mesure de la biomasse des épiphytes
Un grattage à l'aide d'une lame de rasoir est réalisé sur les deux côtés de chacune des feuilles afin d'extraire l'ensemble de la charge en épiphytes. L'ensemble des feuilles et l'ensemble des épiphytes d'un même faisceau sont mis à sécher séparément à 70°C pendant 48 h puis pesés (mg).

Le ratio épiphytes/feuilles est calculé par faisceau [Ifremer 2007 b] :

$$E / L_{faisceau} = \frac{\text{poids sec des épiphytes}}{\text{poids sec des feuilles}}$$

Le calcul de E/L est réalisé à partir de 20 rhizomes (a minima).



@Ifremer [Ifremer 2007 b]



Mesure au laboratoire des paramètres de biométrie foliaire
Prélèvement de rhizomes orthotropes par plongeurs en limite inférieure

Paramètres de la méthode
En raison des variations saisonnières et bathymétriques de la biomasse des épiphytes, les comparaisons doivent concerner la même saison et la même profondeur. Par ailleurs, le broutage est susceptible de diminuer la biomasse des épiphytes; en effet, les épiphytes sont particulièrement appréciés par les herbivores ; il en résulte que l'interprétation des données sur la biomasse des épiphytes est très complexe.

La mesure de la biomasse étant conventionnée, les résultats dépendent du choix du site, et de la sélection des feuilles prélevées qui sont effectués par le plongeur.

10. Protocoles de suivis ponctuels

Ce paragraphe définit succinctement les principaux protocoles de suivis ponctuels utilisés actuellement et dont l'intérêt pour un usage des pressions gérées par les gestionnaires va être évalué par la suite. Les principaux protocoles sont celui du RSP PACA, celui de la DCE, ainsi que le protocole scientifique complet. Nous y adjoignons pour une meilleure compréhension de la comparaison, un protocole dit « type » basé sur un seul paramètre, et des protocoles simplifiés adaptés à la gestion d'une pression en particulier.

Fiche Protocole : Protocole « Type »

Protocole dit « Type » basé uniquement sur la mesure du paramètre recouvrement.
Ce protocole n'est pas raisonnable dans la mesure où il n'apporte pas assez d'information pour conclure quoi que ce soit sur l'état de l'herbier.
Il a uniquement pour but d'aider à la compréhension des tableaux de synthèse d'évaluation des méthodes.

Fiche Protocole : Protocole DCE

Le protocole DCE consiste à réaliser un suivi stationnel des paramètres suivants :
3 paramètres à la profondeur de 15 m (Régions PACA, Corse et Banuyls) :

- la densité des faisceaux (nombre de faisceaux/m²) ,
- la surface foliaire par faisceau (cm²/faisceau) ,
- la charge épiphytaire (poids sec des épibiontes/poids sec des feuilles.

2 paramètres en limite inférieure :

- la profondeur (m),
- le type de limite (franche, progressive, régressive).

Il vise à recueillir des informations sur la santé de l'herbier de posidonies dans un objectif d'extrapolation à la qualité des eaux.

Fiche Protocole : Exemple de protocole préconisé dans ce cahier

Il s'agit de protocole simplifié recommandant la mesure de quelques paramètres adaptés au suivi de l'impact d'un pression en particulier.
Par exemple : « Recouvrement + Limites + Epiphytes » dans le cas du suivi de l'impact d'une ferme aquacole.

Fiche Protocole : Protocole type RSP Balisage et mesures en plongée

En 1984, suite à l'initiative de la Région PACA, a été créé le Réseau de Surveillance Posidonies (RSP) dont l'objectif était double :

- la surveillance à long terme de l'évolution de l'état des herbiers de posidonies en PACA,
- l'utilisation de l'herbier comme indicateur biologique de la qualité globale des eaux littorales.

Un protocole scientifique a été défini et mis en œuvre de 1984 à 2004, et amélioré au fur et à mesure de cette période. Il a consisté en un suivi scientifique en plongée de plusieurs descripteurs de la vitalité de l'herbier et des photographies des posidonies prises le long des balisages tous les 3 ans. L'acquisition de ces données avait pour but d'analyser et de préciser la dynamique de l'herbier, par comparaison avec les suivis précédents : régression, stabilité ou progression.

Au niveau de chaque balise (le lieu de la mesure est défini précisément par rapport à la balise) plusieurs paramètres de base sont pris en considération : [Charbonnel *et al.* 2000]

- La profondeur de la balise,
- Les orientations de balises à balises et de « piquets-photos » à balises,
- La densité de l'herbier,
- Le pourcentage de rhizomes plagiotropes,
- Le déchaussement ou l'ensablement des rhizomes,
- La nature du substrat,
- Le type de limite.

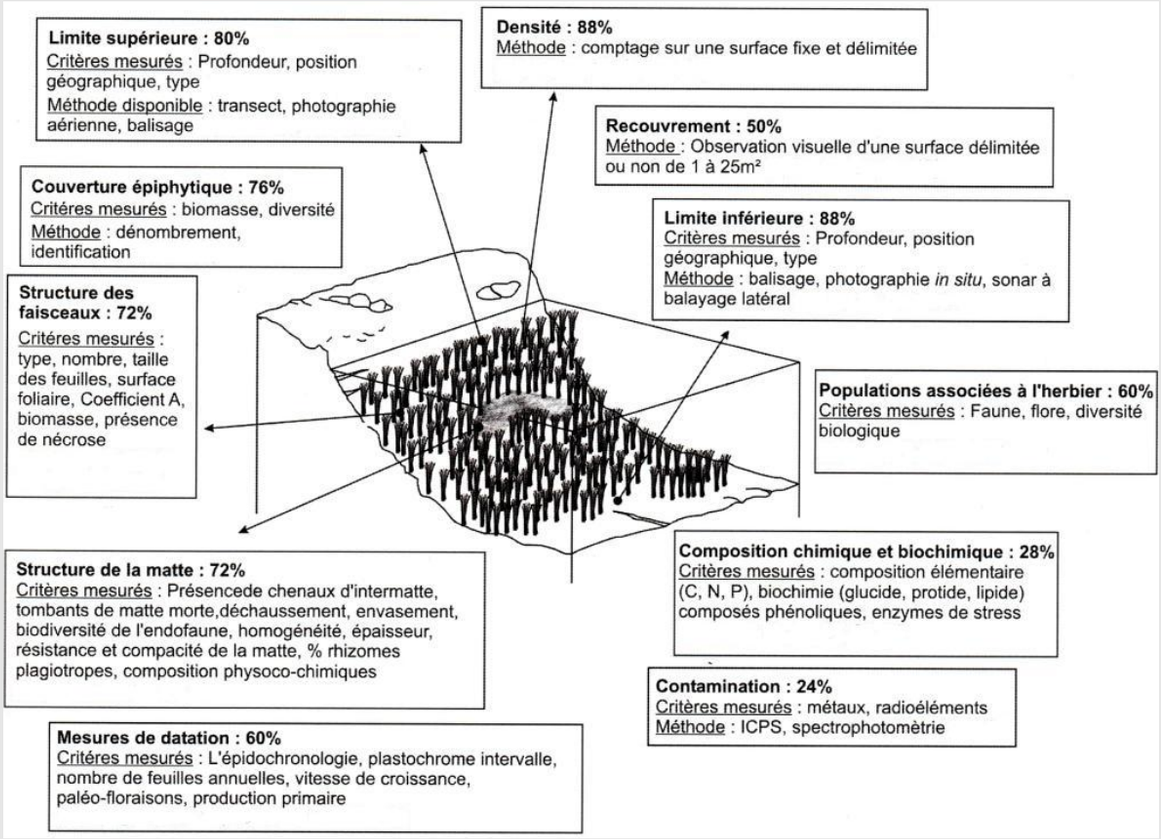
Ainsi que les paramètres complémentaires suivants :

- Le recouvrement de l'herbier,
- Étude de la phénologie,
- Étude de la lépidochronologie,
- Degré de morcellement de l'herbier,
- Granulométrie des sédiments.

Les balises sont situées en limites inférieures et supérieures de l'herbier.

Fiche Protocole : Liste des paramètres scientifiques

La liste des principaux descripteurs de la posidonies est donnée dans [Pergent-Martini *et al.* 2005].
Elle présente 17 paramètres étudiés par la communauté scientifique.



Paramètres utilisés pour appréhender l'état de santé d'un herbier de posidonies et pourcentage d'utilisation (25 institutions de recherche) . D'après [Pergent-Martini *et al* . 2005]

L'étude de tous ces paramètres n'est pas forcément utile pour le gestionnaire dans le cadre d'une étude ciblée, autour d'une pression bien identifiée.

V . Critères d'évaluation des méthodes de suivi

Ce chapitre explicite le principe de l'évaluation globale des performances des méthodes de suivi, surfaciques globales ou locales, linéaires ou ponctuelles, pour les différents paramètres et critères retenus. L'échelle d'évaluation des performances est basée sur quatre niveaux codés de vert (bon) à rouge (mauvais).
Au préalable on s'interroge sur la finalité de la donnée recueillie, sur son exploitabilité et sur sa capacité à servir le besoin de connaissance du gestionnaire.

1. Critère : « Export »

Le critère « Export » représente, dans notre méthode d'évaluation, la capacité des données à répondre aux objectifs de connaissance du gestionnaire. La donnée collectée peut être un jeu de paramètres prélevés sur des stations ponctuelles, ou un ensemble de données surfaciques.
Les questions que nous nous posons sont les suivantes :

Comment seront exploitées les données ponctuelles recueillies ?

Quel est l'intérêt des données surfaciques à présent accessibles en raison de l'avènement récent de nouvelles méthodes précises, résolvantes et abordables ?

Difficultés liées aux méthodes ponctuelles de mesure de la vitalité

Nous notons tout d'abord un certain nombre de difficultés liées aux méthodes ponctuelles de mesure de la vitalité, tant au niveau de l'acquisition des données, que pour leur usage final.
Ces difficultés sont synthétisées dans le tableau suivant :

Points clefs des méthodes ponctuelles	Source de non-répétivité — Difficulté
Lieu	**Choix du lieu** **Positionnement du lieu**
Prélèvement	**Sélection de l'échantillon**
Observations	**Observateur**
Méthode d'analyse de l'échantillon	**Fiable- Existence de protocole scientifique**
Grille de lecture	**Établissement d'une grille valable par éco-région**
Répétabilité de l'opération	**Géoréférencement du lieu** **Opérateur**
Intercalibration	**Intercalibration des méthodes** **Non-accord des différentes communautés scientifiques sur un protocole commun**
Analyse et synthèse	**Capacité de synthèse de la méthode** **Quelle tendance globale dégager avec une dizaine de points de mesures différents ?**

Synthèse des difficultés liées aux méthodes ponctuelles de suivi

Le problème des méthodes ponctuelles réside tout d'abord dans la dépendance de leur résultat avec l'opérateur, c'est-à-dire le plongeur.

- Pour les observations, les résultats sont impactés par le choix des lieux qui est effectué par le plongeur. Par exemple, pour la densité : où se placer dans le cas des herbiers du Languedoc Roussillon qui sont en mosaïque ? Dans le cas de l'usage des balises la précision est meilleure puisque le protocole définit le lieu de mesure de la densité par rapport à la balise, mais si celle-ci disparaît ou sort de l'herbier, qu'en est-il de la mesure ?
- D'autre part, les prélèvements sont dépendants du choix du lieu et ainsi que des échantillonnages. Par exemple pour les épiphytes, quelle feuille sélectionner ? Où exactement ? Quelle station de référence prendre ?

Les scientifiques ont défini des conventions de mesures, qui une fois le prélèvement effectué, donnent aux méthodes une bonne répétitivité. Par exemple la mesure des épiphytes est standardisée, et pour une même feuille les résultats sont semblables.

Ce qui est plus délicat pour les mesures ponctuelles c'est l'établissement d'une grille de lecture valable par éco-région. En ce qui concerne la densité par exemple, la difficulté de définir une grille de lecture commune à tous les herbiers de méditerranée est communément reconnue, puisque cela dépend de la lumière et donc de la profondeur et de la turbidité de l'eau.

Les difficultés rencontrées par la DCE lors de l'intercalibration des méthodes, montrent les limites de ces méthodes extrêmement précises, mais ne renseignant que ponctuellement. D'autre part :

Comment ensuite synthétiser quelques dizaines d'informations ponctuelles extrêmement précises en une tendance globale synthétique et objective ?

Quel moyennage est opérable sur des séries de l'ordre de la dizaine de points, quand toutes les méthodes statistiques se basent sur des centaines de données (Techniques de krigeage) et sont inapplicables ici ?

Or c'est bien ce qui est demandé au travers du reporting à l'Europe des informations DCE ou Natura 2000, que ce soit dans la grille de qualité des eaux, ou dans le Formulaire Standard de Données de Natura 2000.

Intérêt des données surfaciques : Indice de conservation

Quel intérêt majeur représente alors la collecte des données surfaciques ?

Il est tout d'abord à noter que les scientifiques ont défini depuis quelques années [Moreno *et al.* 2001] la notion d'indice de conservation CI (Conservation Index en anglais).

Définition de l'indice de conservation

La proportion CI (Conservation Index) de "mattes mortes" par rapport à l'herbier vivant de posidonies, dans un secteur donné, a été proposée pour servir d'indicateur des perturbations de l'herbier. Cet indice est défini par le ratio de la surface de l'herbier vivant, sur la somme des surfaces de l'herbier vivant et de l'herbier mort.

$$CI = \frac{Surface(Herbier_{Vivant})}{Surface(Herbier_{Vivant}) + Surface(Herbier_{Mort})}$$

La surface d'herbier mort est celle des "mattes mortes".

Cet indice est à utiliser avec la plus extrême prudence : en effet, la présence de "mattes mortes" dans un herbier de posidonies peut être d'origine naturelle [Boudouresque *et al.* 2006]. Dans certains types d'herbier, par exemple dans l'herbier tigré, à très grande valeur patrimoniale, la surface des "mattes mortes" peut être largement supérieure à celle de l'herbier vivant. C'est aussi le cas pour l'herbier du Languedoc-Roussillon.

C'est en réalité l'évolution de CI au cours du temps, dans un secteur donné, qui traduit les perturbations de l'herbier, et non sa valeur absolue ou relative.

[Moreno *et al.* 2001] montre la corrélation de cet indice de conservation avec l'état de santé de l'herbier au travers d'une campagne de mesures stationnelles. Il semblerait que cet indice n'ait jusqu'à présent été utilisé qu'en ponctuel, à partir de données mesurées sur des stations même si l'analyse se fait le long de transects.

La proposition de le décliner sur des données surfaciques, à présent accessibles (grâce à la faisabilité technique et financière de ces méthodes) est donc particulièrement intéressante et s'inscrit dans la suite logique de cet article. L'accès à l'indice de conservation surfacique est possible dès lors que la cartographie "Herbier vivant - Herbier mort" est disponible.

Notons que les 4 niveaux (4 intervalles de valeurs) de l'indice de conservation qui sont définis dans [Moreno *et al.* 2001] (et repris dans [Boudouresque *et al.* 2006]) correspondent à une classification pour les données ponctuelles. Un travail de définition des niveaux est à entreprendre si l'on souhaite utiliser ce type d'indice sur des données surfaciques.

Les données surfaciques étant disponibles, à l'échelle d'un secteur (méthodes globales à base de télédétection aérienne ou acoustique) ou localement (télémétrie acoustique), cet indice peut être évalué sur tout ou partie de la zone d'étude.

Il présente les intérêts suivants :

- Tout d'abord et surtout, **l'indice de conservation a une légitimité scientifique**.
- Ensuite, **il est déterminé à partir de méthodes objectives et répétables**, qui peuvent couvrir des zones locales ou de larges secteurs, pour lesquels, l'opérateur influe peu, et selon un mode de calcul automatique (Cf. équation ci-dessus).
- Enfin **il peut être interprété comme un outil de moyennage de l'information surfacique**. Il permet d'obtenir une information simplifiée de synthèse (jusqu'à un chiffre unique même), quantifiée et objective sur l'évolution d'une zone donnée d'herbier de posidonies. **L'indice de conservation peut ainsi permettre de ramener objectivement l'information cartographique surfacique à un seul chiffre dont l'évolution est corrélée à celle de l'état de santé de l'herbier.**

C'est probablement une des pistes les plus intéressantes aujourd'hui, explorée notamment dans le cadre des travaux en cours à la DCE, pour dégager une information globale et synthétique, par zone ou masse d'eau, telle que demandée par l'Europe dans le cadre des directives DCE et Natura 2000.

En raison de la grande différence de nature des méthodes de suivi ponctuelles, linéaires, micro-surfaciques et surfaciques, nous ne pouvons procéder à leur comparaison qu'en définissant des critères communs, des niveaux de performances et des valeurs seuils correspondantes, même si les unités ne sont pas les mêmes.

4. Paramètre « Précision »

Le paramètre «Précision» est défini par la **précision du géoréférencement de l'information prélevée**, c'est-à-dire sa localisation sur le globe terrestre (WG84 ou RGF93). La précision dépend directement du GPS utilisé pour les méthodes de terrain (navire ou plongeur) ou des appareillages aériens ou satellitaires.

- Quatre niveaux de performances sont définis, liés aux différents GPS utilisés :

Sigle	Système GPS utilisé	Précision du GPS	Exemple méthode	Performance : Précision
Sans GPS	-	> 15 m	-	> 15 m
GPS	Système standard usage civil	5 à 15 m	Plongeur	5 à 15 m
DGPS	Différentiel	< 1 m	Sonar latéral de coque	1 à 5 m
DGPS RTK	Différentiel cinématique en temps réel (Centrale inertielle ou non)	1 à 3 cm	Monitoring RTK	0.5 à 1m

5. Paramètre « Résolution »

Le paramètre «Résolution» a des significations différentes selon que la méthode est surfacique, linéaire ou ponctuelle.

- Dans le cas d'une approche surfacique, il s'agit de la taille du pixel.
- Dans le cas d'une approche linéaire : il s'agit de la résolution de la mesure de distance. Par exemple : Capacité de la méthode à mesurer un recul d'une limite entre 2 phases de cartographie de suivi, à 6 ans d'intervalle.
- Dans ces 2 cas elle s'exprime en mètre :

Cartographie, Micro-cartographie ou linéaire	Performance : Résolution
SACLAF DIVA surfacique (utilisation d'une méthode linéaire pour renseigner sur une surface), Pixel très grand (maillage très large) (Rq : sur une grande étendue, info vite acquise, très précise, reproductible)	> 2 m
SACLAF DIVA linéaire	0.5 à 3 m
Monitoring RTK - Aérien	0.5 à 1 m
Télémétrie acoustique, ou transect permanent	0.5 m

- Dans le cas d'un approche ponctuelle : il s'agit de la résolution de la mesure du paramètre (mesure en relatif), donc différentes unités :

Ponctuelle	Performance : Résolution
Méthode non scientifique	
DCE plongeur mesure des paramètres en un lieu homogène, mais à quelques mètres près	
Recouvrement : pixel (en m)	
RSP Plongeur Balise : mesure de distance (en m)	

6. Critère «Profondeur»

Le critère «Profondeur» caractérise la capacité de la méthode à explorer la gamme de profondeur utile pour le suivi de l'herbier (Typiquement 0 m à 35 m).

Méthodes	Performance : Profondeur
Télédétection satellitaire : ne couvre que les petits fonds. On ne peut pas choisir la météo	Gamme restreinte (ex : petits fonds)
Télédétection aérienne : ne couvre que les petits fonds, mais la campagne d'acquisition possible avec une météo adéquate : mer calme et heures du jour où la rasance est la meilleure.	Gamme moyenne
Restriction faible de la gamme de profondeur (exemple sonal tracté opérable dans moins de 5 m d'eau avec une large rasance pour inférer les petits fonds latéralement. Plongeurs opérant dans toute la gamme mais difficulté liée à la durée et la profondeur des immersions.	Restriction de gamme ou difficulté d'accès
Méthode de télédétection acoustique de coque	Toutes profondeurs

7. Critère «Besoin en VT (vérité terrain)»

Ce critère caractérise le besoin en vérité terrain (que ce soit par vidéo sous-marine ou par plongeur).

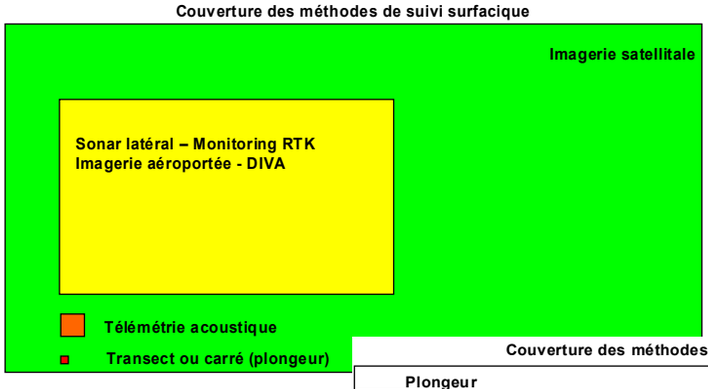
- Les méthodes surfaciques de télédétection acoustique (sonars latéraux) ou satellitales et aériennes, enregistrent une image en couleur ou en noir et blanc. Il est nécessaire de la segmenter (contourer les zones de couleurs homogènes) puis de réaliser des contrôles de vérité terrain afin d'établir la classification.
- Les besoins en VT pour les méthodes aériennes ou satellitales, dans la mesure où l'on dispose de couleurs et de fonds moins profonds ont des besoins réduits devant les méthodes à base de sonars.
- Les méthodes de fusion RTK ou SACLAF DIVA utilisent un processus de classification acoustique qui permet de diminuer considérablement les besoins en VT.
- Les méthodes de fusion RTK fournissent de plus nativement des informations complémentaires (micro-rugosité surfacique, dureté du fond) qui diminuent encore le besoin en VT.

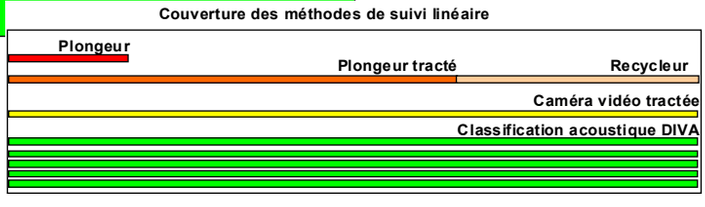
Méthodes	Performance : Besoin en VT
Télédétection acoustique (sonar seul)	
Télédétection satellitaire	
SACLAF DIVA classification acoustique	
Monitoring RTK fusion multi-capteurs – Plongeur – Télémétrie acoustique	

8. Critère «Couverture»

Le critère «Couverture» caractérise la capacité de la méthode à renseigner sur une large étendue.

Méthodes	Performance : Couverture
Plongeur : observations ponctuelles – carré ou transect permanent	
Télémétrie acoustique – Plongeur tracté	
DIVA classification acoustique - Monitoring RTK fusion multi-capteurs – Télédétection aérienne	
Télédétection satellitaire	





Remarque : l'usage de recycleur permet d'augmenter la distance parcourue par plongeur tracté au cours d'une plongée.

9. Critère «Reproductibilité»

Le critère «Reproductibilité» caractérise la capacité de la méthode à reproduire la mesure ou l'observation.

- Par nature une méthode de télédétection (mesure à distance) automatique (sonar, aérien, satellite) est plus reproductible qu'une méthode à base de plongeur.
- La disponibilité des observations satellites est aléatoire. Celle d'une campagne drone aérienne ou avion qui peut être programmée (coût supplémentaire) est alors moindre.
- L'usage d'un observateur humain nécessite une décision (choix du lieu homogène, prélèvement...) et donc affaiblit la reproductibilité devant une méthode automatisée.
- En sus du plongeur, l'usage d'une balise, installée au fond, à entretenir et qui peut être embarquée par les chaluts, arts trainants et ancres, nuit à la reproductibilité (disposition, choix de son emplacement (possibilité d'un fort recul de l'herbier)).

Méthodes	Performance : Reproductibilité
Satellitaire - Aérien existant (BD ORTHO) - Opérateur avec paramètres nécessitant un choix de l'opérateur, sans balise	
Balise et opérateur	
Opérateur seul avec paramètres simplifiés - Télémétrie acoustique	
SACLAF DIVA classification acoustique - Monitoring RTK fusion multi-capteurs – télédétection aérienne sur commande (BD ORTHO) - Sonar latéral	

10. Critère «Coût»

Le critère «Coût» est exprimé différemment selon qu'il s'agit de méthodes ponctuelles (nombre de plongées), linéaires (coût au km) ou surfaciques (coût au km^2).

- Coût des opérations d'acquisition surfacique (/km^2), micro-surfacique (/ha) et linéaire (/km)

Méthodes	Performance Coût
Carré permanent en 4 à 6 plongées Transect permanent (linéaire)	4 à 6000 €/**ha** **1500 € /km**
Sonal latéral tracté (mise en œuvre plus complexe et navigation difficile)	1250 à 1500 €/k**m²**
Aérien sur commande – Sonar de coque – Monitoring RTK Télémétrie acoustique	1000 €/k**m²** 4 à 6000 €/**ha**
Satellite (gratuit)– BD OTHO existant (gratuit) SACLAF DIVA (linéaire : cout de la navigation)	0€/k**m²** 30 €/km

- Coût des opérations d'acquisition ponctuelle

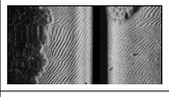
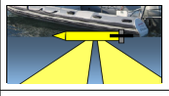
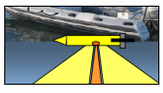
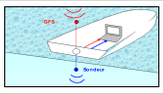
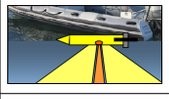
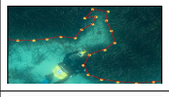
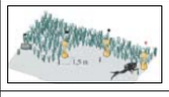
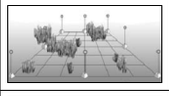
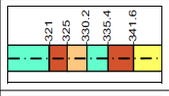
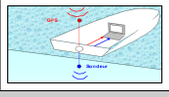
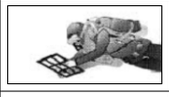
Méthodes	Performance Coût
Plongeur multi-paramètres avec balise (+ coût de l'entretien de balises ou de plusieurs plongées)	4500 à 6000 € /6 plongées
Plongeur multi-paramètres sans balise	3000 à 4000 € /4 plongées
Plongeur DCE 5 paramètres sans balise	1500 à 2000 € /2 plongées (1 jour)
Plongeur 1 paramètre : recouvrement sans balise	

11. Synthèse comparative des méthodes de suivi

Le tableau de la page suivante présente de façon synthétique la comparaison des méthodes sur la base des paramètres et des critères qui viennent d'être définis et seuillés.

Par la suite au chapitre 4, les méthodes les plus pertinentes, au regard de la pression considérée, seront mises en évidence.

Tableau de synthèse comparative des méthodes de suivi :

Stratégie globale surfacique : cartographie globale		**Tout le secteur**		**Tous les 10 ans**
Méthodes	**Illustration**	**Information globale**	**Export**	**Commentaire**
Télédétection aérienne		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation Évolution de la limite sup.	Peu cher si IGN existant mais petits fonds seulement
Télédétection satellitale		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation Évolution de la limite sup.	Id mais problème de reproductibilité
Sonar latéral tracté		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement grand fond	Indice de conservation Évolution des limites	Plus cher que télédétection aérienne Mais valable pour tous fonds A compléter avec images aériennes
Sonar latéral /coque DGPS		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation Évolution des limites	Plus cher que télédétection aérienne Mais valable pour tous fonds
Monitoring RTK Fusion multi-capteurs Monitoring RTK HR		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Rugosité Sédiment	Indice de conservation Évolution des limites	Plus cher que télédétection aérienne Mais valable pour tous fonds et très précis. Méthode dédiée au suivi (conçue pour)
SACLAF DIVA croisé		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Sédiment	Indice de conservation à basse résolution Évolution des limites	Peu couteux mais maillage lâche
Stratégie locale micro-surface & linéaire		**N micro-zones**		**Tous les 6 ans**
Méthodes	**Illustration**	**Information locale**	**Export**	**Commentaire**
Monitoring local RTK Fusion multi-capteurs		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Rugosité Sédiment	Indice de conservation local Évolution des limites	Résolution moindre que la télémétrie acoustique mais adaptée aux zones de plusieurs centaines de mètres
Télémétrie acoustique		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation local précis Évolution des limites	Haute résolution pour suivi local. Typiquement zones de 100 à 300 m de côté. Utilisable en linéaire ou en surfacique
Balisage type RSP		Limite supérieure Limite inférieure	Évolution des limites	Haute résolution mais linéaire de 100 m environ Dépendance des balises
Carré permanent		Recouvrement	Indice de conservation local	Haute résolution mais zone restreinte (typiquement 10 m par 10 m)
Transect permanent		Recouvrement	Indice de conservation local	Haute résolution le long d'un linéaire (2 m de large)
SACLAF DIVA ligne		Limite supérieure Limite inférieure	Évolution des limites	Évolution en zig-zag le long d'une limite
Stratégie ponctuelle		**N points de réseau sur des évolutions naturelles**		**Tous les 3 ans**
Méthodes	**Illustration**	**Information ponctuelle**	**Export**	**Commentaire**
Plongeur 1 paramètre		Recouvrement ponctuel	N jeux de paramètres ponctuels	Protocole « type » sans fondement scientifique : ne sert que pour la pédagogie de ces tableaux de synthèse
RSP Plongeur Balise 10 paramètres		7 à 10 paramètres	id	Mesures effectuées sur les balises
DCE Plongeur		Limite (profondeur et type) A -15m : Densité - Epiphytes Surface foliaire	id	Mesures effectuées dans un secteur homogène Pas de balise
Plongeur 17 paramètres		Autres paramètres (17)	id	Pas de balise
Natura 2000 (en cours de définition)		En cours de définition		

Stratégie globale surfacique : cartographie globale			**Tout le secteur**		**Tous les 10 ans**		
Méthodes	**Précision (géoref)**	**Résolution (pixel)**	**Profondeur**	**Besoin VT**	**Couverture**	**Reproductibilité**	**Coût**
Télédétection aérienne	0.5 m à 1 m	0.2 m à 0.5 m	Fond< 5 à 20 m turbidité		1 km à 5 km^2	Oui si commande spécifique	Achat
			Fonds > 15 m			Non (existant)	
Télédétection satellitale	0.5 m à qq m	0.2 m à qq m	Fonds > 15 m Turbidité		Globe terrestre	Aléatoire	
Sonar latéral tracté	2 m à 15 m	0.15 m à 0.5 m	Fond > 5 m				
Sonar latéral /coque DGPS	1 à 5 m	1 à 2 m					
Monitoring RTK Fusion multi-capteurs	0.5 à 1 m	0.5 à 1 m		SACLAF DIVA			
Monitoring RTK HR	0.5 à 5 m	0.1 à 0.3 m					
SACLAF DIVA croisé	0.5 à 3 m	< 2 m Typt 10 m à 50 m		SACLAF DIVA			
Stratégie locale micro-surface & linéaire			**N micro-zones**		**Tous les 6 ans**		
Méthodes	**Précision**	**Résolution**	**Profondeur**	**Besoin VT**	**Couverture**	**Reproductibilité**	
Monitoring local RTK Fusion multi-capteurs	0.5 à 1 m	0.5 à 1 m (pixel)					
Télémétrie acoustique	5 à 15 m (GPS std)	0.05 à 0.5 m (constructeur)				Opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
Balisage type RSP	5 à 15 m (GPS std)	Centimètre [Ramoge]					
	1 à 5 m (DGPS)						
Carré permanent	5 à 15 m (GPS std)	0.2 m [Ramoge]				Balise + opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
Transect permanent	5 à 15 m (GPS std)	0.5 m [Ramoge]				Balise + opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
SACLAF DIVA ligne	0.5 à 3 m	0.5 à 3 m (ligne)					
Stratégie ponctuelle		**N points de réseau sur des évolutions naturelles**			**Tous les 3 ans**		
Méthodes	**Précision (géoref)**	**Rés. Pixel ou dist.**	**Profondeur**	**Besoin VT**	**Couverture**	**Reproductibilité**	
Plongeur 1 paramètre	5 à 15 m (GPS std)	0.5 m				Opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
RSP Plongeur Balise 10 paramètres	5 à 15 m (GPS std)	0.05 à 0.2 m (mesure sur lieu balisé)				Balise + opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
DCE Plongeur	5 à 15 m (GPS std)	5 à 15 m				Opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
Plongeur 17 paramètres	5 à 15 m (GPS std)	5 à 15 m				Opérateur	
	1 à 5 m (DGPS)						
Natura 2000 (en cours de définition)							

VI . Bancarisation des données acquises en mer

Il est essentiel que les données acquises et élaborées soient bancarisées. Ce paragraphe explicite les données à bancariser, et propose une vision globale de la bancarisation de ce type de données. Il illustre la méthodologie proposée au travers d'un exemple de données, au format standard KML, téléchargeable et consultable, en parallèle de la lecture de ce présent cahier.

1. Données à bancariser, acquises lors du suivi

Liste des données cartographiques et d'observations

Les données spatialisées acquises ou produites lors du suivi doivent être restituées sous forme de couches d'informations géographiques. Elles concernent :

- Les couches de données d'observations : surfaciques globales, locales, linéaires ou ponctuelles
  - Images aériennes
  - Images acoustiques
  - Les données complémentaires : bathymétrie, micro-rugosité, classification du fonds (végétation ou sédiments)
- Les photos associées aux données d'observation
- La couche des prélèvements avec lieux et informations prélevées
- Les résultats d'analyses
- La carte de répartition de l'herbier de posidonies
- et enfin les métadonnées.

L'ensemble des données cartographiques et d'observations ponctuelles doit être consultable simultanément afin de permettre une fusion des informations et une analyse pertinente.

Métadonnées

Littéralement, les métadonnées sont définies comme étant des données sur des données. C'est donc un ensemble d'informations décrivant une ressource particulière (le contenu, le type, la nature, la qualité, la disponibilité et d'autres caractéristiques de la ressource…) [Bajjouk 2009]. L'existence des métadonnées et de l'information sur la qualité de la donnée en permet une gestion et une utilisation judicieuse et pertinente :

- en permettant un accès facile à l'information décrivant la ressource (formalisation des caractéristiques descriptives, présentation standardisée ...) et à la ressource elle-même,
- en assurant une traçabilité de la ressource à long terme (origine, protocole de création, suivi des modifications successives effectuées...),
- en garantissant une meilleure connaissance des limites d'utilisation et de valorisation de la ressource (contenu, fiabilité, fréquence de mise à jour...).

Il est également important d'enregistrer les facteurs de confiance sous forme de nouvelles métadonnées accessibles avec les métadonnées de base qui décrivent chaque carte.

Les métadonnées sont essentielles, elles permettent de pérenniser le suivi.
Le producteur de la donnée est la personne la mieux placée pour renseigner les métadonnées. C'est pourquoi il est impératif d'exiger la livraison des métadonnées par le prestataire auquel l'étude a été confiée.

Monitoring

L'ensemble des données précédentes doit pouvoir être restitué, au même format lors du retour sur zone, afin de pouvoir analyser l'évolution temporelle des informations observées et de réaliser le suivi.
L'analyse des ces données permet de fournir le résultat du monitoring : il s'en suit la réalisation d'une couche supplémentaire d'information : extension ou régression de l'herbier, augmentation ou baisse de sa vitalité.

Le respect du format de livraison permet une comparaison et une analyse des données entre deux dates d'observations.
C'est la clé de la réussite du suivi.
La faisabilité du suivi est assurée par l'usage de formats pérennes et conviviaux, transmissibles et facilement bancarisables.

2. Besoin de standardisation, de lisibilité, d'ergonomie

Dans le cadre de la gestion durable de l'acquisition de données, tout ou partie des données doit pouvoir resservir, éventuellement pour des usages futurs, pouvant être différents de l'objectif actuel de suivi. Ainsi toutes les données doivent pouvoir être complétées par tout prestataire futur, ou par tout autre type de données que celles préconisées dans ce guide.

Plusieurs spécifications sont donc à prendre en compte pour la bancarisation :

- Une grande précision d'archivage des données, qui ne doit pas les dégrader.
- Une philosophie "d'ouverture", avec la possibilité de pouvoir utiliser les outils SIG habituels pour la consultation, la bancarisation, la communication, le suivi scientifique, la gestion.
- L'usage d'un format standard, évolutif, pérenne, accessible par tous les sigistes.

3. Référentiel de bancarisation

Habituellement dans le domaine de l'acquisition de données, il convient de stocker la donnée brute, ainsi que les données élaborées à partir de ces données brutes. Les données sont généralement stockées dans un système de coordonnées, le plus proche de celui de l'acquisition. En fonction du besoin, on exporte ensuite la donnée vers les référentiels demandés, à l'aide d'outils de SIG de manipulation des données et de restitution graphique qui font la projection en temps réel dans le référentiel légal ou utilisé. Mais la donnée est toujours manipulée dans le référentiel de base, à partir des données brutes, afin de minimiser les erreurs qui surviennent à chaque projection.

Dans le cadre d'un suivi, au sens général, il ne serait de même pas logique de projeter d'entrée la donnée dans un référentiel particulier. La même donnée devant être amenée à être utilisée par différents acteurs, à des fins différentes, dans des systèmes de projection différents et selon des habitudes de référentiels toutes aussi légitimes les unes que les autres, les données acquises devraient être stockées de la façon la plus précise possible, c'est-à-dire dans le référentiel le plus proche de l'acquisition et exportées, puis projetées ensuite en fonction du besoin.

Certains gestionnaires préféreront établir le suivi dans un référentiel donné pour des raisons historiques ; d'autres choisiront un autre référentiel. A chaque changement de coordonnées, les données se dégradant, **il est préférable de les stocker dans le référentiel standard d'acquisition et de les projeter ensuite au besoin.**

Le **système géodésique Latitude-Longitude en WGS 84 s'impose comme un standard de fait et une référence mondiale** pour la cartographie.

- Tout d'abord, le **système géodésique Latitude-Longitude en WGS 84** est le référentiel le plus proche de l'acquisition : l'ensemble des données GPS étant mesurées dans ce système géodésique. D'autre part les GPS de l'utilisateur des données, du plongeur, du gestionnaire fournissent des données dans ce référentiel. **Etant le plus proche de l'acquisition, le système géodésique Latitude-Longitude en WGS 84 est celui qui dégrade donc le moins les données.**

  Le **système géodésique Latitude-Longitude en WGS 84 s'impose comme un standard pour le l'archivage et la manipulation des données.**

- Les SIG ont, de plus, en standard des fonctions d'import des données exprimées en WGS84. Les données peuvent ensuite être importées par les sigistes (outils de projection des SIG) afin de pouvoir les consulter dans un référentiel de travail qui dépend des habitudes des acteurs.

  La majorité des SIG disposent de routine d'import/export et de projections à partir des coordonnées WG84.
  De plus, il existe un certain nombre d'outils, gratuits, qui permettent de visualiser et de consulter des données archivées dans le référentiel WG84, comme par exemple GOOGLE EARTH.

De ce fait : les données sont non seulement archivées, dans leur intégralité, avec le minimum de manipulation sur les coordonnées, mais peuvent être exportées sous le référentiel et la projection souhaitées, et peuvent être lues par tous, expert ou non, technicien ou non.

Remarque : Les lignes ou contours, sont archivés sous forme de points. Les coordonnées des points sont recalculées par les SIG à chaque projection. Notons qu'en ce qui concerne les données surfaciques (de type cartographie), elle seront représentées :

- soit par des images : dans ce cas elles apparaissent dans le SIG sous forme de rasters (images rastérisées). Il conviendra alors de réaliser une projection du raster afin de pouvoir les observer dans un autre système de projection que WG84.
- soit sous forme d'une série de contours et dans ce cas elles sont consultables dans tout référentiel dès lors que la projection a été effectuée.

4. Format des données bancarisées

La gestion des différentes couches de données doit s'effectuer dans un format ouvert d'échange standard de données géospatiales.

Le format KML, Keyhole Markup Language (« langage à base de balises géolocales » en français) est un format de type XML qui permet l'affichage de données géospatiales : donc tout ce qui concerne les cartes, plans et autres représentations de l'espace. Le format KML a été reconnu depuis 2008 comme standard ouvert international par l'OGC (Open Geospatial Consortium : consortium international pour développer et promouvoir des standards ouverts de données géospatiales). GOOGLE a soutenu KML, l'a proposé à l'OGC et l'utilise dans ses logiciels, mais d'autres aussi, que ce soit les sites Web de cartes et plans de Yahoo ou de Microsoft, que des logiciels de cartographie ou de SIG (Système d'Informations Géographiques).

Avec le format ouvert KML, c'est l'interopérabilité et l'ouverture qui sont renforcées, tout comme la pérennité et l'archivage des données.

Le fichier « *.kmz » est la version compressée d'un fichier « *.kml » (écriture type XML consultable avec, non exhaustif, GOOGLE EARTH, NOTEPAD, EXCEL etc.). Un fichier « *.kmz » est composé de différentes couches thématiques de données.

5. Exemple : consultation d'un dossier GOOGLE EARTH complet sur une zone type

Afin d'illustrer nos propos nous invitons le lecteur à télécharger le dossier d'exemple à l'adresse [http://cartocean.fr/]. Ce fichier est au format « KMZ » (Z comme « zip », puisqu'il s'agit d'un dossier zippé, contenant un certain nombre de couches «KML»).

Avant de pouvoir consulter le fichier d'exemple, il est nécessaire d'installer GOOGLE EARTH sur votre ordinateur. Il suffit ensuite de double-cliquer sur le fichier KMZ.

L'exemple proposé contient les informations géoréférencées suivantes sur la zone de la Vaille :

- Image aérienne (proposée en standard par GOOGLE EARTH – Possibilité d'accès à l'historique des images aériennes)
- Zone de cartographie
- Bathycélérimétrie
- Observations en plongée (Photos géoréférencées)
- Transect bathymétrique
- Détection d'objet (au sonar latéral)
- Granulométrie
- Classification acoustique des substrats végétaux (Méthode : SACLAF DIVA)
- Classification des sédiments superficiels (Méthode : SACLAF CLASS)
- Sonar latéral : tracté à 455 kHz et 900 kHz, de coque à 250 kHz
- Isobathes
- Zones équi-profondeur (MNT bathymétrique en fausses couleurs)
- Micro-rugosité bathymétrique

La navigation s'effectue dans l'onglet des données situé à gauche de la fenêtre :

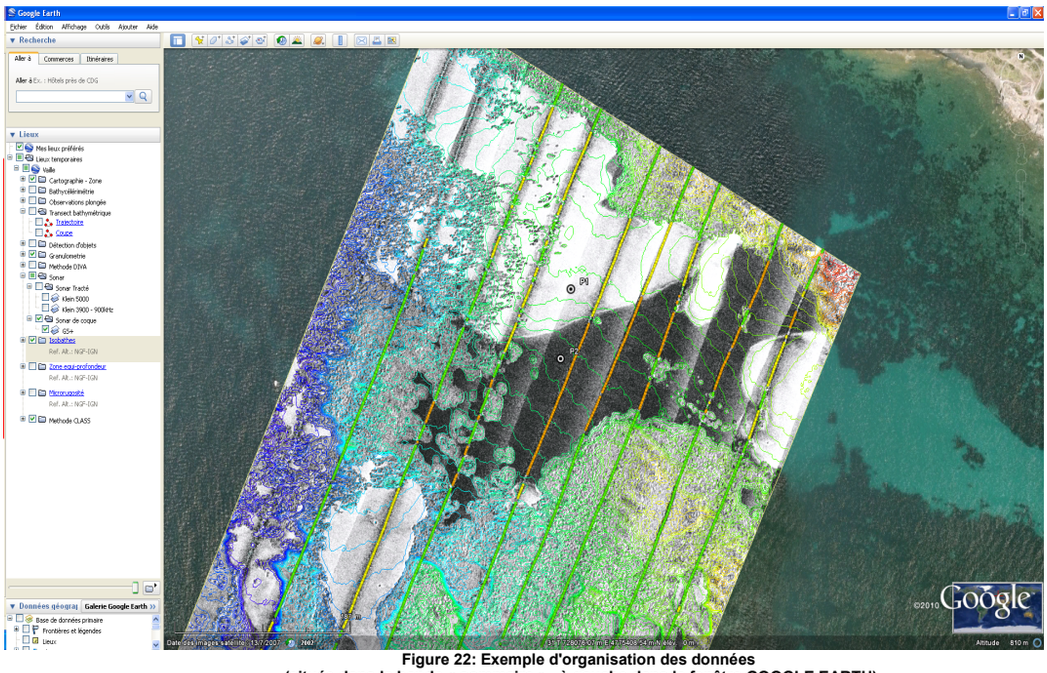


Figure 22: Exemple d'organisation des données
(située dans la bande « sommaire » , à gauche dans la fenêtre GOOGLE EARTH)
Données de bathymétrie, de classification acoustique (sédiment et végétation) et sonar latéral

Pour afficher ou masquer une couche ou un élément de la couche, il suffit de cocher ou de décocher la « checkbox » correspondante. Cet exemple permet d'appréhender la grande facilité de consultation de tous les types de données nécessaires au suivi : ponctuelles, linéaires ou surfaciques.

Gestion de la transparence d'un raster ou d'une surface

Il est possible de rendre plus ou moins transparent un raster (ou une surface) inséré dans GOOGLE EARTH.
Pour cela faire un clic droit avec la souris sur le raster ou la surface à modifier puis faire « Propriétés » (voir figure suivante).

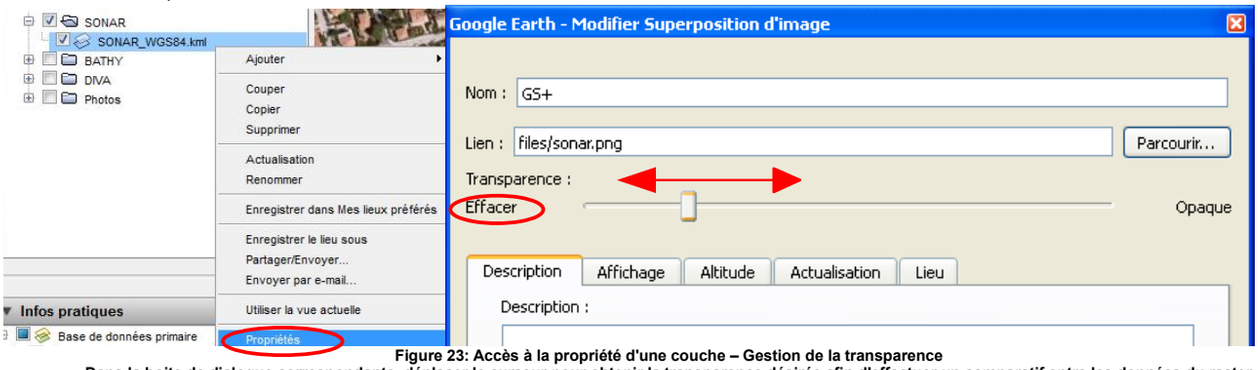


Figure 23: Accès à la propriété d'une couche – Gestion de la transparence
Dans la boite de dialogue correspondante, déplacer le curseur pour obtenir la transparence désirée afin d'effectuer un comparatif entre les données du raster ou de la surface et celles des images aériennes de GOOGLE EARTH (voir figure suivante).

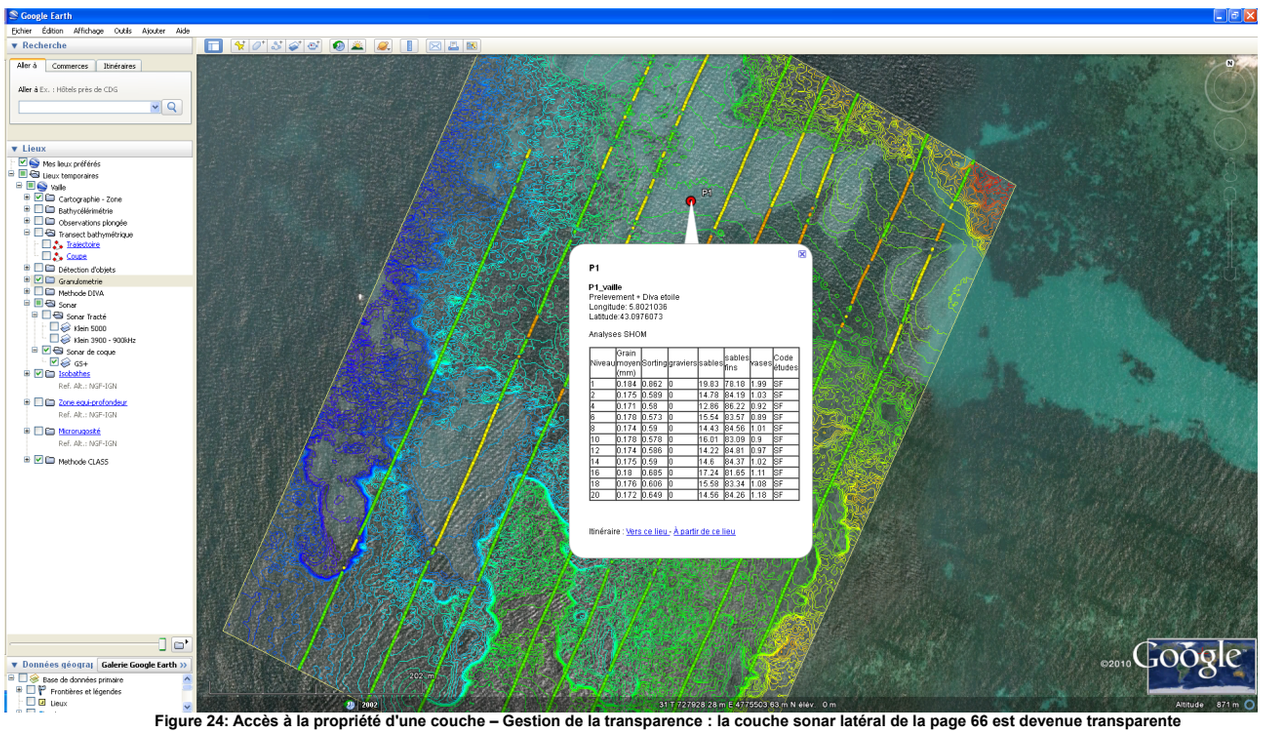


Figure 24: Accès à la propriété d'une couche – Gestion de la transparence : la couche sonar latéral de la page 66 est devenue transparente

Affichage du transect bathymétrique → Clic droit sur « Trajectoire » → puis « Afficher le profil d'élévation »

Enregistrement de données en particulier

Se placer sur la couche ou sous-couche désirée : faire un clic droit de la souris → « Enregistrer le lieu sous ... », nommer le fichier et préciser l'extension « *.kml ».
Pour récupérer les données vectorielles (exemple : position en WGS84), ouvrir le fichier enregistré avec EXCEL en acceptant l'ouverture en type XML. Les données sont disponibles par champs.

Possibilité d'ajouter des données personnelles

Les lieux d'intérêt du gestionnaire peuvent être marqués et diffusés à l'aide de fichiers KMZ, permettant à tout autre utilisateur de « bondir » vers ces endroits.
Ainsi les informations du gestionnaire : périmètre, notes, projet… de même que ses photos des fonds, peuvent être ajoutées et consultées sur la base des données de suivi, livrées dans le fichier KMZ.


Nicolas Barraqué – Déclic Bleu Méditerranée

Chapitre 4 : Quelle méthode pour quel suivi ?

Ce chapitre met en relation les méthodes et le besoin de suivi, que ce soit pour de la surveillance à long terme, pour le contrôle de l'efficacité des mesures de gestion prises, ou dans le cadre d'un projet d'aménagement.
Il propose les méthodes de suivi de l'évolution de l'herbier les plus adaptées pour chaque cas.

Le tableau ci-dessous précise le cadre du présent guide :

Type de suivi		
Sans lien état / pression **	**Avec lien état / pression**	
Suivi patrimonial* (Suivi à long terme)	**Suivi pour le contrôle de l'efficacité d'une mesure de gestion**	**Suivi dans le cadre d'un projet d'aménagement**
L'objectif est de préciser les méthodes les plus adaptées pour suivre l'évolution de l'herbier sur une durée de l'ordre de la dizaine d'années, au titre de : - la DCE contrôle de surveillance - la conservation des habitats …	L'objectif est de préciser les méthodes les plus adaptées pour suivre la réponse de l'herbier aux mesures de gestion.	L'étude d'impact permet de vérifier l'impact de l'aménagement sur l'herbier. Lorsque le projet est accepté, un suivi peut être demandé.
Reproductibilité et répétabilité sont donc des paramètres essentiels.	La démarche est volontariste.	Dans le cas de la DCE, cela correspond à la notion de contrôle opérationnel.
Cadre du présent guide		

***Patrimonial** doit être entendu dans le texte dans le sens de la bancarisation de la donnée (Le patrimoine étant la BDD (Base De Données) constituée) et non de la gestion d'un habitat en tant que patrimoine.

**Lien état / pression : L'existence d'un lien « état / pression » signifie que l'état de l'herbier et la pression sont liés. C'est le cas par exemple pour les aménagements littoraux, les rejets d'effluents, les fermes aquacoles...
Ce n'est pas le cas à l'échelle d'une baie ou d'un large territoire marin ; le problème réside alors dans la difficulté à corréler l'état de l'herbier et les pressions. Dans ces cas, l'herbier, sur le long terme, est impacté par de nombreux facteurs : variabilité du milieu marin, hydrodynamisme, courantologie, mouvements sédimentaires, climatologie et il n'est de ce fait pas possible de lier l'état de l'herbier avec une pression bien identifiée.

Pour les zones très côtières, ce cahier se base sur le "guide RAMOGE" [Boudouresque *et al.* 2006] pour la description détaillée des impacts des aménagements et des réglementations associées.

A l'échelle de la baie, ou de la façade, afin de satisfaire le besoin de connaissance au titre de la DCE et de la conservation des habitats, ce cahier propose des paramètres pertinents pour les gestionnaires, ainsi que les méthodes adaptées pour les collecter.

L'objectif du guide est de fournir des recommandations en termes de méthodes, pour chaque type de stratégie de suivi.

- Il ne définit pas la stratégie à suivre.
- Il liste toutes les stratégies possibles.
- Il indique les méthodes qui permettent de mettre en œuvre ces stratégies.
- Il renseigne les critères d'évaluation de ces stratégies (précision, résolution, coût, répétabilité …).

I. Suivi à long terme (connaissance patrimoniale au titre de la conservation des habitats et de la DCE)

1. Suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre de la conservation des habitats au titre de la DHFF (Natura 2000)

La Communauté Européenne a adopté le 21 mai 1992 la Directive 92/43/CEE relative à la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et la flore sauvages, dite "Directive Habitats Faune & Flore" (DHFF). Afin de répondre aux prescriptions de cette directive, l'État a pour responsabilité d'établir un état des lieux des habitats naturels et des espèces d'intérêt communautaire présents dans les sites Natura 2000 ainsi que leur état de conservation.

La Directive habitats précise que le réseau des sites Natura 2000 doit assurer le **maintien**, **ou** le cas échéant, le **rétablissement dans un état de conservation favorable** des types d'habitats naturels et des habitats d'espèces d'intérêt communautaire. Cependant, le manque d'acquis scientifiques pour l'évaluation de l'état de conservation rend actuellement difficile la prise en compte de cette exigence pour l'ensemble des habitats de la directive et notamment en milieu marin.

Comment définir l'état de conservation de l'herbier de posidonies ?

La définition de l'état de conservation d'un habitat prend en compte deux notions : le bon état immédiat de l'habitat et sa capacité à se maintenir durablement. Il est considéré comme favorable lorsque :

- son aire de répartition naturelle ainsi que les superficies qu'il couvre au sein de cette aire sont stables ou en extension,
- la structure et les fonctions spécifiques nécessaires à son maintien à long terme existent et sont susceptibles de perdurer dans un avenir prévisible,
- l'état de conservation des espèces qui lui sont typiques est favorable.

Dans le cadre des travaux relatifs à Natura 2000 sur l'état de conservation des habitats d'intérêt communautaire, la démarche décidée par le Ministère en charge de l'environnement a été de réaliser des cartographies sur l'ensemble des sites du domaine marin. Un marché a été lancé en 2010 à la demande du ministère, intitulé "Inventaires biologiques et analyse écologique de l'existant - Natura 2000 en mer". Ce marché (CARTHAM) vise à réaliser la base cartographique des sites Natura 2000 en mer désignés au titre de la Directive « Habitat-Faune-Flore » et à évaluer l'état de conservation des habitats naturels marins et des habitats d'espèces marines d'intérêt communautaire à l'échelle de chaque site. Il s'agit de deux démarches différentes qui nécessitent des informations bien spécifiques mais qui peuvent être combinées sur le terrain.

Conformément aux articles R. 414-11 et R. 414-8-5 du code de l'Environnement qui sont la transposition en droit français des dispositions de l'article 6 de la DHFF, l'état de conservation d'un habitat à l'échelle du site doit être renseigné dans le document d'objectifs (Docob) du site, via le Formulaire Standart de Données (FSD) **sous la forme d'une codification lettrée** qui est la synthèse de plusieurs critères. Le FSD est le moyen de communication avec la commission européenne concernant l'état de conservation des habitats et espèces de chaque site Natura 2000. Ce formulaire aide aux prises de décision politique et sert de base d'informations pour le rapportage à la commission européenne tous les 6 ans, en vertu de l'article 17 de la directive Habitats, concernant l'état de conservation global d'un habitat ou d'une espèce à l'échelle d'une région biogéographique. Un premier état de conservation à l'échelle biogéographique a été rendu en 2007.

Pour le marché Natura 2000 en mer, le MNHN-SPN (Museum National d'Histoire Naturelle) a été désigné pour assurer un appui scientifique notamment en proposant une démarche qualité, des référentiels et des guides méthodologiques. Il a fourni en 2011 une première version d'un guide méthodologique pour évaluer l'état de conservation des habitats naturels marins au niveau local (site Natura 2000).

A l'heure actuelle, il n'existe pas de protocole d'acquisition de données clairement spécifié.
Ce guide méthodologique présente un tableau de synthèse des descripteurs de l'état de conservation parmi lesquels on retrouve l'ensemble des paramètres listés dans le protocole scientifique. Les tableaux de synthèse des descripteurs permettant d'évaluer l'état de conservation sont en cours de correction par les scientifiques référents [Lepareur F. 2011].

Sur la base de ces descripteurs et de leur vulnérabilité selon leur localisation, une appréciation de leur état de conservation doit être donnée. La question, loin d'être simple, est comment ? La réflexion est en cours (Ateliers de façade AAMP (Agence des Aires Marines Protégées)).

A venir

Dans un second temps, au-delà du marché de l'AAMP, le MNHN prévoit de faire évoluer le guide avec l'avancée des programmes et des études en cours sur le sujet avec le développement d'indicateurs, d'indices et de protocoles plus précis pour certains habitats.

2. Suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre de la surveillance DCE

Les besoins de surveillance sont définis par des politiques publiques, essentiellement construites à l'échelle européenne.

- La **Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE)** constitue le cadre réglementaire de la politique communautaire de l'eau. Pour les eaux littorales, elle concerne les estuaires et les lagunes (eaux de transition) et les eaux côtières jusqu'à 1 mille du trait de côte. La DCE inclue la « surveillance chimique » (substances dangereuses) et la « surveillance écologique ».
- La **Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin 2008/56/CE (DCSMM)** met en place un cadre visant à réaliser ou maintenir un bon état écologique du milieu marin (de la côte aux limites des zones économiques exclusives) des mers européennes.

Contrôle de surveillance et contrôle opérationnel [Ifremer 2006] [Ifremer 2007]

L'article 8 de la DCE prévoit la mise en œuvre d'un programme de surveillance des masses d'eau, de manière à "dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque bassin hydrographique". Ce programme est mené sur la durée d'un "plan de gestion", soit six ans. Pour répondre à cette demande, chaque bassin hydrographique a ainsi défini différents réseaux de contrôles dans le cadre des Schémas Directeurs des Données sur l'Eau (SDDE) prévus par la circulaire du 26 mars 2002 du Ministère en charge de l'environnement. Le programme de surveillance défini par la circulaire DCE 2007/20 comprend quatre types de contrôles, dont deux impliquant de réaliser un suivi de l'herbier :

- le **contrôle de surveillance**, qui porte, depuis 2007, sur l'ensemble des paramètres biologiques et physico-chimiques précisé récemment par l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance ; il est réalisé dans chaque type de masses d'eaux.
- le **contrôle opérationnel,** mis en place sur les masses d'eaux présentant un risque de Non Atteinte du Bon Etat Ecologique fort (Risque NABE).

L'état écologique des masses d'eaux est estimé par le biais d'éléments biologiques d'évaluation («Biological Quality Element» ou BQE). Parmi ces derniers, les angiospermes ont été retenues sur l'ensemble des façades maritimes. **En Méditerranée, c'est la posidonie qui a été choisie.**

Suivi stationnel multi-paramètres

Dans le cadre du contrôle de surveillance de la DCE, la posidonie fait l'objet d'un suivi stationnel. Le suivi de l'herbier de posidonies dans les masses d'eau côtières s'effectue deux fois par plan de gestion (1 fois tous les 3 ans). La France a retenu 5 paramètres pour obtenir une image globale de la qualité des eaux selon une **méthode rapide, facilement reproductible et peu coûteuse (indice PREI)** [Gobert *et al.*, 2009].

Les paramètres sont mesurés selon un protocole standardisé, réparti à 2 profondeurs :

- 3 paramètres à 15 m de profondeur :
  - la **densité des faisceaux** (nombre de faisceaux/m²),
  - la **surface foliaire** par **faisceau** (cm²/faisceau),
  - la **charge épiphytaire** (poids sec des épibiontes/poids sec des feuilles).
- 2 paramètres en limite inférieure :
  - la **profondeur** (m),
  - le **type de limite** (franche, progressive, régressive).

Plusieurs de ces paramètres connaissant une variabilité saisonnière, les mesures sont toutes réalisées à la même période (mois d'avril). Pour chacun d'eux, des valeurs limites ont été définies. Elles correspondent, d'une part, aux valeurs de référence correspondant au développement d'herbier exempt de perturbation (classe bleue), d'autre part, aux valeurs critiques correspondant à un herbier dégradé (classe rouge).
Les valeurs de référence définies pour les masses d'eaux côtières du Languedoc, du Roussillon, de Provence Alpes et Côte d'Azur et de Corse sont précisées dans l'Arrêté Ministériel du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface. Les limites supérieures et inférieures du bon état sont définies par écorégions.

Estimation de l'état écologique au moyen d'un indice multi-paramètres

L'évaluation de l'état de santé des herbiers de posidonies passe ainsi par la définition de conditions de référence puis par la mesure de l'écart à cette référence au travers du calcul d'un **indice multi-paramètres** : l'Ecological Quality Ratio (EQR) (En français : Ratio de Qualité Ecologique).
Le calcul de l'EQR est le résultat d'équations fonctions des 5 paramètres retenus pour le BQE posidonies.

Les valeurs de l'EQR (variant de 0 à 1) permettent alors de classer les masses d'eaux côtières au sein de cinq classes d'état définies par la DCE et codifiées par une couleur :

classes		Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais
EQR	1		0,775		0,550		0,325		0,100	

Sur la façade méditerranéenne, l'IFREMER assure la maîtrise d'ouvrage déléguée, pour l'Agence de l'eau RMC maître d'ouvrage de l'organisation et la mise en œuvre des campagnes de surveillance, en coordonnant

l'ensemble de l'acquisition des données et de leur synthèse en collaboration avec de nombreux partenaires : Universités, bureaux d'études, structures locales de gestion et services de l'Etat. Les campagnes sont menées par les Laboratoires Environnement Ressources Provence-Azur-Corse et Languedoc-Roussillon de l'IFREMER, en collaboration avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse.
Par ailleurs, l'Agence de l'eau RMC a souhaité renforcer le dispositif DCE par des micro-cartographies effectuées par télémétrie acoustique [Descamp *et al*. 2009].

Intercalibration

La DCE laisse la liberté à chaque état membre de définir, le mode de calcul de l'EQR. Néanmoins, l'obligation a été faite d'intercalibrer ces méthodes, pour des conditions de référence similaires, afin de s'assurer de la cohérence des résultats obtenus à l'échelle des pays européens méditerranéens (classification des masses d'eau).

3. Et malgré tout : L'herbier est-il un bon indicateur de la santé du milieu ?

Toutefois, l'avancée actuelle des travaux de suivi de l'herbier de posidonies, et l'analyse des résultats des études de suivi à long terme (RSP PACA) nous amènent à reconsidérer quelques questions essentielles.

→ Pourquoi l'herbier a-t-il été choisi comme indicateur ?

Les herbiers subissent de nombreuses pressions et sont considérés historiquement comme de bons indicateurs des modifications du milieu liées à des actions anthropiques.
Or il s'avère que, loin des impacts humains, ce n'est pas systématiquement le cas.

L'herbier enregistre l'histoire du milieu marin
- de l'hydrodynamisme,
- des mouvements sédimentaires,
- de la variabilité du milieu …

et aussi des impacts des activités humaines...

Les récentes conclusions sont :
- qu'en limite supérieure, l'impact direct avec la pression de l'homme, dès lors qu'elle est à proximité est observable et,
- qu'en limite inférieure, l'état de l'herbier n'est pas forcément corrélé avec une pression anthropique.

Les conclusions de l'analyse des 20 ans d'existence du Réseau de Surveillance Posidonies PACA [Sartoretto *et al.* 2009] montrent l'interférence des facteurs environnementaux (hydrodynamisme, mouvements sédimentaires …) avec les impacts des activités humaines… La variabilité du milieu est responsable des régressions des limites inférieures dans des sites exempts d'impacts anthropiques…

Les résultats de [Mayot 2007] soulignent aussi le fait que les impacts sont mélangés :
- En limite supérieure, le bilan des données de 20 années du RSP PACA ne permet pas tirer de tendance pertinente à partir des paramètres de déchaussement, de pourcentage de rhizomes plagiotropes, de phénologie et de lépidochronologie. En ce qui concerne la densité, l'aspect prédictif de celle-ci sur l'évolution de la limite n'est pas confirmée. Les différents sites de suivis montrent dans de nombreux cas que les facteurs environnementaux (hydrodynamisme, mouvements sédimentaires) ont une action prédominante sur l'évolution des limites.
- En limite inférieure, l'analyse des données montre globalement une accélération de la régression des limites depuis 1990, avec souvent néanmoins une alternance de phases de recul et de progression. Ces régressions affectent de grandes surfaces, et le mécanisme est dans tous les cas précédé par une diminution de la densité. L'origine multi-factorielle de la régression en limite inférieure semble toutefois très fortement probable, d'autres facteurs de stress (modifications de la transparence des eaux, des flux sédimentaires...) pourraient agir en synergie et fragiliser les limites inférieures. Il n'y a pas de lien entre les causes de régression et des facteurs tels que le niveau d'anthropisation ou l'importance des aménagement littoraux. D'autre part les conditions à l'origine de l'alternance (« respiration de l'herbier » : phase de construction de rhizomes plagiotropes, puis orthotropes) sont probablement liées à l'existence de cycles physiologiques de la posidonie ou à des changements environnementaux.

Les conclusions tirées des séries de données en limite supérieure et en limite inférieure montrent l'interférence des facteurs environnementaux (hydrodynamisme, mouvements sédimentaires…) avec les impacts des activités humaines. De plus, la variabilité des conditions du milieu est à l'origine des régressions des limites inférieures observées depuis une quinzaine d'années, dans des sites pourtant définis comme « stations de référence », c'est-à-dire exempts d'impacts anthropiques. **Si l'herbier intègre les variations de la qualité générale des eaux littorales, son utilisation en tant qu'indicateur biologique est donc limitée, tout au moins avec le seul suivi des paramètres morphologique et structurel de l'herbier** [Sartoretto *et al.* 2009].

Il ressort de ces conclusions que le suivi à long terme des herbiers de posidonies à l'échelle d'une façade n'a d'intérêt que si ce suivi est effectué uniquement en limite inférieure, dans des sites où les impacts des activités humaines sont quasi-inexistants [Sartoretto *et al.* 2009].
Plus particulièrement, notons que dans la synthèse nationale de la surveillance la question se pose de savoir si

la posidonie est un élément de qualification biologique pertinent ? [Ifremer 2010]. La classification des masses d'eaux languedociennes par l'herbier de posidonies se heurte au problème de la répartition et de la connaissance de la dynamique de ces herbiers superficiels, qui se trouvent en limite géographique de répartition et qui sont soumis à l'impact du panache rhodanien. En 2009, la classification en très bon état, de la masse d'eau de la station d'Agde par le benthos de substrat meuble renforce les interrogations qui se posent sur le maintien de la posidonie comme élément de qualification biologique pertinent pour la classification des masses d'eaux côtières de type C (côte sablonneuse languedocienne).

→ Que cherche-t-on à mesurer au travers de la surveillance de l'herbier de posidonies?

Nous cherchons à mesurer une dégradation de la qualité des eaux liée à une activité anthropique. **Le problème est que l'herbier enregistre TOUT et pas uniquement l'impact des actions humaines ; et que l'on est absolument incapable de séparer les effets relatifs à chaque cause.**
Ces conclusions récentes mettent donc en évidence la mauvaise sensibilité de l'herbier vis à vis de l'objectif de connaissance, à savoir la qualité des eaux liée à une activité anthropique. **En clair, les descripteurs retenus pour l'herbier, peuvent indiquer un mauvais état de santé de celui-ci, sans que ce soit lié à une dégradation de la qualité des eaux.**

→ Que dit l'herbier de posidonies au travers de mesures ponctuelles?

Les mesures ponctuelles de l'herbier sont difficiles à interpréter.

- Tout d'abord leur répétabilité dépend de l'opérateur et du lieu choisi. Même en travaillant avec des protocoles plus simples en termes de positionnement et de nombre de paramètres, on reste confronté aux difficultés de l'intercalibration des méthodes (Difficulté de l'intercalibration DCE) dès lors que l'on travaille à plus grande échelle, sur plusieurs sites (France, Espagne, Italie...) ou plusieurs éco-régions. Que faire si différents opérateurs, avec des méthodes différentes, obtiennent des classes d'état distinctes sur le même site ?
- D'autre part se pose le problème des grilles de lecture des différents paramètres. Ces grilles devraient être bâties sur le gradient de pression et actuellement ce n'est pas le cas.

Les informations ponctuelles de l'herbier ne sont pas de bons indicateurs car elles sont difficilement interprétables (problème de répétabilité, choix du point, opérateur, …) et les méthodes difficilement intercalibrables.
La DCE s'interroge actuellement sur la pertinence de sa politique, basée sur les 5 paramètres du protocole de suivi DCE et essaie d'établir le lien état de santé de l'herbier/pressions anthropiques. Il est difficile de corréler les paramètres ponctuels de l'herbier avec la pression anthropique et le lien entre l'état de santé de l'herbier de posidonies et la pression des activités anthropiques n'est actuellement pas démontré statistiquement.

→ Conclusions : appréhender l'herbier de posidonies de façon plus globale

Puisque dans le cadre d'un suivi à long terme, la sensibilité de l'herbier est mauvaise, que les mesures ponctuelles sont difficilement interprétables, que le suivi des limites de l'herbier n'est pas uniquement lié aux actions anthropiques mais aussi à l'hydrodynamisme, aux mouvements sédimentaires et à la variabilité du milieu, **il semble inutile de regarder l'herbier de trop près, les observations n'étant pas uniquement et directement corrélées à son état de santé.**

Comme préconisé dans [Mayot 2007] il est raisonnable de les appréhender plus globalement.

4. Approche globale surfacique

La surface de l'herbier est-elle un bon indicateur de son état de santé ?

L'avènement récent de nouvelles technologies de suivi à l'échelle globale permet à présent d'envisager des approches surfaciques de suivi.

L'approche surfacique (approche globale) présente plusieurs avantages :

- Elle ne dépend pas du choix d'un lieu, d'un échantillon, d'un opérateur et présente ainsi un indice de répétabilité plus élevé.
- Elle permet d'utiliser une grille de lecture simple (binaire : vivant/mort et évolution au cours du temps) **basée sur l'usage de l'indice de conservation.**
- En attendant d'en savoir plus sur l'herbier, elle permet d'enregistrer ses modifications à l'échelle globale. Il n'est pas utile de la mettre en œuvre trop souvent : une cartographie tous les 10 ans permettrait d'enregistrer l'historique et d'essayer de comprendre comment l'herbier évolue en corrélant ces observations avec des observations environnementales.

Ainsi nous soulignons l'intérêt de la proposition de travailler avec un indicateur surfacique, le seul qui semble pertinent à ce jour et qui permettrait de répondre aux besoins des directives, notamment dans sa capacité à fournir une information globale, objective, synthétique, chiffrée, répétable et intercalibrable par définition. Les travaux actuels permettront de conforter cette conclusion.
Notons que l'indice de conservation apparait dans la liste des paramètres de l'herbier du groupe de travail du projet Interreg Posidonia [InterregIIIB Posidonia 2007 - a]. La réflexion sur son usage est en cours à la DCE.

Conclusions : Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre d'un suivi à long terme ou suivi patrimonial

L'objectif du suivi patrimonial est d'acquérir de l'information sur l'herbier, pour observer son évolution à moyen ou long terme, sans se poser de question sur le lien état/pression.
L'ambition étant de pouvoir extrapoler l'évolution de l'herbier à la qualité des eaux.

Effets : ils sont globaux : impact des actions humaines, hydrodynamisme, mouvements sédimentaires, variabilité du milieu.
→ **Risque** = modification de l'étendue de l'herbier.
→ **Descripteur à suivre : Indice de conservation (global ou local selon moyens) ou limites, ainsi que la densité.**

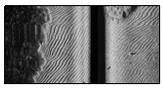
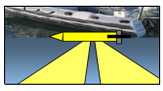
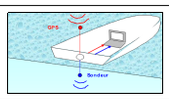
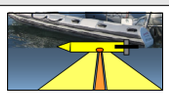
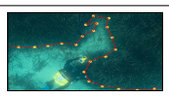
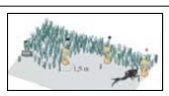
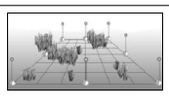
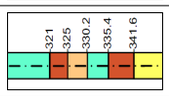
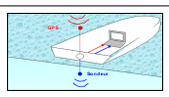
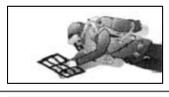
Commentaires et justifications techniques (colonne «Avis Technique»)
Le suivi à long terme (dizaines d'années) doit être avant tout reproductible.

- **Stratégie globale surfacique**
  - Les méthodes aériennes, par leur faible coût et leurs excellentes précision et résolution, dans la mesure où elles permettent d'apporter l'information (si bonne visibilité et fonds peu profonds) sont toujours les plus performantes (optimum coût / précision / résolution).
  - Si les méthodes aériennes ne permettent pas de couvrir la zone, il faut utiliser de l'acoustique sous-marine qui permet une bonne couverture surfacique (utilisation en complément des méthodes aériennes si la zone couvre toute la gamme de profondeur ou seule si les fonds sont supérieurs à 2 ou 3 m).
    - Dans ce cas, l'idéal est d'utiliser la méthode de monitoring RTK ou RTK-HR (haute résolution) qui est dédiée à cette application (elle a été spécifiquement développée pour répondre à ce besoin). Elle peut, pour réduire les coûts, être appliquée sur des transects englobant les limites afin de rendre compte d'éventuelles modifications du contour, ou traversant la zone pour rendre compte d'éclaircissements.
    - Si la zone est très grande, le sonar latéral fournira des informations un peu moins précises que la méthode de monitoring, mais avec une plus grande couverture.
    - Si le budget est très faible, choisir une méthode de moins bonne résolution comme le SACLAF DIVA, mais de très grande couverture et dont les coûts sont très faibles (coût de la navigation).

- **Stratégie locale : micro-cartographie**
  - Si la zone est de très petite taille (Ordre de grandeur : carré de 200 m de coté) : la méthode la plus performante est la télémétrie acoustique : bonne répétabilité et haute résolution.
  - Les méthodes de type carré ou transect permanent ne couvrent pas assez, nécessitent l'utilisation de balises (et donc leur entretien pose le problème de la pérennité de la balise) et n'offrent pas une précision supérieure à la précédente.
  - La méthode de balisage type RSP est très précise et présente une couverture plus grande, mais moindre que la méthode basée sur la télémétrie acoustique.
  - La méthode de monitoring est un bon compromis dès lors que la zone est un peu plus grande (carré de taille supérieure à 200 m de coté).
  - De même le SACLAF DIVA permet, pour un coût très faible, de renseigner de façon précise et répétable sur l'évolution des limites.

- **Stratégie ponctuelle**
  - Les méthodes utilisant des balises posent le problème de l'entretien de ces dernières et de leur pérennité sur une durée d'une quinzaine d'années, donc de la répétabilité de l'observation.
  - Les méthodes plus simples, comme celles adoptées pour la DCE, sont moins ambitieuses, mais permettent d'apporter, à moindre coût les informations essentielles et ce, de façon répétable. La contrainte sur la résolution de l'information est moins forte, mais l'opération est de ce fait répétable et donc plus plus performante dans le cadre d'un suivi sur une longue durée.
  - Le cas d'un seul paramètre (le recouvrement) est choisi ici à titre d'exemple et dans le but d'aider à la compréhension du tableau de synthèse. Bien évidemment l'information obtenue est totalement insuffisante, ce qui conduit au rejet d'une telle méthodologie basée sur un seul paramètre.

Nous préconisons la combinaison d'une méthode surfacique (globale ou locale) avec une prise d'information ponctuelle complémentaire.

Stratégie globale surfacique : cartographie globale		Tout le secteur		Tous les 10 ans	
Méthodes	**Illustration**	**Info globale**	**Export**	**Avis Technique**	
				Très peu profond	**Toutes Prof.**
Télédétection aérienne		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation Évolution de la limite sup.	Peu cher si IGN existant mais petit fond seulement	
Télédétection satellitale		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation Évolution de la limite sup.	Id + problème de reproductibilité	
Sonar latéral tracté		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement grand fond	Indice de conservation Évolution des limites	Plus cher mais global Compléter avec images aériennes	
Sonar latéral /coque DGPS		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation Évolution des limites	Plus cher, mais global	
Monitoring RTK Fusion multi-capteurs Monitoring RTK HR		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Rugosité Sédiment	Indice de conservation Évolution des limites	Plus cher mais global et précis. Dédié. Infos en sus	
SACLAF DIVA croisé		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Sédiment	Indice de conservation à basse résolution Évolution des limites	Peu couteux mais maillage lâche	
Stratégie locale micro-surface & linéaire		**N micro-zones**		**Tous les 6 ans**	
Méthodes	**Illustration**	**Info locale**	**Autres**	**Avis technique**	
Monitoring local RTK Fusion multi-capteurs		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Rugosité Sédiment	Indice de conservation local Évolution des limites		
Télémétrie acoustique		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation local Évolution des limites	Haute résolution pour suivi local	
Balisage type RSP tous les 5 m		Limite supérieure Limite inférieure	Évolution des limites		
Carré permanent		Recouvrement	Indice de conservation local		
Transect permanent		Recouvrement	Indice de conservation local		
SACLAF DIVA ligne		Limite supérieure Limite inférieure	Évolution des limites		
Stratégie ponctuelle		**N points de réseau sur des évolutions naturelles (hors pression)**		**Tous les 3 ans**	
Méthodes	**Illustration**	**Info ponctuelle**	**Autres**	**Avis technique**	
Plongeur 1 paramètre		Recouvrement ponctuel	?	Insuffisant Inutile seul	
RSP Plongeur Balise 10 paramètres		Recouvrement ponctuel + autres param	Extrapolation qualité des eaux		
DCE Plongeur		Limites (profondeur et type) et à -15m : Densité, Epiphytes Surface foliaire	Extrapolation qualité des eaux (grille qualité DCE)		
Plongeur 17 paramètres		Autres param. (17)	Scientifique		
Natura 2000 (en cours de définition)		en cours de définition	Extrapolation de l'état de conservation de l'herbier		

II . AMÉNAGEMENTS LITTORAUX

1. Rappel de l'impact

En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]

L'impact des aménagements littoraux : **urbanisation en bord de mer, construction de ports, de brise-lames, d'épis**, a constitué, par le passé, une cause importante de régression des herbiers de posidonies.
Cet impact peut être direct, **par recouvrement des posidonies**, ou indirect. Parmi les causes indirectes les plus probables, on peut citer :

- **La pollution et les matières en suspension** qui se répandent par exemple aux alentours d'un port, auxquels la posidonie est sensible et qui échappent aux stations d'épuration : peinture « anti-fouling » des coques des navires, rejet des eaux usées des bateaux quand les bateaux et/ou les ports ne sont pas équipés de dispositifs de récupération des eaux usées.
- **La turbidité générée lors de la mise en place de l'ouvrage**, lorsque des matériaux fins ont été déversés à la mer : s'agissant d'un organisme photosynthétique, la posidonie est très sensible à la turbidité de l'eau, même passagère, par exemple générée lors des travaux d'un aménagement littoral.
- **L'action des engins de chantier (barges),** lors de la mise en place de l'ouvrage.
- **La modification de l'hydrodynamisme**, en particulier des courants littoraux, induite par l'ouvrage. Les ouvrages maritimes entravent la dérive des courants et des sédiments parallèlement à la côte. Il en résulte, en amont de la dérive, l'accumulation de sédiment, et en aval de la dérive un déficit en sédiment. Si l'apport de sédiments dépasse 6-7cm/an, les **rhizomes orthotropes** de la posidonie ne peuvent pas compenser l'enfouissement, par leur croissance verticale. Les points végétatifs sont alors enterrés et meurent ; l'herbier est détruit. Inversement, en aval de l'aménagement, le départ du sédiment provoque le déchaussement des rhizomes. L'herbier déchaussé est alors très vulnérable à l'hydrodynamisme (houle, tempêtes), aux chalutages (en profondeur) et à l'ancrage des bateaux. A long terme, il est également détruit.

En résumé les impacts majeurs des ouvrages maritimes peuvent être :
- Recouvrement des fonds par l'opération.
- Embourbement des fonds et turbidité de l'eau.
- Pollution de l'eau.
- Modification de l'hydrodynamique et recouvrement induit.

2. Et malgré tout : les aménagements littoraux répondent-ils toujours aux enjeux actuels ?

En 2010, près de 17 % du littoral sont artificialisés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (En savoir plus → www.medam.org), impliquant souvent des destructions irréversibles des petits fonds compris entre 0 et 20 m de profondeur. Or, c'est dans cette frange littorale que se concentre une grande partie de la biodiversité marine et notamment des larves qui adultes vivront dans les plus grands fonds.
Depuis quelques années, le littoral subit de nombreuses tempêtes de plus en plus violentes et fréquentes. Les aménagements subissent les assauts de la mer qui causent souvent des dégâts considérables et les risques de submersion s'accentuent.

Faut-il poursuivre les aménagements pour préserver les terrains gagnés sur la mer au risque de détruire à nouveau des zones où se concentre la biodiversité marine ?

Certes dans certains cas la sécurité des biens et des personnes est en jeu… mais à quel prix ? Une réflexion vers une acceptation de l'enjeu environnemental comme potentiel de développement peut permettre de réguler les aménagements au travers des documents de planification, et même d'envisager un recul stratégique dans certains cas. En cas d'aménagement, un panel élargi de techniques "douces " est à prendre en considération dans la réflexion.
En savoir plus → Cf. Stratégie nationale de gestion du trait de côte [MEEDDM 2010]

3. Règles ou recommandations

- Interdiction de décharger sur les fonds sous-marins pourvus de posidonies.
- Autorisation obtenue pour des zones limitrophes aux herbiers de posidonies, mais avec des mesures de prévention: connaissance de la distribution des herbiers et de leur profondeur, prévision d'un périmètre de précaution autour des herbiers de posidonies, planification d'intervention visant à garantir le confinement des travaux (pollution, turbidité) et le respect du cycle végétal.
- Caractérisation et évaluation quantitative du phénomène et prévision de la dynamique transversale des sédiments à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire, dans le cas d'opérations côtières d'extension longitudinale importante [SDAGE RMC 2005].
- Prévision de l'évolution des fonds au moyen de modèle numérique.
- Eviter les structures non ancrées sur les fonds recouverts d'herbiers et les ombres portées.
- Positionnement des ouvrages éloignés des posidonies.

Ainsi la recommandation essentielle consiste à **respecter une distance minimale entre un nouvel ouvrage et les posidonies vivantes les plus proches**. Aucune valeur de distance minimale ne peut être préconisée dans l'absolu car elle est définie par la courantologie du lieu. Notons que le "guide RAMOGE" préconise par précaution et à titre indicatif, une distance d'au moins 10 m.

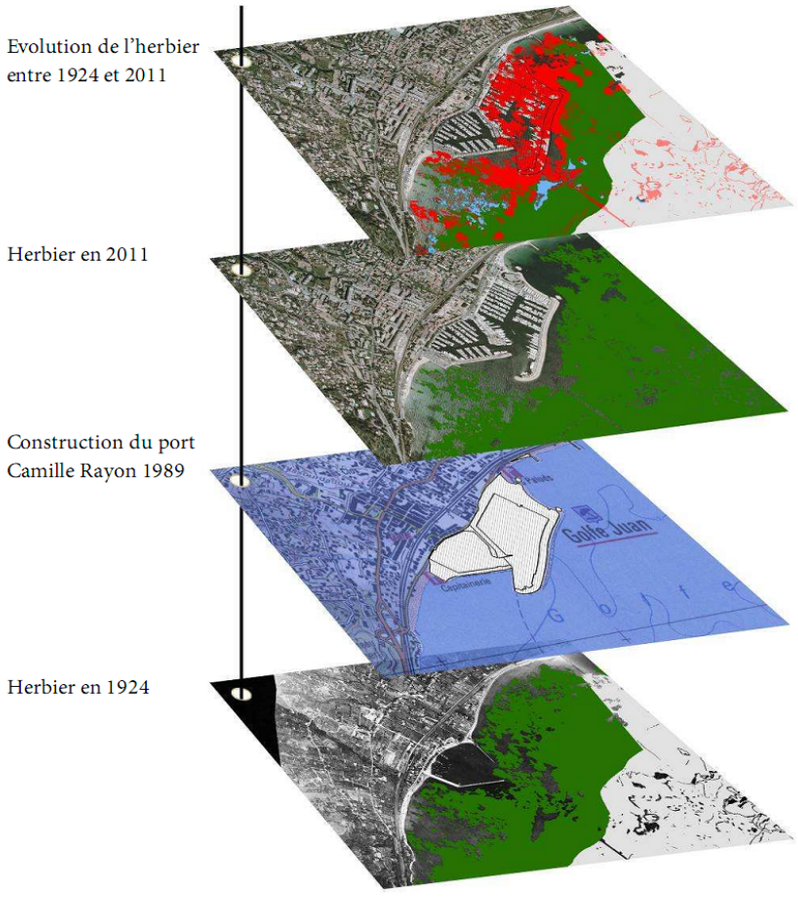


Figure 25: Exemple de résultats de monitoring par interprétation de photos aériennes
réalisé par Andromède Océanologie en coordination avec l'Agence de l'eau RMC. Réalisation des travaux sur l'ensemble du littoral [Andromede 2011]
Exemple d'artificialisation du littoral et de ses conséquences directes sur la régression de l'herbier de posidonies
(construction du port Camille Rayon en 1989)
En vert : Herbier stable. En Bleu : Herbier en progression. En rouge : Herbier en régression

4. Conclusions : Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies dans le cadre d'un aménagement littoral

(Cf. page suivante)

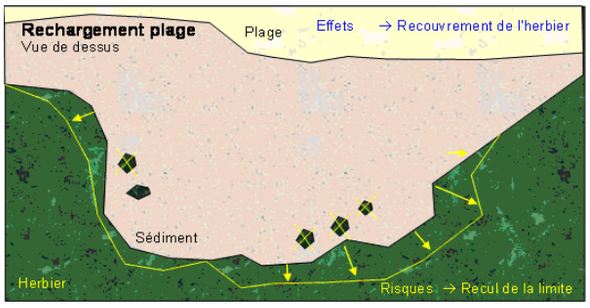
Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies
Aménagements littoraux & Rechargement des plages

Ces deux applications se traitent de façon similaire car elles admettent généralement la même gamme de profondeur, de type "petits fonds", ainsi que les mêmes effets.

Rechargement des plages
Aménagements littoraux

Effet = recouvrement de l'herbier par le matériau apporté

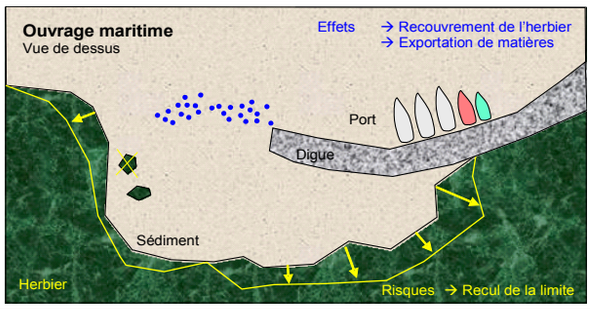
Risque = modification de la limite supérieure de l'herbier



Eléments à suivre = Limite supérieure
avec **recouvrement surfacique**
+ densité

Etendue : Zone de rechargement (ou d'aménagement)
+/- 30% de chaque côté (à adapter selon les conditions locales, notamment courantologiques, et les statuts de la zone)

En général la zone est peu profonde, sauf si le profil des plages tombe rapidement.



Remarques générales sur les ouvrages maritimes

- Si l'ouvrage est une digue, la perturbation est localisée (non abrasif, non en mouvement) :
  Il faut bien localiser les suivis et les effectuer après la réalisation des ouvrages, sur la base d'un T0.

- De plus si l'ouvrage en dur (roches ou béton) a été construit sur l'herbier, ce qui est à présent interdit, l'herbier de posidonies a été localement supprimé et la diffusion de l'ouvrage limitée. La situation est alors stable, un suivi n'est plus utile au delà de 2 observations.

- Si l'ouvrage implique la construction d'une plage (abrasif et en mouvement) la perturbation continue à évoluer dans le temps ; il est préconisé d'effectuer un suivi global tous les 3 à 6 ans.

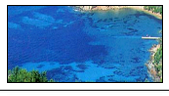
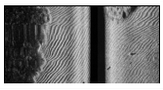
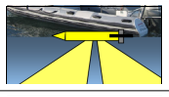
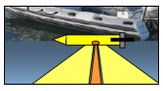
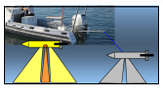
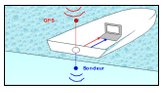
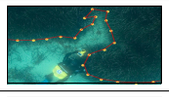
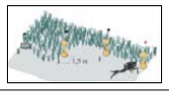
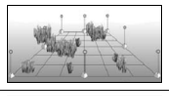
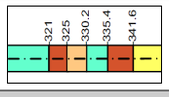
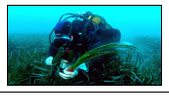
Remarques sur les autres paramètres :

- Le déchaussement éventuel de l'herbier peut résulter d'autres phénomènes plus globaux que l'aménagement littoral ou le rechargement d'une plage, comme par exemple l'existence de mouvement sédimentaires près des plages ou des ouvrages, avant et après tempêtes. Dans le cas le sédiment va et vient, et l'herbier disparaît et ré-apparait. Comment alors interpréter les valeurs du déchaussement ? Quelle est dans ce cas l'utilité de la mesure de ce paramètre ?

- La mesure du taux d'épiphytes est elle aussi difficile à interpréter. Ce taux dépend de la saison, du lieu du prélèvement retenu pour le suivi. L'analyse du taux d'épiphytes implique alors de prendre une station de référence, et dans ce cas la question se pose du lieu de cette station dont vont dépendre tous les résultats.

Nous préconisons la combinaison d'une méthode surfacique (locale ou globale) avec la prise éventuelle d'information complémentaire et ponctuelle.

Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies
Configuration de type "petits fonds"

Stratégie globale surfacique : cartographie globale		**Tout le secteur**		**Tous les 3 à 6 ans**
Méthodes	**Illustration**	**Info globale**	**Export**	**Avis Technique**
Télédétection aérienne		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation Évolution de la limite sup.	Global très précis Moyenne à haute résolution
Télédétection satellitale		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation Évolution de la limite sup.	Reproductibilité
Sonar latéral tracté		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement grand fond	Indice de conservation Évolution des limites	Pas adapté aux très petits fonds
Sonar latéral /coque DGPS		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation Évolution des limites	Global précis Moyenne résolution
Monitoring RTK Fusion multi-capteurs		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Rugosité Sédiment	Indice de conservation Évolution des limites	Global très précis Moyenne résolution
Monitoring RTK HR Fusion multi-capteurs			Indice de conservation Évolution des limites	Global très précis Haute résolution
SACLAF DIVA croisé		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Sédiment	Indice de conservation à basse résolution Évolution des limites	Maillage très lâche Seul système utilisable par très petits fonds sans visibilité
Stratégie locale micro-surface & linéaire		**N micro-zones**		**Tous les 3 à 6 ans**
Méthodes	**Illustration**	**Info locale**	**Autres**	**Avis technique**
Télémétrie acoustique		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation local Évolution des limites	Haute résolution pour suivi local
Balisage type RSP tous les 5 m		Limite supérieure Limite inférieure	Indice de conservation local précis Évolution des limites	
Carré permanent		Recouvrement	Évolution de la limite	
Transect permanent		Recouvrement	Indice de conservation local	
Stratégie ponctuelle		**N points de réseau**		**Tous les 3 ans**
Méthodes	**Illustration**	**Info ponctuelle**	**Autres**	**Avis technique**
RSP Plongeur Balise 10 paramètres		Recouvrement ponctuel + 10 autres paramètres	Évolution limite en un point Évolution vitalité	Tout n'est pas utile
Plongeur		Densité	Évolution vitalité	
Plongeur 17 paramètres		17 paramètres	Scientifique	Non utile pour les gestionnaires

Selon la taille de la zone on optera pour l'une des deux familles d'approches surfaciques (avis techniques vert ou jaune)
- La méthode de télémétrie acoustique en utilisation surfacique (avec donc le levé du recouvrement) typiquement pour zones de 100 à 300 m de côté.
- Une approche par télédétection acoustique ou aérienne (si la profondeur le permet) adaptée aux zones de plusieurs centaines de mètres de côté.

L'approche surfacique est complétée par des observations ponctuelles de la densité.

Remarque : La zone à surveiller étant de faible étendue, les méthodes globales de Monitoring RTK et SACLAF DIVA permettent de suivre l'intégralité de la zone, et ne doivent pas apparaître dans la section méthodes locales.
L'objectif est de suivre l'évolution de la limite supérieure, les approches de type carrés et transects permanents sont non adaptées.

III . RECHARGEMENT DES PLAGES

1. Rappel de l'impact

En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]

Le rechargement des plages en matériau sédimentaire afin de les réensabler peut constituer un grave problème écologique pour les écosystèmes benthiques à proximité, en raison de l'utilisation de matériaux inadaptés (limon, argile, matériel "terreux" d'une façon générale) qui modifient la granulométrie des sédiments meubles. Or, la nature des peuplements de substrat meuble est fortement liée à la granulométrie. L'emploi de matériaux inadaptés a également des effets négatifs sur l'herbier de posidonies.

L'impact direct, suite à une avancée du profil de la plage, est le **recul de la limite supérieure de l'herbier par recouvrement des posidonies.** L'impact indirect consiste lui en :

- une augmentation de la turbidité de l'eau, qui réduit l'intervalle de profondeur compatible avec la photosynthèse de la posidonie, et donc une remontée de sa limite inférieure.
- un envasement de l'herbier par dépôt de sédiments fins sur les feuilles (réduisant leur capacité photosynthétique) et une augmentation du taux de sédimentation.
- des modifications hydrodynamique et sédimentologique des fonds marins.

En résumé, les impacts majeurs sont :
- **Recouvrement** suite à une avancée du profil de la plage.
- **Embourbement des fonds** et **turbidité de l'eau.**

2. Et malgré tout : Le rechargement règle-t-il de façon durable le recul des plages?

Le rechargement des plages a pour objet de contrebalancer une situation (érosion de la plage, déficit en sédiment) qui, généralement, s'est instaurée en raison de l'altération de l'équilibre qui régnait auparavant. En fait, pour résoudre réellement un problème de ce type, de façon durable, il convient de s'attaquer à la cause, c'est à dire de corriger le facteur qui a déterminé le déséquilibre. Aujourd'hui, des stratégies plus souples et plus douces sont préconisées (En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]) (écoplage, stabiplage encore en expérimentation) mais la plus efficace des solutions est peut être naturelle ! On sait que les banquettes de feuilles mortes de posidonie sont un rempart très efficace contre les vagues. Ce rôle majeur est reconnu par la communauté scientifique depuis très longtemps. Ces derniers n'ont cessé d'alerter les élus locaux sur les risques qu'ils prenaient en nettoyant les plages systématiquement, souvent de façon mécanique et ce dès les vacances de printemps, ôtant ainsi les déchets mais également les feuilles mortes de posidonies. Bien évidemment, le risque sanitaire est à prendre en considération mais il est aussi important d'expliquer aux populations que les banquettes de posidonies ne sont pas des déchets ! En savoir plus → [Csil-Creocean 2011]

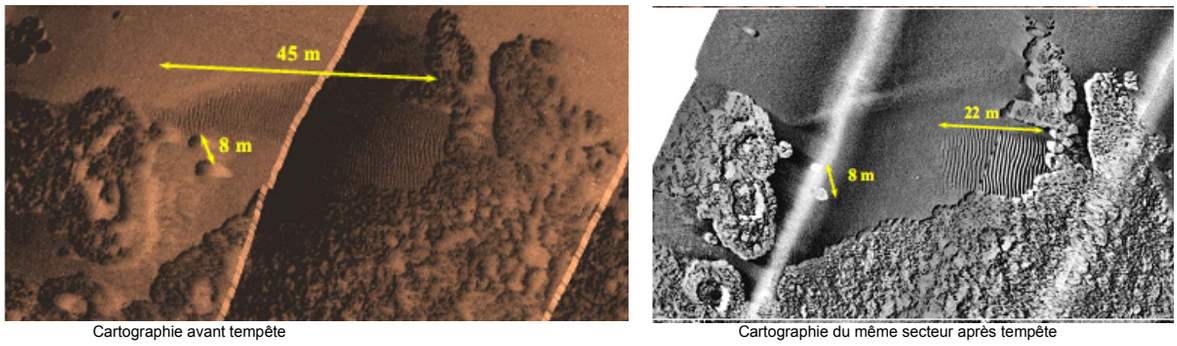
De plus, depuis quelques années, des tempêtes de plus en plus violentes et fréquentes mettent à mal les plages exposées aux coups de vent. Les élus locaux doivent faire face à ces changements climatiques tout en satisfaisant leurs administrés qui demandent "des plages propres" presque toute l'année. Pour comprendre les phénomènes en jeu et tenter de régler le déséquilibre à sa source, des études sur plusieurs années sont nécessaires. La technique du mille feuilles (feuilles mortes-sable) est peut être une solution.

Alors faut-il continuer à retirer ces banquettes au risque de voir disparaître les plages ?

3. Règles ou recommandations

Quand malgré tout, le réensablement d'une plage est nécessaire, les règles suivantes devraient être respectées :

- Pas de décharge de matériaux sédimentaires directement sur les herbiers de posidonies.
- Etudier les solutions alternatives douces.
- Définition d'un projet prévoyant un profil de plage équilibré.
- Prévision d'un périmètre de précaution autour des herbiers.
- Prévision de l'évolution des fonds marins, éventuellement au moyen de modèles mathématiques.



Cartographie avant tempête — Cartographie du même secteur après tempête

Figure 26: Exemple de résultats de monitoring de la limite supérieure de l'herbier au voisinage d'une plage. La méthode de monitoring permet de mettre très précisément en évidence des déplacements sédimentaires Dans cet exemple ces déplacements sont dus aux tempêtes.

Les données acquises dans le cadre de Litto3D (Bathymétrie et topographie) seront prochainement accessibles à la sphère publique. En savoir plus → Site Crige Paca.

4. Conclusions : Préconisations de suivi dans le cadre du rechargement des plages

(Cf. page précédente)

IV . AQUACULTURE (FERMES PISCICOLES ET MYTILICULTURE)

1. Rappel de l'impact

En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]

Le terme aquaculture recouvre toutes les activités ayant pour objet la production et la commercialisation d'espèces aquatiques, qu'il s'agisse de plantes ou d'animaux, d'eau douce, saumâtre ou salée, d'une partie ou de la totalité du cycle de reproduction.

La mise en place de fermes aquacoles dans les eaux côtières s'est accélérée au cours des dernières années. Les études réalisées montrent clairement que les fermes piscicoles, quand elles sont situées à proximité d'un herbier de posidonies, ont un impact fort sur celui-ci : diminution de la densité des faisceaux et baisse de la production primaire de la plante.
Il semble que la cause principale de l'impact des fermes piscicoles soit la libération de matière organique [Boudouresque *et al.* 2006]. De plus l'ombre portée des cages, en limitant l'accès à la lumière, réduit la densité des faisceaux.

En l'absence d'un modèle prédictif permettant de prévoir de façon précise l'impact sur l'herbier de posidonies d'un projet de ferme piscicole en fonction de sa localisation (profondeur, distance à la côte, circulation des eaux, etc.) et de ses caractéristiques (espèce produite, tonnage prévu, charge prévue dans les cages en kg de poisson/m^3, techniques d'élevage, type d'aliment utilisé, etc...), et compte tenu du caractère irréversible des dommages éventuellement causés à l'herbier, il est conseillé par la communauté scientifique française d'appliquer le principe de précaution. Une étude d'impact, selon le modèle sur lequel elle s'appuie, peut proposer des prédictions optimistes, c'est à dire l'absence probable d'impact. Mais s'il s'avère qu'il y a un impact sur l'herbier, celui-ci sera irréversible à l'échelle humaine.

2. Et malgré tout : le développement de l'aquaculture est-il antagoniste avec la préservation des herbiers de posidonies?

En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 15 sites sont exploités pour l'élevage de poissons, avec une production annuelle de 1500 tonnes de loups et daurades qui fait de cette région, la 1ère région française pour la pisciculture marine de pleine mer.

Même si des erreurs ont été faites par le passé en implantant parfois des cages aquacoles directement au dessus des herbiers de posidonies, des efforts considérables ont été fait depuis par les aquaculteurs pour limiter l'impact des élevages sur le milieu naturel. Notons que ces derniers ont constaté que la dégradation de l'herbier s'est limitée majoritairement à l'ombre portée des cages et évolue peu.
De plus, l'internationalisation des marchés et le développement rapide des activités aquacoles en Méditerranée a nécessité de la part des producteurs régionaux de développer des programmes d'identification et de certification de la qualité de leurs produits pour se démarquer de la concurrence. C'est ainsi que les premiers labels "Agriculture Biologique" et "Label rouge" pour le loup et la daurade sont nés en région.
Si la qualité de la production régionale est largement reconnue par les consommateurs, cette activité souffre encore d'une faible acceptabilité sociale par les habitants alors que la capacité de diversification de l'aquaculture vers de nouvelles espèces est au cœur des préoccupations des producteurs.

Et si le partage de l'espace littoral (social), le maintien des herbiers de posidonies (environnement) et la volonté de produire des produits de qualité (économie) étaient complémentaires... ?

3. Règles ou recommandations

Pour ce qui concerne les secteurs où les herbiers de posidonies sont présents, les recommandations suivantes sont donc proposées (En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]). Elles représentent de nombreuses difficultés pour l'aquaculteur :

- Aucune structure aquacole ne doit être directement implantée sur un herbier.
- S'il existe un herbier à proximité, une distance minimale de 100 m, par rapport aux cages, doit être respectée. Cette distance doit être portée à 200 m, à proximité de la limite inférieure de l'herbier (plus sensibles à la turbidité que les herbiers superficiels), et modulée en fonction de la courantologie et de la taille de la ferme.
- La présence d'un hydrodynamisme élevé (dirigé préférentiellement vers le large).

4. Conclusions : Préconisations de suivi dans le cadre des fermes aquacoles

(Cf. page suivante)

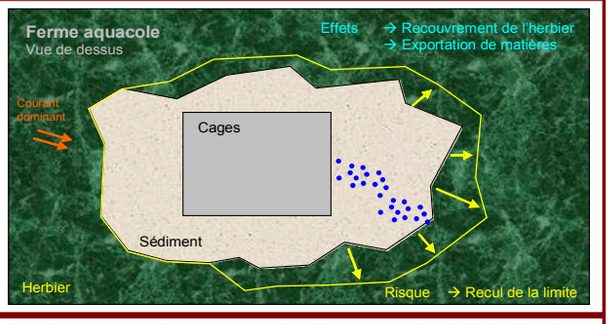
Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies
Aquaculture & Station d'épuration

Ces deux applications se traitent de façon similaire car elles admettent généralement la même gamme de profondeur, de type "grands fonds" et les mêmes effets.

Ferme aquacole & Station d'épuration

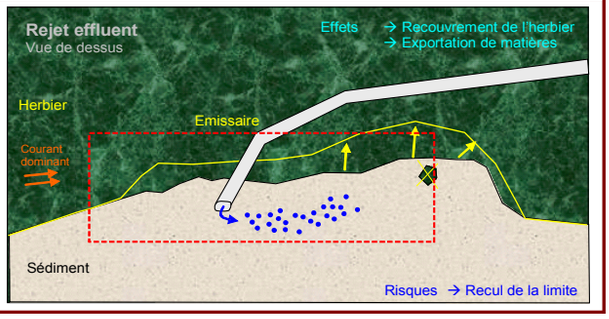
Effet = recouvrement herbier + exportation de matière

Risque = modification de la limite de l'herbier



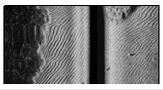
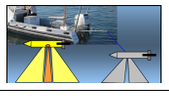
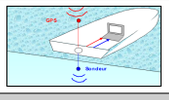
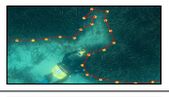
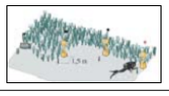
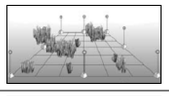
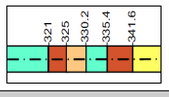
Descripteurs à suivre :
Limite et recouvrement surfacique
+ densité + épiphytes

Etendue : Emissaire : +/- 200 m de chaque côté
Ferme aquacole : périmètre interne de l'herbier : global (toute la zone) ou local



Nous préconisons la combinaison d'une méthode surfacique (locale ou globale) avec la prise éventuelle d'information complémentaire et ponctuelle.

Préconisations de suivi de l'herbier de posidonies
Configuration "grands fonds"

Stratégie globale surfacique : cartographie globale	Tout le secteur		Tous les 3 à 6 ans	
Méthodes	**Illustration**	**Info globale**	**Export**	**Avis Technique**
Télédétection aérienne		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation local Évolution de la limite sup.	Visibilité
Télédétection satellitale		Limite supérieure Recouvrement petit fond	Indice de conservation local Évolution de la limite sup.	Visibilité
Sonar latéral tracté		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement grand fond	Indice de conservation Évolution des limites	Global peu précis Haute résolution
Sonar latéral /coque DGPS		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation Évolution des limites	Global précis Moyenne résolution Pas adapté au delà de 20 à 25 m
Monitoring RTK Fusion multi-capteurs		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Rugosité Sédiment	Indice de conservation Évolution des limites	Global très précis Moyenne résolution Pas adapté au delà de 20 à 25 m
Monitoring RTK HR Fusion multi-capteurs			Indice de conservation Évolution des limites	Global très précis Haute résolution
SACLAF DIVA croisé		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement Bathymétrie Sédiment	Indice de conservation à basse résolution Évolution des limites	Global maillage lâche Bien adapté à toute profondeur et en l'absence de visibilité
Stratégie locale micro-surface & linéaire	**N micro-zones**		**Tous les 3 à 6 ans**	
Méthodes	**Illustration**	**Info locale**	**Autres**	**Avis technique**
Télémétrie acoustique		Limite supérieure Limite inférieure Recouvrement	Indice de conservation local Évolution des limites	Haute résolution pour suivi local
Balisage type RSP tous les 5 m		Limite supérieure Limite inférieure	Indice de conservation local précis Évolution des limites	
Carré permanent		Recouvrement	Évolution de la limite	
Transect permanent		Recouvrement	Indice de conservation local	
Stratégie ponctuelle	**N points de réseau**		**Tous les 3 ans**	
Méthodes	**Illustration**	**Info ponctuelle**	**Autres**	**Avis technique**
RSP Plongeur Balise 10 paramètres		Recouvrement ponctuel + 10 autres paramètres	Évolution limite et vitalité	Tout n'est pas utile
Plongeur Balise ou repère ou positionnement acoustique		Densité Épiphytes	Évolution vitalité	
Plongeur 17 paramètres		17 paramètres	Scientifique	Non utile pour les gestionnaires

Selon la taille de la zone on optera pour l'une des deux familles d'approches surfaciques (avis techniques vert ou jaune)
- La méthode de télémétrie acoustique en utilisation surfacique (avec donc le levé du recouvrement) typiquement pour zones de 100 à 300 m de côté.
- Une approche par télédétection acoustique (la profondeur ne permettant pas d'exploiter les données aériennes) adaptée aux zones de plusieurs centaines de mètres ou plus de côté.

L'approche surfacique est complétée par des observations ponctuelles de la densité et des épiphytes. Cela implique de prendre une station de référence.

Remarque : La zone à surveiller étant de faible taille, les méthodes globales de Monitoring RTK et SACLAF DIVA permettent de suivre l'intégralité de la zone, et ne doivent pas apparaître dans la section méthodes locales. L'objectif est de suivre l'évolution de la limite supérieure, les approches de type carrés et transects permanents sont non adaptées.

V . STATION ÉPURATION

1. Rappel de l'impact

En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]

D'une façon générale, les rejets d'effluents liquides agissent principalement à quatre niveaux sur les peuplements marins côtiers :

- diminution de la transparence de l'eau,
- augmentation de la concentration en nutriments,
- apport de contaminants chimiques,
- déssalure.

Les rejets des stations d'épuration présentent une teneur élevée en nutriments et en matière organique particulaire. Ils réduisent la transparence des eaux directement (particules en suspension) ou indirectement en favorisant le développement du plancton. Cela se traduit sur les herbiers en profondeur par une diminution de la densité des faisceaux de feuilles, morcellement de l'herbier et remontée de la limite inférieure. Les rejets de type urbain et industriel agissent également directement sur les herbiers à travers la présence de xénobiotiques (détergents, hydrocarbures, pesticides…). Ces polluants agissent à différents niveaux en fonction de leurs caractéristiques chimiques : racines, rhizomes et/ou feuilles.

2. Et malgré tout : les stations d'épuration arrivent-elles à traiter toutes les pollutions d'origine terrestre?

Depuis plus de 20 ans, des efforts considérables ont été menés par les pouvoirs publics pour réduire les pollutions issues des activités anthropiques (domestiques, mais aussi industrielles, agricoles ou touristiques) et rejetées en mer. Avec la création de stations d'épuration sur l'ensemble du littoral de la façade maritime, ce sont des investissements considérables qui ont été faits et un abattement des pollutions important, notamment pour la matière organique. La qualité des eaux littorales s'en est vue nettement améliorée. Les limites supérieures des herbiers de posidonies ont, dans la plupart des, cas amorcé une tendance à la progression.

Néanmoins, il faut rester vigilants car de nouveaux polluants apparaissent et leur réduction semble très complexe de part les phénomènes chimiques en jeu. En effet, une altération chimique de la qualité des eaux littorales a été récemment mise en évidence, notamment dans les secteurs fortement urbanisés ou industrialisés. De nouveaux polluants comme les produits pharmaceutiques, les hormones ont été identifiés. La consommation de produits pharmaceutiques par la population peut donc avoir des effets indirects et nouveaux sur les espèces marines.

Comment les herbiers de posidonies vont réagir face à ces nouvelles molécules présentes dans l'eau de mer ?

3. Règles ou recommandations

Pour toutes ces raisons, aucun émissaire d'eaux usées ne devrait déboucher dans un herbier. Et ceci, quelque soit le niveau d'épuration car il s'agit d'eau douce qui ne convient pas à la croissance de la plante. Que les émissaires soient anciens ou récents, il convient de mettre en place un suivi des herbiers les plus proches afin de vérifier que le niveau d'épuration est suffisant.

Dans le cas des émissaires anciens, si une zone de "mattes mortes" entoure déjà le point de rejet, il convient de suivre son évolution. Si la situation est stabilisée et surtout s'il y a début de récupération par l'herbier, à la suite de la mise en service de la station d'épuration ou de l'amélioration de son taux d'épuration des eaux usées, il n'est généralement pas nécessaire d'entreprendre des travaux coûteux pour le déplacement de l'émissaire ou pour sa prolongation au delà des limites de l'herbier. Dans le cas de nouveaux émissaires, une distance minimale devrait être prévue entre le point de rejet et les herbiers les plus proches.

Pour ce qui concerne la canalisation de rejet des eaux, et dans le cas de nouvelle mise en place, il convient d'éviter la traversée d'un herbier de posidonies, ou de minimiser la longueur d'herbier traversée. Lorsque la canalisation traverse un herbier, elle ne doit pas être ensouillée (= enterrée). Par ailleurs, pour diverses raisons (vieillissement des matériaux, choc avec des engins de pêche, etc.), il n'est pas rare que ces canalisations présentent des fuites. Les inspections doivent donc être régulières (tous les ans).

4. Conclusions : Préconisations de suivi dans le cadre des station d'épuration

(Cf. page précédente)

VI . Balisage des activités nautiques - Ancrages - Mouillages organisés

1. Impact du balisage des activités nautiques

La densification des usages, liée à la vocation touristique du littoral, a entraîné depuis plusieurs années, une multiplication des dispositifs de balisage estival des zones de baignade. Les communes ont la charge de ce balisage. Certaines communes, soucieuses de préserver la qualité des fonds marins, sources de développement économique non négligeable, se sont engagées dans une politique de préservation de leur littoral. A ce titre, elles souhaitent limiter l'impact de ces balisages sur les herbiers et optent pour une solution simple et efficace : l'utilisation d'un corps morts équipé d'une bouée de rappel immergé qui limite l'impact de la chaîne sur le fond. De plus, ces communes ont fait le choix judicieux de ne pas retirer chaque année les « corps morts » mais de noter avec précisions les coordonnées GPS de chacun d'eux, afin de pouvoir les retrouver l'année suivante.

Le choix du lieu d'immersion du « corps morts » est donc primordial la 1ère année. Il n'est pas nécessaire de réaliser une cartographie précise de la bande des 300 mètres de la commune. Le bons sens des techniciens suffira à ne pas placer les "corps morts" dans les zones d'herbier. Si cela s'avérait impossible, des systèmes d'ancrages non destructifs existent et pourront être installés uniquement dans les secteurs où l'herbier est présent.

2. Impact des ancrages des petits navires

En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]

Le tourisme et la navigation de plaisance jouent un rôle social et économique majeur en Méditerranée. Même si l'ancrage génère des dommages à l'herbier, l'impact n'est sans doute pas significatif pour la plus grande partie des herbiers.



Recommandations ancrages petits navires

Il convient alors de recommander aux plaisanciers d'éviter de jeter l'ancre dans l'herbier (comme cela est illustré sur la photo ci-contre) et si cela n'est pas possible, de ne pas relever l'ancre en se halant sur elle mais placer d'abord le bateau à la verticale de l'ancre avant de la relever.

Des campagnes d'information des plaisanciers du type "Ecogestes Méditerranée" favorisent ces changements de comportements.

3. Impact des ancrages des gros navires

Le fait que l'ancrage des gros navires (yachts, navires de la Marine Nationale française, navires de croisière) puisse causer une dégradation de grande ampleur de l'herbier de posidonies a déjà été mis en évidence par plusieurs auteurs, en particulier dans la baie de Cannes et la rade de Hyères. Le temps nécessaire pour la recolonisation naturelle d'une surface d'herbier telle que celle qui a été détruite et observée par le SIVOM du littoral des Maures (5000 m2) est de l'ordre du siècle.



Figure 27: Impact des navires de grande taille. Monticule de posidonies mortes formé par le labourage d'une ancre. @Casalta B. - Obs marin

Recommandations

Pour ce qui concerne l'impact des mouillages de grosses unités (bateaux militaires, croisiéristes), il convient de procéder à une cartographie précise du secteur et si possible, de recommander le mouillage dans des zones de grandes tailles, dépourvues d'herbier de posidonies (100 à 200 m de diamètre), dont les coordonnées géographiques seront transmises aux autorités compétentes.

Les cartographies biocénotiques devraient systématiquement être intégrées dans les systèmes de navigation (au standard de navigation S57). Elles permettraient ainsi aux marins de se positionner facilement par rapport à l'herbier de posidonies.

Dans le cas où un coffre est mis en place en surface, relié à un système de chaînes (3 ou 4 branches terminées par une ancre) réunies au centre par une plaque métallique ("affourchage"), en plus de ce qui précède, il est préférable de :

- Réduire au maximum l'impact du pendeur et de l'affourchage, calculer pour cela la longueur minimum de pendeur qu'il est nécessaire de prévoir pour l'élasticité du coffre, installer une bouée de rappel à profondeur intermédiaire afin d'éviter que le pendeur et l'affourchage n'érodent la "matte";
- Réduire les travaux d'entretien (remontée des chaînes et des ancres) et replacer ces structures le plus précisément possible aux emplacements où elles se trouvaient.

4. Et malgré tout : les dégradations liées aux ancrages ne sont-elles pas attribuées par erreur aux plaisanciers?

Le développement de la plaisance sur le littoral de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur n'est pas sans générer quelques pressions sur le milieu naturel. Cependant, ce n'est pas moins le nombre que la qualité des comportements des pratiquants qui est en jeu. En effet, si tous les pratiquants d'activités nautiques étaient sensibilisés aux risques de dégradation que peut engendrer leur pratique, ils seraient en mesure d'adopter des comportements respectueux du milieu et ainsi ne pas engendrer de dégradations. C'est souvent par méconnaissance que les usagers exercent des pressions sur les fonds marins. Les efforts de sensibilisation doivent donc être poursuivis… mais attention à ne pas oublier certains publics !

Les croisiéristes et les grands yachts sont-ils conscients de l'impact de leurs ancres sur les zones d'herbiers ?

Des études réalisées sur les iles de Lérins ne mettent pas en évidence d'impacts des mouillages des petites unités sur ce territoire…
Les figures ci-dessous présentent un exemple de résultats du suivi de l'herbier de posidonies, réalisé par la société Andromède Océanologie, entre les iles de St Honorat et l'ile Ste Marguerite (Cannes) entre 1924 et 2011.

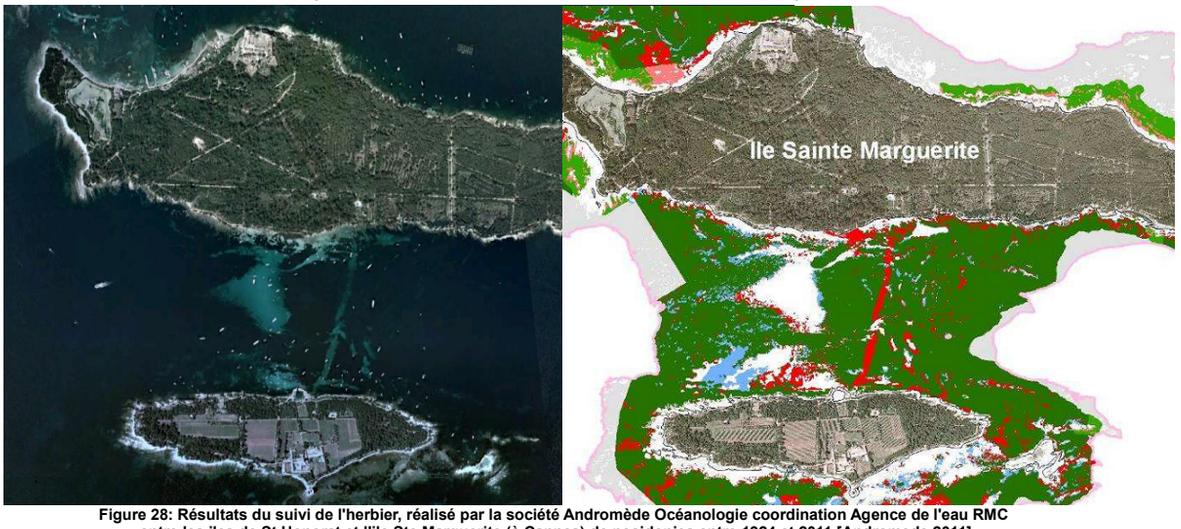


Figure 28: Résultats du suivi de l'herbier, réalisé par la société Andromède Océanologie coordination Agence de l'eau RMC entre les iles de St Honorat et l'ile Ste Marguerite (à Cannes) de posidonies entre 1924 et 2011 [Andromede 2011]
A gauche : Vue aérienne 2011 A droite : Évolution de l'herbier entre 1924 et 2011
En vert : Herbier stable. En Bleu : Herbier en progression. En rouge : Herbier en régression

Entre ces îles, le creusement d'une tranchée en 1992, au moyen d'une pelle mécanique embarquée sur un chaland, pour la protection d'un câble électrique EDF, a eu un impact important sur l'herbier. L'observation à l'échelle globale montre aussi des zones de recolonisation depuis 1924, y compris dans la zone des mouillages. Le triangle de sable entre les iles a très peu évolué entre 1924 et 2011.

Et si l'organisation des mouillages sous prétexte de préservation des fonds marins était un moyen de répondre à une demande croissante de places dans les ports ?

5. Préconisations de suivi de l'impact des ancrages sur l'herbier de posidonies

→ S'il n'y pas d'herbier de posidonies dans la zone de mouillage

Il n'y a pas de besoin de suivi, ni en terme d'organisation, ni en terme de suivi.

→ Si la zone de mouillage inclue un herbier de posidonies

Au delà d'une certaine taille de navire, de densité et fréquence de mouillage, il est clair que la croissance des rhizomes ne parvient plus à recoloniser les ouvertures et les sillons creusés dans la "matte", et l'herbier se dégrade progressivement : la densité des faisceaux de feuilles diminue, ainsi que le recouvrement.
Le problème peut ainsi se poser au niveau de certains secteurs, souvent d'étendue limitée, très appréciés des plaisanciers en raison de la beauté des paysages ou de l'abri qu'ils offrent. Lorsque la densité et la fréquence des ancrages sont considérables, et ce pendant une grande partie de l'année, des mesures de gestion s'avèrent nécessaires.
Dans ce cas deux possibilités se présentent ; soit le mouillage est déjà organisé, soit il ne l'est pas.

→ Si le mouillage est organisé

Dans ce cas il est préconisé un suivi tous les 10 ans de l'ensemble de la zone.
Ce suivi s'articule autour d'une cartographie globale de la zone avec un choix de la méthode en fonction de la gamme de profondeur.

→ Cf. Tableau des méthodes préconisées par petits fonds en page 79, ou par grands fonds en page 83.

→ **Si le mouillage n'est pas organisé**, et si le nombre de mouillage de bateaux, surtout de grande taille, est important (typiquement supérieur à 10 bateaux/ha (en période pointe) ou 2 ancrages/ha/jour (en moyenne annuelle), il est recommandé d'effectué un contrôle sous l'eau afin d'observer d'éventuels signes visuels de dégradation. Des études réalisées au Parc National de Port Cros ont montré que tous les herbiers ne réagissent pas de la même façon à l'action des ancres et que l'analyse de la compacité de la matte peut permettre de comprendre la dynamique de l'herbier et d'expliquer de fortes dégradations.
L'analyse de ces données aboutit à une prise de décision.

→ **Soit la menace sur l'herbier est avérée** et il est recommandé la mise en place d'actions de gestion.

→ **Soit la menace sur l'herbier est mitigée** et il est recommandé la mise en place d'un programme de suivi.
Les effets attendus, risques et descripteurs pertinents sont les suivants :

Effet :	**Risque**	**Descripteur**
→ arrachage des faisceaux	Éclaircissement prairie	Densité
→ arrachage de la matte	Réduction IC	
Recouvrement		

→ Cf. Tableau des méthodes préconisées par petits fonds en page 79, ou par grands fonds en p 83 avec une récurrence de 3 à 6 ans.

Selon la taille de la zone on optera pour l'une des deux familles d'approches surfaciques (avis techniques vert ou jaune)
- La méthode de télémétrie acoustique, très précise, en utilisation surfacique (avec donc le levé du recouvrement) typiquement pour zones de 100 à 300 m de côté.
- Une approche par télédétection acoustique ou aérienne (si la profondeur le permet), ou par sonar de coque, moins précise que la télémétrie acoustique mais adaptée aux zones de plusieurs centaines de mètres ou plus.
L'approche surfacique permettra d'analyser le morcellement de l'herbier

Elle est complétée par des observations ponctuelles de la densité.

→ Remarque : Etude de la recolonisation des herbiers
L'étude de la recolonisation des herbiers n'a d'intérêt que si elle est surfacique, et si elle permet d'enregistrer une modification, donc il faut un intervalle de temps entre deux observations qui soit assez grand, typiquement de l'ordre de la dizaine d'années.

→ En savoir plus : CF. Stratégie méditerranéenne de gestion des mouillages des navires de plaisance [Dreal et al. 2010].

VII . RÉCIFS ARTIFICIELS

1. Rappels de l'impact

Les récifs artificiels désignent des structures immergées volontairement, dans le but de créer, protéger ou restaurer un écosystème riche et diversifié. Ces structures peuvent induire chez les animaux des réponses d'attraction, de concentration, de protection et, dans certains cas, une augmentation de la biomasse de certaines espèces. L'implantation de récifs artificiels au sein d'habitats prioritaires parfaitement fonctionnels (au sens de la directive n°92/43 du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages, dite directive "Habitats") doit être évitée. Cette catégorie d'habitats recouvre en Méditerranée les herbiers de posidonies et les lagunes côtières.

En savoir Plus → stratégie pour l'implantation des récifs artificiels de la DIRM

Les récifs artificiels sont ainsi généralement placés dans le sable, loin des herbiers de posidonies.
Leur impact sur l'herbier de posidonies est faible.

- En effet, le récif apporte peu de polluants organiques.
- D'autre part, étant installé dans de grandes profondeurs, il engendre de faibles modifications hydrodynamiques.

Tout comme l'évolution de la limite inférieure de l'herbier est difficilement interprétable [Mayot 2007], l'herbier étant soumis à un ensemble de pressions, dont les effets sont mêlés, le lien "état/pression" des récifs sera difficile à isoler et à mettre en évidence.

2. Préconisations de suivi

Si les récifs sont placés au large, compte tenu du faible impact des récifs sur l'herbier de posidonies, il n'y a pas de préconisation de suivi.
Si ceux-ci sont placés à proximité des herbiers, ou sur l'herbier, un suivi est préconisé, tous les 10 ans environ, sur l'ensemble de la zone. Ce suivi s'articule autour d'une cartographie globale de la zone avec un choix de la méthode en fonction de la gamme de profondeur.

→ Cf. Tableau des méthodes préconisée par petits fonds en page 79, ou par grands fonds en page 83.

VIII . Déblais de dragage – Déchets solides

1. Rappel de l'impact

En savoir plus → [Boudouresque *et al.* 2006]

Une fois construits, les ports ont généralement tendance à s'envaser, à des vitesses variables. Des dragages périodiques sont donc nécessaires, et le problème qui se pose est alors celui du rejet des boues de dragages et de leur impact. Ces boues sont rarement stockées à terre ; en effet, pour minimiser les coûts, elles sont le plus souvent rejetées en mer dans des sites de dumping (ou clapage) désignés à cet effet, à condition que leur teneur en polluants soit modérée.
La croissance verticale des rhizomes orthotropes de posidonies ne permet pas à l'herbier de résister à un apport sédimentaire de plus de 5-7cm/an. Le rejet sur l'herbier de matériaux plus ou moins meubles, issus du dragage de ports ou de chenaux, a donc un impact très négatif et **est interdit par la loi.**

En effet cet **impact sur l'herbier de posidonies est direct, par ensevelissement** au niveau du point de rejet.

L**'impact est également indirect** : la remise en suspension des sédiments, qui se déposent plus loin, provoque l'envasement de zones d'herbier situées au voisinage. Par ailleurs, la remise en suspension des particules fines accroît la turbidité de l'eau, or la posidonie, organisme photosynthétique, a besoin de lumière.

Lorsque les rejets sont constitués par des blocs de roche, provenant de travaux à la côte, en particulier de déroctage, l'impact direct est bien sûr dû au recouvrement (irréversible) de l'herbier de posidonies. Un impact indirect est également possible, en raison de l'hydrodynamisme, par érosion autour des blocs s'ils sont de grande taille et par déplacement de ces blocs s'ils sont petits. Cet impact est comparable en partie à celui des "corps morts" mis en place dans les mouillages organisés ou forains.
Enfin, il convient de mentionner les rejets de macro déchets d'origine humaine (bouteilles, batteries, pneus, moteurs, etc...) qui, outre l'éventuelle pollution et la détérioration esthétique des paysages sous-marins qu'ils engendrent, quel que soit l'écosystème concerné, ont le même effet sur l'herbier que les blocs de roche.

Les impacts majeurs provoqués les rejets de déblais de dragage et des déchets solides (macro-dechets) sont les suivants :
- **Destruction** des habitats provoquée par les opérations de dragage, suivie également de l'**érosion des fonds marins**, indirectement induite par l'intervention;
- **Souffrance et/ou recouvrement** des posidonies limitrophes à cause des matières en suspension.

2. Règles ou recommandations

Dans ce cas des mesures préventives peuvent être prises :

- Connaissance de la distribution des posidonies et de leur profondeur;
- En France, les travaux de dragage et de rejet sont soumis à déclaration, en application de la Loi n° 92-3 modifiée du 3 janvier 1992 sur l'eau et de l'Arrêté interministériel du 23 février 2001. L'autorisation est délivrée par le préfet du département, suite à l'instruction du dossier par la Direction Départementale des Territoires et de la Mer. Ainsi aucun rejet de produits de dragage ou de blocs de roche n'est autorisable sur un herbier, de même que la réalisation de dragage dans les aires abritant des posidonies.
- Prévision d'un périmètre de précaution pour les herbiers dans le cas de dragages réalisés dans une zone limitrophe et balisage en surface des herbiers proches pendant les travaux de dragage et de déroctage – installation d'écrans géotextiles protecteurs.
- Dans les pays de l'Union Européenne, les autorisations de dumping (clapage) précisent normalement des points de rejet éloignés de la côte, et donc qui ne sont pas situés sur des herbiers de posidonies. Toutefois, il a été souvent constaté que des entreprises de travaux publics chargées de ces rejets, en l'absence d'une surveillance active de la part des autorités, raccourcissent, parfois considérablement, la distance de rejet. Des rejets de blocs rocheux ou de produits de dragage ont ainsi été faits directement sur l'herbier de posidonies.
- Le choix de l'entreprise chargée des travaux est donc important. Les collectivités territoriales qui, dans le cadre d'une procédure d'appel d'offre, choisissent très logiquement le moins disant (le moins cher) doivent être conscientes du fait qu'un coût exagérément bas peut impliquer ipso facto le non-respect du cahier des charges, et donc des rejets beaucoup plus proches du site de dragage que prévu (éventuellement sur l'herbier de posidonies). Par ailleurs, il est très choquant que ce soit souvent des particuliers et des ONG qui alertent les autorités sur le rejet des produits de dragage et de blocs de roche sur l'herbier à de posidonies, et donc du non respect du cahier des charges. Cette absence de vigilance pourrait en effet être interprétée comme de la complaisance.

3. Préconisations de suivi

Si les recommandations préconisées dans [Boudouresque *et al.* 2006] sont respectées, l'impact est minimal, et il n'y a pas de préconisation de suivi.

IX . Canalisation et câbles sous-marins

1. Rappel de l'impact

En savoir plus → [InterregIIIB Posidonia 2007 - a] [Boudouresque *et al.* 2006]

Il est fréquent qu'il soit nécessaire d'installer sur le fond de la mer, un câble ou une canalisation "sea-line". Le Maître d'Ouvrage a fixé au préalable les points de départ et d'arrivée, à terre ("atterrage" ou "atterrissage"), de la canalisation ou du câble, en fonction de trois impératifs:

- Trajet en mer (supposé en ligne droite) le plus court possible;
- Coût des travaux à terre et de l'enfouissement pour atteindre ces points de départ et d'arrivée;
- Sécurité de la pose par rapport aux risques de déplacement et de dégradation liés aux usages (ancrage, pêche aux arts traînants).



En résumé, les impacts majeurs sont :
- **Destruction** des herbiers de posidonies à proximité de l'aire destinée à la mise en place de la conduite.
- **Déracinement et recouvrement** des herbiers de posidonies à proximité des ouvrages à cause de l'altération des courants et des transports solides.
- **Recouvrement** des herbiers de posidonies provoqué par les ouvrages et des corps-morts d'ancrage (si la conduite est seulement apposée sur le fond réduction de l'impact).

2. Règles ou recommandations

Pour minimiser l'impact sur les herbiers de posidonies, il est nécessaire [InterregIIIB Posidonia 2007 -a] :

- De choisir un tracé le plus court possible dans l'herbier de posidonies.
- Que le Maître d'Ouvrage propose ainsi un minimum de points de départ et/ou d'arrivée à terre (en fonction des contraintes d'atterrage). Il peut hiérarchiser ces variantes, en expliquant les motifs : surcoût dû à la longueur en mer, surcoût lié aux travaux à terre ou en mer (déroctage), etc...
- De disposer d'une carte précise (entre le 1/1000 et le 1/5000) de la nature des fonds (roche, sable, vase, etc...) et de leurs peuplements, tout particulièrement de l'extension de l'herbier, de son recouvrement et des types d'herbier présents, mais également des autres peuplements à valeur patrimoniale. Le taux de déchaussement des rhizomes de posidonies doit être évalué.
- D'établir, le long des différents tracés envisagés ou proposés (scénarii), des profils bathymétriques très précis, tout au moins dans les secteurs à fort dénivelé. La présence de ces dénivelés (tombants de "matte", intermattes érosives, etc...) peut en effet rendre nécessaire l'ensouillage.
- De bannir, dans toute la mesure du possible, le choix technique de réaliser une tranchée dans l'herbier de posidonies, destinée à accueillir la canalisation ou le câble. La simple pose de la canalisation sur le fond est possible quand l'hydrodynamisme est faible, en particulier à partir de 10 m de profondeur.
- **Mise à part la faible destruction de l'herbier par ensevelissement direct, les impacts indirects sur l'herbier sont très limités. Dans le cas d'herbiers à bonne vitalité, l'impact peut même être nul : en effet, l'herbier tend à recouvrir le câble, et à " l'incorporer" dans la matte.**
- Lors des travaux de mise en place d'un câble ou d'une canalisation, il est impératif d'éviter que le navire câblier s'ancre dans l'herbier : il doit s'ancrer au delà de la limite inférieure de l'herbier.



- Connaissance de la distribution des herbiers de posidonies et de leur profondeur.
- Définition d'un tracé de câbles/conduites qui minimisera la superficie des posidonies impactées.
- Le creusement des tranchées à proximité des posidonies en état de conservation satisfaisante doit être réalisé exclusivement dans le cas où il n'existe pas d'alternative.
- Dans la mise en place de conduites sans creusement de tranchée, la pose de conduites et des corps-morts sera supervisée.

La mise en place d'une canalisation ou d'un câble sur l'herbier de posidonies constitue un aménagement dont on sait aujourd'hui optimiser la gestion. A condition de respecter les recommandations ci-dessus, l'impact sur l'herbier peut être extrêmement modeste, surtout lorsque la vitalité de l'herbier est bonne. S'il s'accompagne d'une interdiction effective de chalutage et d'ancrage (destinée à protéger la canalisation ou le câble), cet aménagement peut même s'avérer globalement positif : restauration des fonds et des habitats. En revanche, lorsque l'herbier est déjà dégradé, la mise en place de câbles ou de canalisations peut constituer un facteur aggravant susceptible d'accélérer localement sa régression [Boudouresque *et al.* 2006].

3. Préconisations de suivi

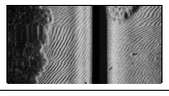
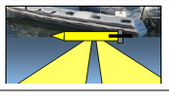
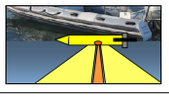
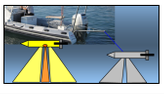
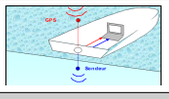
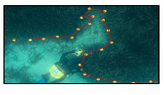
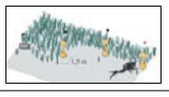
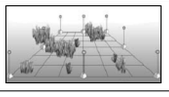
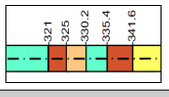
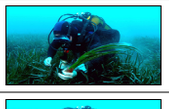
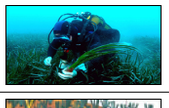
Si les recommandations préconisées dans [Boudouresque *et al.* 2006] sont respectées, l'impact est minimal, et il n'y a pas de préconisation de suivi.

X . CONCLUSIONS

L'analyse comparée des méthodes de surveillance de l'herbier de posidonies aboutit à la préconisation d'une démarche de surveillance qui repose :

- **sur une approche globale surfacique** de la couverture de l'herbier, accessible en raison de l'avènement récent de nouvelles technologies,
- **suivie d'une approche stationnelle** ciblée de sa vitalité dès lors que les impacts sont bien localisés.

Le tableau suivant présente pour chaque méthode, les suivis d'impact pour lesquels elle est particulièrement performante.

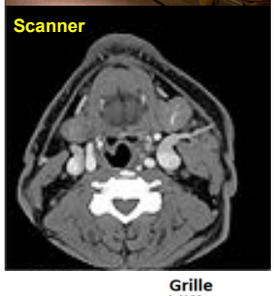
<table>
<tr><td colspan="2">Stratégie globale surfacique : cartographie globale</td><td colspan="2">Tout le secteur</td><td colspan="2">Tous les 3 à 10 ans</td></tr>
<tr><td>Méthodes</td><td>Illustration</td><td>0 m -Très petits fonds- 5 à</td><td>10 m -Moyens fonds- 15 à</td><td>20 m Grands fonds</td></tr>
<tr><td>Télédétection aérienne</td><td>  </td><td>Suivi à long terme
Aménagement littoraux & Rechargement de plages
Mouillages</td><td colspan="2" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Télédétection satellitale</td><td>  </td><td>Id
si reproductibilité possible</td></tr>
<tr><td>Sonar latéral tracté</td><td>  </td><td></td><td colspan="2">Suivi à long terme
Aquaculture & Stations d'épuration
Mouillages</td></tr>
<tr><td>Sonar latéral /coque DGPS</td><td>  </td><td colspan="2" rowspan="2">Suivi à long terme
Aquaculture & Stations d'épuration
Aménagement littoraux & Rechargement de plages
Mouillages</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Monitoring RTK
Fusion multi-capteurs</td><td>  </td></tr>
<tr><td>Monitoring RTK HR
Fusion multi-capteurs</td><td>  </td><td></td><td colspan="2">Suivi à long terme
Aquaculture & Stations d'épuration
Aménagement littoraux & Rechargement de plages
Mouillages</td></tr>
<tr><td>SACLAF DIVA croisé</td><td>  </td><td colspan="3">Suivi à long terme</td></tr>
<tr><td colspan="2">Stratégie locale micro-surface & linéaire</td><td colspan="2">N micro-zones</td><td>Tous les 3 à 6 ans</td></tr>
<tr><td>Télémétrie acoustique</td><td>  </td><td colspan="3">Suivi à long terme
Aquaculture & Stations d'épuration
Aménagement littoraux & Rechargement de plages
Mouillages</td></tr>
<tr><td>Balisage type RSP
tous les 5 m</td><td>  </td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>Carré permanent</td><td>  </td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>Transect permanent</td><td> 
</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Stratégie ponctuelle</td><td colspan="2">N points de réseau</td><td>Tous les 3 ans</td></tr>
<tr><td>RSP
Plongeur Balise
10 paramètres</td><td>  </td><td colspan="3">Recouvrement ponctuel + 7 à 10 autres paramètres</td></tr>
<tr><td>DCE
Plongeur</td><td>  </td><td colspan="3">Limites (profondeur et type)
et à -15m : Densité, Epiphytes - Surface foliaire
Suivi à long terme</td></tr>
<tr><td>Plongeur
17 paramètres</td><td>  </td><td colspan="3">Autres paramètres (17)</td></tr>
<tr><td>Plongeur
Balise ou repère ou positionnement acoustique</td><td>  </td><td colspan="3">Recouvrement ponctuel + densité + épiphytes
Aquaculture & Stations d'épuration
Aménagement littoraux & Rechargement de plages
Mouillages</td></tr>
</table>

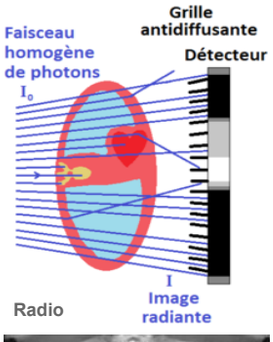
ET SI NOUS GÉRIONS L'HERBIER COMME NOTRE SANTÉ ?

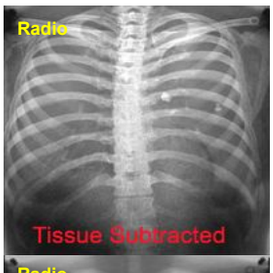
La démarche préconisée correspond à celle actuellement mise en œuvre dans le monde médical, et ce depuis que de nouvelles technologies performantes d'analyse surfaciques et volumiques du corps humain sont disponibles. Une prise de sang ou une biopsie ne permettent pas de surveiller la santé de l'homme ; elles sont effectuées dans un second temps, lorsque l'approche globale (imagerie médicale) en a démontré la nécessité et après qu'elle ait mis en évidence les zones à surveiller.

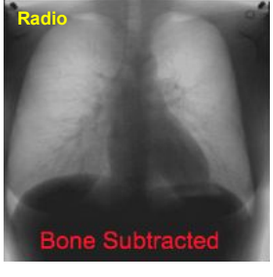








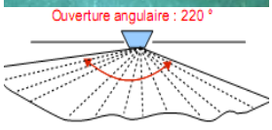




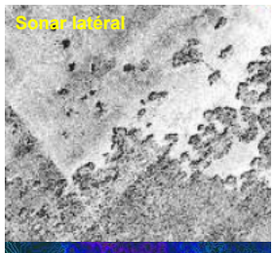
Le tableau suivant présente, de façon synthétique, les analogies entre ces deux domaines.

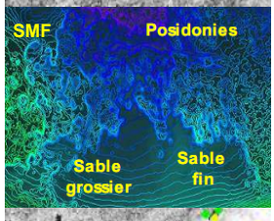
Surveillance de la santé de l'homme	Suivi de la santé de l'herbier
À une date T	
Le médecin commande une **analyse surfacique** auprès du spécialiste, qui est un radiologue. Le radiologue maitrise le fonctionnement de ses appareillages et réalise les acquisitions. • scanner • pet-scan • radiométrie • IRM • … Il stocke la donnée pour pouvoir la comparer avec les imageries futures.	Le gestionnaire commande une **analyse surfacique** de l'herbier de posidonies Le cartographe, acousticien océanographe ou le cartographe satellital, maitrise le fonctionnement des appareillages et réalise les acquisitions : • Image aérienne commandée à BD Ortho • Image satellitale • Mosaïque sonar latéral • Micro-cartographie par télémétrie acoustique • … Il bancarise la donnée pour pouvoir la comparer avec celle obtenue lors du retour ultérieur sur zone.
Pré-analyse des images	
Repérage des zones non-homogènes suspectes : • Définition de zones à contrôler • Spécifications des examens complémentaires invasifs	Segmentation des zones homogènes : • Choix de la stratégie d'échantillonnage • Définition du plan d'échantillonnage
Réalisation des **prélèvements** effectués par le biologiste : • prise de sang • biopsie...	Réalisation des **vérités terrain** effectuées par le biologiste • observations • mesures de la vitalité ...
Interprétation des images	
effectuée par le radiologue • Identification et classification des zone suspectes • Mesure de la surface et de l'étendue de ces zones (tumeurs...)	effectuée par le cartographe • classification des zones homogènes • production de la cartographie • mesure des étendues
Définition du protocole de suivi : zone à surveiller et récurrence temporelle	
A la date T + récurrence	
Nouveaux examens • imagerie • prélèvements	Retour sur zone • imagerie • observations, mesures de la vitalité
Analyse des résultats du monitoring • Analyse de l'extension des zones tumorales • Dimensionnement de la croissance ou de la diminution des surfaces tumorales • Expertise sur l'agressivité des cellules	Analyse des résultats du monitoring • Analyse de l'extension ou de la régression des surfaces d'herbier • Chiffrage grâce à l'indice de conservation • Expertise sur l'évolution des paramètres ponctuels de la santé de l'herbier

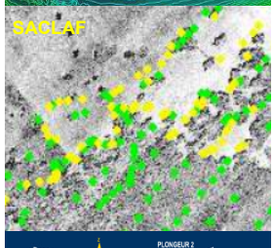


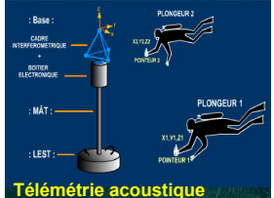


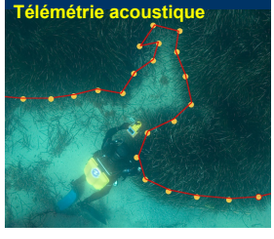
Largeur de fauchée :
jusqu'à 6 fois la hauteur d'eau











Chapitre 5 : Lexique - Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

[Andromede 2011] Andromède, 2011. Cartographie évolutive des herbiers de posidonies en Région PACA sur la période 1922 - 2011, Région Provence-Alpes-Côtes d'Azur, France.

[Bajjouk 2009] Bajjouk, T., 2009. Soutien aux actions NATURA 2000 de la région Bretagne - Cahier des charges pour la cartographie d'habitats des sites Natura 2000 littoraux : Guide méthodologique. Réf. RST/IFREMER/DYNECO/AG/09-01/TB/NATURA2000. 107 p + annexes.

[Bechaz & Boucquaert 2006]. Underwater positioning. Centimetric accuracy underwater-GPS. Rev. Hydro International. July-Aug 2006.

[Blouet *et al*. 2011] Blouet S., Lenfant P., Dupuy de la Grandrive R., Laffon J-F, Chéré E., Courp T., Gruselle MC., Ferrari B., Payrot J, 2011. Mise en cohérence des méthodes de suivis des herbiers de posidonies des sites Natura 2000 marins du Languedoc-Roussillon. Rapport ADENA-CNRS/EPHE/UPVD/CEFREM-CG66-AAMP, Fr 48p.

[Boudouresque *et al*. 1980]. Boudouresque C.F., Giraud G., Panayotidis P., 1980. Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc National). XIX : Mise en place d'un transect permanent. Trav. sci. Parc nation. Port-Cros, Fr., 6 : 207-221.

[Boudouresque & Meinesz 1982]. Boudouresque C.F., Meinesz A., 1982. Découverte de l'herbier de posidonie. Cahier n° 4 1982. Parc National de Port-Cros et Parc Naturel régional de la Corse.

[Boudouresque *et al*. 2006] Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Ramoge pub., Monaco: 1-202. N° ISBN 2-905540-30-3.

[Charbonnel *et al*. 2000] Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Bernard G., Bonhomme P., Patrone J., Kruczek R., Cottalorda J.M., Bertrandy M.C., Foret P., Ragazzi M., Le Direac'h L., 2000. Le Réseau de Surveillance Posidonies de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie : Présentation et Guide Méthodologique. Année 2000. Région PACA/ Agence de l'Eau RMC/GIS Posidonie/CQEL 13/CQEL 83/Conseil Général 06. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 1 76.

[Csil-Creocean 2011] CSIL et CREOCEAN. Bilan de la gestion des banquettes de posidonies en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Déc 2011. 85 p.

[Denis *et al.* 2003] 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. Cartographie des biocénoses marines Volet n° 1 : l'herbier à *Posidonia oceanica*. Guide méthodologique. Fév. 2003

[Descamp *et al*. 2009] Descamp P., Holon F., Ballesta L., 2009. Microcartographie par télémétrie acoustique de 9 herbiers de posidonie pour le suivi de la qualité des masses d'eau côtières méditerranéennes françaises dans le cadre de la DCE. Contrat L'Œil Andromède/Agence de l'Eau, CRLR, CRPACA. Andromède publ., Montpellier, Fr. :1-59pp. + annexes.

[Descamp *et al*. 2010] Descamp P., Holon F., Ballesta L., 2010. Développement et tests in situ d'une nouvelle technique de vérité terrain –le transect plongeur audio- pour la cartographie des biocénoses marines. Andromède publ., Montpellier, Fr. :1-46pp.

[Dreal *et al.* 2010]. DREAL PACA - Préfecture maritime de la Méditerranée - CETE méditerranée. Stratégie méditerranéenne de gestion des mouillages des navires de plaisance. Sept 2010. 66 p.

[Ehrhold 2003] Ehrhold A., 2003. L'application des Systèmes Acoustiques de Classification Automatique des natures de Fonds pour la cartographie des habitats : SACLAF. REBENT, Cartographie des peuplements macrobenthiques par les méthodes acoustiques en domaine subtidale, Fiche outil 1 : l'application des SACLAF, décembre 2003

[Fourqurean *et al*. 2012] Fourqurean J.W., Duarte C.M., Kennedy H., Marbà N., Holmer M., Mateo M.A., Apostolaki E.T., Kendrick G.A., Krause-Jensen D.,McGlathery K.J., Serrano O., 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Nature Geoscience, Volume : 5, p 505–509.

[Francour *et al.*1999] Francour P., Ganteaume A., Poulain M., 1999. Effect of boat anchoring in *Posidonia oceanica* seagrass beds in the Port-Cros national park (north-western Mediterranean sea). Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems, 9: p 391-400.

[Ganteaume *et al.* 2005] Ganteaume A., Bonhomme P., Bernard G., Poulain M., Boudouresque C.F., 2005. Impact de l'ancrage des bateaux de plaisance sur la prairie à *Posidonia oceanica* dans le Parc national de Port-Cros (Méditerranée nord-occidentale). Sci. Rep. Port-Cros natl. Park, Fr., 21 : 147 -162.

[Gobert *et al.* 2009] Gobert S., Sartoretto S., Rico-Raimondino C., Andral B., Chery A., Lejeune P., Boissery P., 2009. Assessment of the ecological status of Mediterranean French coastal waters as required by the Water Framework Directive using the *Posidonia oceanica* Rapid Easy Index: PREI. Marine Pollution Bulletin, Volume 58, Issue 11, November 2009, p 1727-1733.

[Gravez *et al.* 1995] Gravez V., Gelina A., Charbonnel E., Francour P., Abellaro O., Remonnay L., 1995. Surveillance de l'herbier de Posidonie de la baie du Prado (Marseille) – Suivi 1995. Ville de Marseille and GIS Posidonie publ., Marseille, Fr.: 56 p.

[Ifremer 2006] Kantin R., Andral B., Debard S., Denis J., Derolez V., Emery E., Ganzin N., Hervé G., Laugier T., Le Borgne M., L'Hostis D., Oheix J., Orsoni V., Raoult S., Sartoretto S.,Tomasino C., 2006. Le référentiel Benthique Méditerranéen (REBENT MED). Avant projet sommaire. Rapport définitif R.INT.DQP/LER-PAC/06-08.

[Ifremer 2007] Aide à la définition des conditions de référence pour le contrôle de surveillance au titre de la Directive Cadre Eau pour Les bassins Rhône Méditerranée & Corse. Mise en œuvre de l'exercice d'intercalibration. Convention Agence de l'Eau RM&C/Ifremer n° 2006-0695. Mai 2007 RST.DOP/LER-PAC/07-09.

[Ifremer 2007 b] Directive Cadre Eau. Mise en œuvre du contrôle de surveillance. Résultats de la campagne 2006. District Rhône et Côtiers Méditerranéens. Convention Agence de l'Eau RM&C/Ifremer n° 2006-1635. Rapport définitif Décembre 2007 RST. DOP/LER-PAC/07-28.

[Ifremer 2010] Hamdi A., Vasquez M., Populus J., 2010. Cartographie des habitats physiques Eunis - Côtes de France. Convention Ifremer/AAMP n° 09/12177764/FY.

[InterregIIIB Posidonia 2007 - a] ARPA. ENEA. Manuel de gestion des impacts sur les herbiers à *Posidonia Oceanica*. Confrontation des approches des méthodes de gestion entre les régions Ligure, Provence-Alpes- Côte d'Azur et Catalogne.

[InterregIIIB Posidonia 2007 - b] Ganzin N. – Cadiou G. Projet interreg 3B : Posidonia: Groupe de travail cartographie - Séminaire de clôture Marseille, Hôtel de Région, 26 et 27 mars 2007.

[InterregIIIB Posidonia 2007 - c] Mise en cohérence, développement, harmonisation et validation de méthodes d'évaluation de la qualité du milieu littoral par le suivi de l'herbier de *Posidonia oceanica.* Rapport final d'activité du groupe de travail «Cartographie».

[Lepareur 2011] Lepareur F. Evaluation de l'état de conservation des habitats naturels marins à l'échelle d'un site Natura 2000 – Guide méthodologique - Version 1. Février 2011. Rapport SPN 2011 / 3, MNHN, Paris, 55 p.

[Mayot 2007] Mayot T., 2007. Changement à long terme des limites inférieures de *Posidonia oceanica* en Provence et Côte d'Azur. Thèse de Doctorat. Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II), Centre d'Océanologie de Marseille.

[MEEDDM 2010] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du développement durable et de la Mer, 2010. A l'interface entre terre et mer : la gestion du trait de côte. Extrait «La Gestion du trait de côte» N° ISBN 978-2-7592-0360-4.

[Meinesz 1977] Meinesz A., 1977, Balisage de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* en rade de Villefranche-sur-mer (Alpes-Maritimes, France). Rapp Comm int Mer Médit, 24 (6) : 143-144.

[Meinesz *et al.* 1978] Meinesz A., Laurent R., 1978. Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes Maritimes. Campagne POSEIDON 1976. Botanica Marina, vol. XXI, pp. 513 526.

[Moreno *et al.* 2001] Moreno D., Aguilera P.A., Castro H., 2001. Assessment of the conservation status of seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows: implications for monitoring strategy and the decision-making process. Biological Conservation 102 (2001) p 325-332.

[Noël *et al*. 2010] Noël, C. Viala, M. Coquet, B. Zerr, S. Blouet, R. Dupuy de la Grandrive. Multi-sensors data fusion method devoted to sea bottom vegetation mapping and monitoring. 4th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation – Hammamet, Tunisie, 02 décembre 2010

[Noël *et al*. 2009] C. Noël, C. Viala, M. Coquet, G. Hervé, E. Emery, D. Sauzade, R. Kantin, S. Coudray. Comparaison de méthodes de cartographie des végétations sous-marines côtières. Revue Paralia, n° 2, pp5.1-5.12. 2009

[Panayotidis *et al. 1*981] Panayotidis P., Boudouresque C.F., Marcot-Coqueugniot J., 1981. Microstructure de l'herbier de *Posidonia oceanica* (*Linnaeus*) Delile. Botanica marina. Vol 24 : p 115-124.

[Pergent 2007] Pergent G., 2007. Protocole pour la mise en place d'une surveillance des herbiers de Posidonies. Programme « MedPosidonia » / CAR/ASP - Fondation d'entreprise TOTAL pour la Biodiversité et la Mer ; Mémorandum d'Accord N°21/2007/RAC/SPA/ MedPosidonia Nautilus-Okianos: 21p.

[Pergent *et al.* 1995] 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 : Etat des connaissances. Mésogée, 54, p. 3-27.

[Pergent-Martini *et al.* 1996] Pergent-Martini C., Pergent G., 1996. Spatio-temporal dynamics of *Posidonia oceanica* beds near a sewage outfall (Mediterranean–France). Dans J. Kuo *et al.* (éd.) Seagrass Biology: Proceedings of an international workshop, Rottnest island, The University of Western Australia, p 229-306. ISBN 0864224451.

[Pergent-Martini *et al.* 2005] Pergent-Martini C., Leoni V., Pasqualini V., Ardizzone G.D., Balestri E., Bedini R., Belluscio A., Belsher T., Borg J., Boudouresque C.F., Boumaza S., Bouquegneau J.M., Buia M.C., Calvo S., Cebrian J., Charbonnel E., Cinelli F., Cossu A., Di Maida G., Dural B., Francour P., Gobert S., Lepoint G., Meinesz A., Molenaar H., Mansour H.M., Panayotidis P., Peirano A., Pergent G., Piazzi L., Pirrotta M., Relini G., Romero J., Sanchez-Lizaso J.L., Semroud R., Shembri P., Shili A., Tomasello A., Velimirov B., 2005. Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows : Use and application. Ecological Indicators 5 (2005) p 213–230.

[Poulain 1986] Poulain M., 1996. Le mouillage forain dans le Parc National de Port-Cros. Impact sur les herbiers à *Posidonia oceanica*. Mémoire DESS Ecosystèmes Méditerranéens, Université de Corse : 1-62.

[Ramoge] [Boudouresque *et al*. 2006] "Guide Ramoge"

[Sartoretto *et al.* 2009] Sartoretto S., Pithois D., Raimondino V., 2009. Préfiguration d'un nouveau Réseau de Surveillance Posidonie en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Convention AERM&C/Ifremer n° 2008-0435, Convention Conseil Régional PACA/Ifremer n° 2007-04809. Mai 2009 Rapport définitif RST/DOP/LER-PAC/09-03.

[SDAGE RMC 2005] EID Méditerranée et SMNLR (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône-Méditerranée- Corse), 2005. Guide technique n° 9. Connaissance et gestion de l'érosion du littoral.

[Viala *et al*. 2007] C. Viala, C. Noël, M. Coquet, B. Zerr, P. Lelong, JL. Bonnefont. Pertinence de la méthode DIVA pour l'interprétation des mosaïques sonar latéral. Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation. Marseille, France, Mars 2007.

LEXIQUE

AAMP	Agence des Aires Marines Protégées. Etablissement public de l'Etat créé en 2006
Agence de l'eau	Etablissement public de l'Etat. Sa mission est de préserver les ressources en eau, de lutter contre les pollutions, de restaurer les milieux aquatiques. L'Agence perçoit des redevances auprès de tous les usagers (particuliers, agriculteurs, industriels...) qu'elle redistribue pour financer actions, projets, travaux. Les missions de l'Agence de l'eau s'inscrivent dans un programme pluriannuel élaboré en concertation par les différents acteurs de l'eau. Consommateurs, élus, professionnels, Etat... sont représentés au sein du Comité de bassin "parlement de l'eau" et du Conseil d'administration de l'Agence. Agence de l'eau RMC : Rhône Méditerranée & Corse
Anthropique	Qui résulte de l'action humaine
Biocénose	Ensemble des êtres vivants (animaux et végétaux) qui vivent dans les mêmes conditions de milieu, c'est à dire le biotope.
Bon état écologique	Bonne qualité des rivières, lacs, estuaires et côtes du point de vue aquatique et de la composition chimique de l'eau. Le bon état écologique est un des objectifs souhaités pour 2015 par l'Europe.
BQE	Bio-indicateur de la qualité du milieu (Biological quality Element) Différents groupes de recherche, en Méditerranée, ont développé depuis plus de trente ans, leur propre grille d'indicateurs basés sur l'herbier de posidonie. L'application récente de la Directive Cadre sur l'Eau a mis en exergue la nécessité d'une intercalibration de l'ensemble de ces indicateurs
CAR - ASP	Centre d'Activités Régionales pour les Aires Spécialement Protégées (CAR/ASP)
Dalle	Unité d'un découpage régulier d'une image. Les dalles sont jointives mais ne se recouvrent pas.
DCE	Directive cadre sur l'eau. Elle fixe pour les 27 Etats membres européens un calendrier, un programme de travail, et un objectif : atteindre le bon état écologique en 2015.
DCSMM	Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin – Bon état écologique 2020.
DDTM	Direction Départementale des Territoires et de la Mer.
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
DOCOB	Document d'objectifs (d'un site Natura 2000).
Etat de conservation	Maintenir ou restaurer un état de conservation favorable pour les espèces et les habitats d'intérêt communautaire est l'objectif de la directive "Habitats, faune, flore". L'état de conservation est défini en fonction de l'aire de répartition, de la surface occupée, des effectifs des espèces et du bon fonctionnement des habitats. L'état de conservation peut être favorable, pauvre ou mauvais.
FSD	Formulaire Standard de Données dans le cadre de Natura 2000 ainsi que pour le reporting à l'Europe pour la DHFF.
Habitat naturel d'intérêt communautaire	Un habitat naturel d'intérêt communautaire est un habitat naturel, terrestre ou aquatique, en danger ou ayant une aire de répartition réduite ou constituant un exemple remarquable de caractéristiques propres à une ou plusieurs des neuf régions biogéographiques.
MNHN-SPN	Muséum National d'Histoire Naturelle - Service du Patrimoine Naturel
MNT	Modèle Numérique de Terrain. Ensemble discret de valeurs numériques qui modélise le relief d'une zone géographique et permet de le représenter.
Mosaïque	Document résultant d'un montage d'images de scènes (images ou photos), ou de parties de scènes, connexes et prétraitées pour être raccordables géométriquement.
NABE	Non Atteinte du Bon Etat. Risque NABE : Se dit des masses d'eau dont l'état actuel est très éloigné des objectifs de qualité fixés pour 2015 et qui risquent de ne pas les atteindre.
NATURA 2000	Réseau de milieux naturels remarquables de niveau européen proposés par chaque état membre de l'Union Européenne qui correspond aux zones spéciales de conservation définies par la directive européenne du 21 mai 1992 (dite directive habitat faune-flore) et aux zones de protection spéciale définies par la directive européenne du 2 avril 1979 (dite directive oiseaux) Ces espaces sont identifiés dans un souci de lutte contre la détérioration progressive des habitats et des espèces animales et végétales d'intérêt communautaire. Chaque état doit assortir cette liste de plans de gestion appropriés et de l'évaluation des montants nécessaires dans le cadre de cofinancements communautaires.
Pixel	Plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée, définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage.
Pressions	Activités humaines susceptibles de changer l'état du milieu dans l'espace et dans le temps (rejets, prélèvements d'eau, modification des milieux...) : pressions domestiques (des habitants), pressions industrielles, pressions agricoles...
Programme de surveillance	Ensemble des dispositions de suivi de la mise en œuvre de la DCE à l'échelle d'un bassin hydrographique permettant de dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux. Ce programme qui inclut notamment les réseaux d'observation des milieux aquatiques est décomposé en contrôles de surveillance, contrôles opérationnels et contrôles d'enquête. Il doit être opérationnel fin 2006.
Radiométrie	On appelle "radiométrie" le contenu colorimétrique des images. Les images de la BD Ortho® se caractérisent par leur qualité géométrique et par leur qualité radiométrique. Les traitements radiométriques employés tendent à conserver au mieux l'énergie physique reçue par les capteurs (égalisation physique) ; des traitements complémentaires sont appliqués pour s'approcher au mieux du rendu des couleurs naturelles et limiter l'hétérogénéité liée aux conditions de prise de vues.
RAMOGE	L'accord RAMOGE signé en 1976 est l'instrument de coopération scientifique, technique, juridique et administrative dont se sont dotés les gouvernements Français, Monégasque et Italien pour faire en sorte que les zones maritimes de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, de la Principauté de Monaco et de la Région Ligurie constituent une zone pilote de prévention et de lutte contre la pollution du milieu marin.
RSP PACA	Réseau de Surveillance Posidonies. Maître d'ouvrage : Conseil régional de 1984 à 2004
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine Nationale
SIG	Système d'Information Géographique

INDEX LEXICAL

- un index lexical est donné ci-dessous pour les termes techniques (déjà définis dans le cahier)
- un lexique est présenté ci-contre pour les termes généraux ou techniques qui ne sont pas définis dans le cahier

A
Aménagements littoraux....76

B
Balisage....22, 46, 47, 48
Bancarisation....64
Bathymétrie....42
BD ORTHO....34

C
Carré permanent 46
Compacité de la matte....53
Coordonnées géographiques....15
Coût....23, 61, 63
Couverture....60, 63
Cymodocées....9

D
Dallage....29
DCE....71
Déchaussement des rhizomes....53
Densité....7, 51
DIVA SACLAF végétaux....39, 43

E
Echelle....19
Ecosystème....8
Epiphytes....54, 71, 83
EQR....71
Export....23, 62, 65, 75, 79, 83

F
Fiabilité....23, 32
Fréquence....36, 40, 42
Fusion multi-capteurs....42

G
Géodésie....15
Géoréférencement....15, 22
GOOGLE EARTH....17, 34, 66
GPS....18, 22, 59
GPS différentiel....17
Granulométrie du sédiment....54

I
Indice de conservation....58
Interprétation....30

K
KML, KMZ....66

L
Lambert 93 16
Légende 21
Législation....12, 44
Lépidochronologie....52
Lien état / pression 69

M
Matte....7
Méthodologie générale de cartographie....28
Micro-rugosité bathymétrique....42
Monitoring....23, 31, 91
Monitoring acoustique....42, 90
Mosaïquage....29

N
Natura 2000....70

O
OrthoLitto 2011....33
Orthotropes....7

P
Phénologie....52
Plagiotropes....7
Positionnement absolu des informations....22
Précision....22, 59, 63
Profondeur....23, 59, 63, 90
Puits de CO2....7

R
Recouvrement....50
Récurrence....23, 31
Reproductibilité....23, 60, 63
Résolution....20, 59, 63
RGF93....16

S
SACLAF....28, 38, 39, 41
Santé de l'herbier....91
Santé de l'homme....91
Segmentation....29
SIG....29, 65
Sonar latéral....36
Sonar latéral de coque....36, 42
Stratégie et plan d'échantillonnage....29
Stratégie globale surfacique...62, 75, 79, 83, 90
Stratégie locale micro-surface....62, 75, 83, 90
Stratégie ponctuelle....62, 75, 79, 83, 90
Suivi à long terme....70, 74, 90
Surveillance....23
Système géodésique WGS84....15
Systèmes de projection....16

T
Taux de couverture....23
Télédétection....28
Télédétection acoustique....36
Télédétection aérienne....33
Télémétrie acoustique....48
Transect permanent 46

V
Vérité terrain....23, 30, 32, 44, 60, 63

Z
Zoom....19
Zostères....9

TÉLÉCHARGEMENT

Ce cahier technique est téléchargeable au format pdf, ainsi que le dossier KMZ d'exemple de données de monitoring sur le site de CARTOCEAN : http://cartocean.fr/

PAO : VirtualDive : www.virtualdive.com

Cahier Technique du Gestionnaire :
Analyse comparée des méthodes de surveillance des herbiers de posidonies

