

Botanica Marina  
Vol. XXI, pp. 513-526, 1978

## Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-maritimes (France)

— Campagne Poseidon 1976 —

A. Meinesz et R. Laurent\*

Laboratoire de Biologie et d'Ecologie Marines U.E.R. D.M. — Université de Nice — Parc Valrose 06034 —  
Nice Cedex — France

et

\*Cellule d'Intervention contre la Pollution dans les Alpes-Maritimes (C.I.P.A.I.M.) TR. 2 —  
Aéroport Nice Côte d'Azur 06056 — Nice Cedex — France

(Reçu le 12 Décembre 1977)

### Résumé

La profondeur atteinte par l'herbier de *Posidonia oceanica* est le plus souvent fonction de la transparence des eaux littorales; toute altération de celles-ci (processus d'eutrophisation par exemple) entraîne une diminution de la quantité de lumière reçue au niveau d l'herbier profond qui régresse. Dans certains secteurs du littoral de Provence Côte d'Azur, de nombreux témoignages attestent que l'herbier situé autrefois au delà de — 30 mètres ne se rencontre actuellement plus qu'aux environs de — 25 mètres.

En utilisant les bâtiments de la Marine Nationale Française «TRITON» et «GRIFFON» (sous marin), les auteurs ont mis au point une méthode permettant de cartographier avec précision la limite inférieure des herbiers de Posidonies. Cette méthode a été appliquée au cours de la campagne «Poseidon 76» où plus de 23 kilomètres de limite inférieure d'herbier situé sur les côtes des Alpes maritimes (France) ont été cartographiés sur cinq cartes à l'échelle 1/5000.

Les observations recueillies à bord du sous marin et celles réalisées au cours de nombreuses plongées en Méditerranée occidentale ont permis aux auteurs de décrire trois types d'herbier profond. La densité des faisceaux foliaires, la position des rhizomes et l'épaisseur de la couche de rhizomes permettent de différencier ces trois types.

Le type 1 correspond à un herbier de faible densité (recouvrement parfois inférieur à 5%) dont les rhizomes sont en position horizontale.

Le type 2 correspond à un herbier de densité élevée (recouvrement supérieur à 50%) dont les rhizomes sont en position verticale. Ces rhizomes ne constituent pas encore une couche importante (< 20 cm).

Le type 3 correspond à un herbier de densité très élevée (recouvrement supérieur à 75%) dont les rhizomes, en position verticale, constituent une couche épaisse (pouvant atteindre plus d'un mètre).

L'herbier profond peut s'arrêter (limite inférieure) sous les trois formes décrites ci-dessus. Des hypothèses concernant les causes de l'arrêt de la végétation sont discutées. Une description des trois types d'herbier en voie de régression est également donnée.

Ces premières descriptions concernant l'état de l'herbier profond et la localisation de sa limite inférieure sur des cartes précises permettront de mieux évaluer toute modification éventuelle de la végétation de *Posidonia oceanica*.

### Abstract

Cartography and State of the Lowest Limit of the *Posidonia oceanica* Beds of the Alpes Maritimes (France) — Poseidon Campaign 1976

The depth of the *Posidonia* beds nearly always depends on the transparency of the coastal waters; any change in this factor, for example due to eutrophication, results in an attenuation of the amount of light received by the deepest beds, which hinders the seagrass growth in certain areas of the Côte d'Azur. There is sound evidence to show

that beds which were growing long ago deeper than 30 m are now only reaching an average depth of only 25 m on the south eastern French coast.

Using the facilities made available by the special units of the French Navy "Triton" and "Griffon" (submarine) the authors perfected a method enabling them to trace with accuracy the lowest limit of the *Posidonia* beds. This method was used during the "POSEIDON 76" campaign, when more than 23 kilometres of the deepest part of the beds found in the Alpes-Maritimes (France) coastal areas, were traced on five maps each on the scale of 1/5000.

The data collected on board the submarine and also during many explorative dives in the western Mediterranean Sea, allow the authors to describe three different types with regard to the deepest levels of the beds. The density of leaves, the position of rhizomes and the thickness of the layer of rhizomes enable the authors to classify three types:

Type 1 corresponds to beds of feeble density (sometimes covering less than 5% of the whole bottom surface) the rhizomes of which are in a horizontal position.

Type 2 corresponds to beds of high density (covering up to more than 50%) the rhizomes of which are in a vertical position. These rhizomes do not make up a thick layer (< 20 cm).

Type 3 corresponds to beds of very high density (covering up to more than 75% of the bottom surface) the rhizomes of which, in a vertical position, make up a thick layer (sometimes more than one meter).

Deep beds may exhibit a lower boundary under the three types described above. The assumptions concerning the reasons for this halt in growth are discussed in this paper. A description of the 3 types of beds, the growth rate of which is particularly poor, is also given.

These first descriptions of the present state of the deep *Posidonia* beds and the localizing of their deepest part on detailed maps help us to evaluate with better accuracy all the possible changes in the *Posidonia* vegetation in the future.

### Objet de l'étude

L'herbier de la phanérogame marine *Posidonia oceanica* (Linné) Delile recouvre de vastes étendues de l'étage infralittoral. Dans les Alpes-Maritimes sa limite inférieure se situe entre - 20 mètres et - 30 mètres.

L'augmentation de la turbidité et de la pollution des eaux littorales a pour effet de dégrader l'herbier de Posidonies qui est très fragile à sa limite inférieure (Pérès et Picard 1975). Ainsi, afin de mieux estimer une éventuelle régression des Posidonies à leur limite inférieure, il est nécessaire de connaître avec précision leur position. Or les rares cartes existant actuellement ne couvrent que quelques secteurs localisés. Elles sont peu précises et parfois erronées et sont trop souvent exécutées à des échelles trop petites. (Un tableau récapitulatif des cartographies des herbiers dans les Alpes-Maritimes a été dressé par Meinesz et Lefèvre (1976)).

La campagne «POSEIDON 1976» a eu pour objectif de cartographier avec un maximum de précision la limite inférieure des herbiers sous-marins sur un certain nombre de secteurs du département des Alpes-Maritimes situés de la frontière italienne à St. Jean Cap Ferrat et dans le Golfe Juan. Pour cela une nouvelle technique de cartographie de l'herbier a été mise au point.

### Methodologie

#### Les moyens utilisés

Le support technique de la mission a été fourni par la Marine Nationale qui a mis à la disposition de la Cellule d'Intervention contre la Pollution dans les Alpes-Maritimes (CIPAIM), rattachée au Service Maritime de l'Équipement, le bâtiment d'intervention et d'exploration sous-marine «TRITON» et le sous-marin d'exploration «GRIFFON».

Les caractéristiques de l'équipement de ces bâtiments qui ont été utilisés pour l'opération «POSEIDON 1976» sont les suivantes:

#### Le «TRITON» bâtiment support du GRIFFON

Ce bâtiment (déplacement: 1620 tonnes, longueur: 74 mètres) est équipé de deux propulseurs cycloïdaux à axe vertical. Ce type de propulsion permet au bâtiment de se maintenir en ancrage dynamique (avec une précision inférieure à 4 mètres).

Le positionnement du TRITON par rapport à la terre a été effectué grâce au «Range Positioning System» (Marque Motorola INC.). Ce système comprend deux balises répondeuses à terre et un émetteur récepteur

sur le bâtiment. La précision de la mesure est inférieure à 15 mètres.

Le repérage du sous-marin GRIFFON est effectué par un Sonar de type DUBA-1-B. Ce sonar donne le gisement et le site avec une précision de 1/4 de degrés (pour le gisement) et de 4 à 5 mètres (pour le site).

### Le GRIFFON

Ce sous-marin (13,5 tonnes, 12 mètres de longueur) est équipé d'un moteur électrique de croisière à deux vitesses (2 et 4 noeuds) et de moteurs électriques auxiliaires (orientation – montée – descente). L'équipage est composé d'un pilote, d'un copilote et d'un observateur. L'équipement permettant au GRIFFON de se repérer sur le fond est composé par: un sonar de type STAZA qui peut fonctionner sur de faibles portées (40 m. minimum), une caméra avec téléviseur et magnétoscope, un baromètre, un échosondeur et des hublots (à l'avant un de 9 cm. de diamètre et deux de 4 cm. de diamètre; à la tourelle un de 9 cm. de diamètre). Les communications avec le TRITON peuvent être effectuées en plongée, avec un appareil de transmission à ultra-sons, et en surface (radio). Le GRIFFON possède également un répondeur de 25 KHz pour le Sonar type DUBA-1-B du TRITON. L'autonomie du submersible (qui dépend de

la dépense en énergie électrique) est de 5–7 heures; l'autonomie en gaz respiratoire est de 72 heures.

### Participants

L'un des auteurs (Laurent) et un technicien étaient embarqués à bord du TRITON pour coordonner l'opération, l'autre (Meinesz) était embarqué à bord du GRIFFON pour diriger le sous-marin sur la limite de l'herbier et pour recueillir un maximum d'informations sur son état.

### Déroulement de l'opération

Le principe de la méthode utilisée est le suivant: le sous-marin suit avec précision la limite inférieure de l'herbier tandis que le bâtiment de surface cartographie la route du sous-marin (fig. 1). L'utilisation des moyens précités s'est effectuée de la manière suivante:

Dès la mise à l'eau du GRIFFON on notait l'heure de plongée (la synchronisation préalable des montres avec le sous-marin a permis de recalcr les observations effectuées sur le fond et de les figurer sur la route du sous-marin relevée par le TRITON). A intervalle régulier d'une minute la position du TRITON (celle-ci devenant fixe dès que le bâtiment se met en ancrage dynamique) et la position du GRIFFON (Azimuth et Distance) étaient relevés.

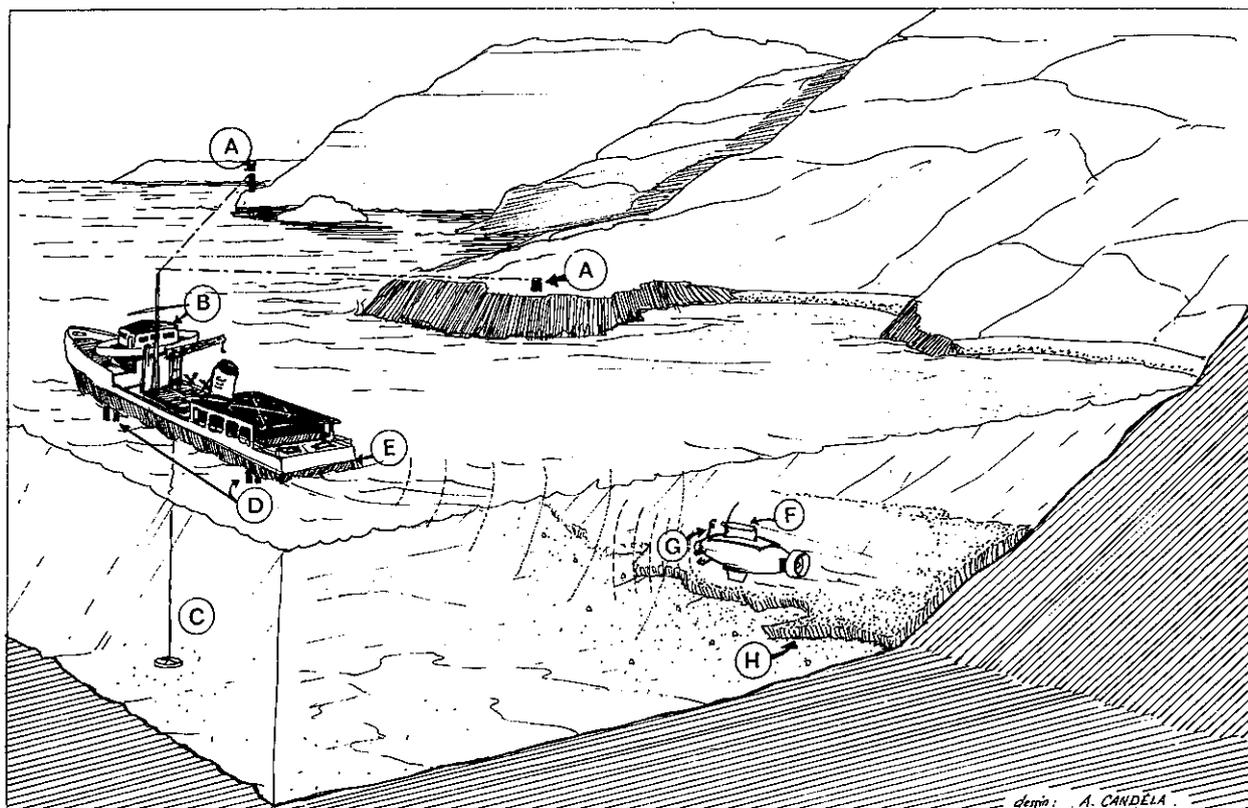


Fig. 1. Méthode et moyens utilisés pour la cartographie des herbiers. (a) Balises (répondeurs radar). (b) Récepteur radar. (c) Gueuse d'ancrage dynamique. (d) Propulseurs cycloïdaux. (e) Sonar DUBA II R émetteur. (f) Sonar DUBA II R récepteur. (g) Sonar Straza. (h) Limite inférieure de l'herbier de *Posidonies*.

A bord du GRIFFON, la principale difficulté était de maintenir la route du sous-marin parallèle à la limite inférieure de l'herbier. Pour cela l'équipage du sous-marin repérait directement la limite de l'herbier à travers les hublots; la visibilité variait entre 5 et 15 mètres.

Au cours de l'opération l'utilisation du Sonar Straza du sous-marin s'est révélé très efficace. En effet, nous avons constaté que les échos provenant de l'herbier étaient perceptibles au sonar et pouvaient se différencier facilement des fonds sablo-vaseux qui ne donnent pas d'écho. (Ce principe a été utilisé pour effectuer une cartographie des herbiers avec un sonar latéral (Cuvelier 1976)). Cette utilisation s'est avérée très utile dans tous les fonds où le substrat rocheux est absent.

Les indications données par l'échosondeur permettaient de maintenir le sous-marin sur la zone de la limite inférieure des Posidonies (entre - 20 m et - 30 m). La position du sous-marin était régulièrement communiquée par le TRITON; le pilote du submersible pouvait ainsi garder un cap général correspondant à une route parallèle à l'isobathe - 20 m des cartes.

## Resultats

### Description des secteurs explorés

Cinq cartes au 1/5000° ont été dressées. Les originaux sont déposés à la C.I.P.A.L.M. Un détail d'une de ces cartes est présenté (fig. 2). Le fond de carte ainsi que les isobathes et les indications bathymétriques ponctuelles proviennent des cartes du Service Hydrographique de la Marine au 1/14400° qui ont été agrandies au 1/5000°. La précision de la localisation de la limite inférieure est difficile à évaluer. Le grand nombre de mesures effectuées (1 toutes les minutes) et la mise en ancrage dynamique du TRITON réduisent l'ampleur de ces erreurs. Ainsi nous avons estimé à  $\pm 20$  m la précision obtenue.

Les cartes couvrent les secteurs suivants d'Est en Ouest (Plans de situation fig. 3 et 4):

- *Cap Martin* - Est du Cap Martin (une partie de la Baie Ouest de Menton) (Carte du service Hydrographique de la Marine (S.H.M.) n° 5208)

- Ouest du Cap Martin (Baie de Roquebrune) (cart S.H.M. n° 5207).

- *Eze* - De Cap d'Ail au Cap Roux (Cartes S.H.M. n° 5207 et 5176).

- *Beaulieu* - Du Cap Roux à la Pointe St Hospice (Carte S.H.M. n° 5176).

- *Golfe Juan Est* - De la Pointe de l'Ilette au Sécanion (Carte S.H.M. n° 5122).

- *Golfe Juan Ouest* - De la Fourmigue à la Pointe Fourcade (Carte S.H.M. n° 5122).

Chaque secteur présente des particularités qui nécessitent un développement. Dans les descriptions des secteurs nous signalons la présence des différents aspects de l'herbier que nous avons défini dans le chapitre suivant.

### Cap Martin

A l'Ouest de la Baie de Menton 1800 mètres ont été parcourus. Nous n'avons rencontré que quelques rares touffes isolées de Posidonies (entre 1 et 5 m 2) aux alentours des - 20 m. Ces touffes, sans rhizomes morts apparents à la périphérie, représentent peut être des îlots témoins, vestiges d'un herbier autrefois dense dans la Baie de Menton: Kremer (1974); cartes imprécises d'Ollivier (1929) et de Chevalier (1917).

Dans la baie de Roquebrune nous avons parcouru 2200 m. La limite de l'herbier se situe entre - 25 m et - 28 m. L'herbier nous a paru en mauvais état sur toute la limite (herbier de type 2 en régression). En effet, nous avons observé la présence de vastes étendues d'herbier mort. Les premiers éléments d'herbier vivant apparaissent sous forme de touffes vivantes déchaussées alternant avec des rhizomes morts. Nous avons également observé de vastes étendues mortes à l'intérieur même de l'herbier. Le recouvrement des touffes vivantes est faible sur la limite (entre 1 et 15 faisceaux foliaires/m<sup>2</sup>).

### Mer d'Eze à Cap d'Ail

La limite d'herbier a été suivie sur 6,7 Km. Elle se situe aux alentours de - 26 m en mer d'Eze et de - 28 m en Baie de St Laurent; elle varie entre - 26 m et - 30 m face au Cap d'Ail.

Dans la zone rocheuse du Cap d'Ail, l'herbier se maintient en touffes éparées au sommet des reliefs rocheux ou dans les dépressions. La limite est très irrégulière et discontinue, le recouvrement est toujours très faible. Sur le flanc Ouest de cette zone rocheuse, nous avons trouvé une limite plus nette sur un fond régulier en faible déclivité.

De la Pointe Bognoso à la Pointe Mala (650 m) nous avons rencontré une zone très turbide (non loin se trouve l'extrémité d'un émissaire). La limite est très irrégulière: touffes éparées (entre 1 et 10 faisceaux vivants au m<sup>2</sup>). Les faisceaux vivants ne sont pas déchaussés mais plutôt enfouis sous le sédiment. Vers la Pointe Mala, l'herbier est plus dense, nous avons rencontré au Sud de cette pointe des tombants rocheux dont le sommet situé à - 27 m était garni de Posidonies tandis qu'à sa base (- 30 m) elles étaient absentes. C'est dans la baie de St Laurent d'Eze que nous avons rencontré une limite d'herbier particulièrement dense et franche avec un recouvrement avoisinant 50%. Cette limite ne présentait pas de talus de matte (herbier de type 2). Vers la Pointe Cabuel (Cap Estel)

### Légende

	Herbier mort		Herbier en touffes
	Herbier : recouvrement < 5%		Sable vaseux
	Herbier : r. 5% > r. > 25%		Sable
	Herbier : r. 25% > r. > 50%		Roche
	Herbier : r. 50% > r. > 75%		Tombant
	Herbier : r. > 75%		Route du GRIFFON

0 200 400 600 800 1000 metres

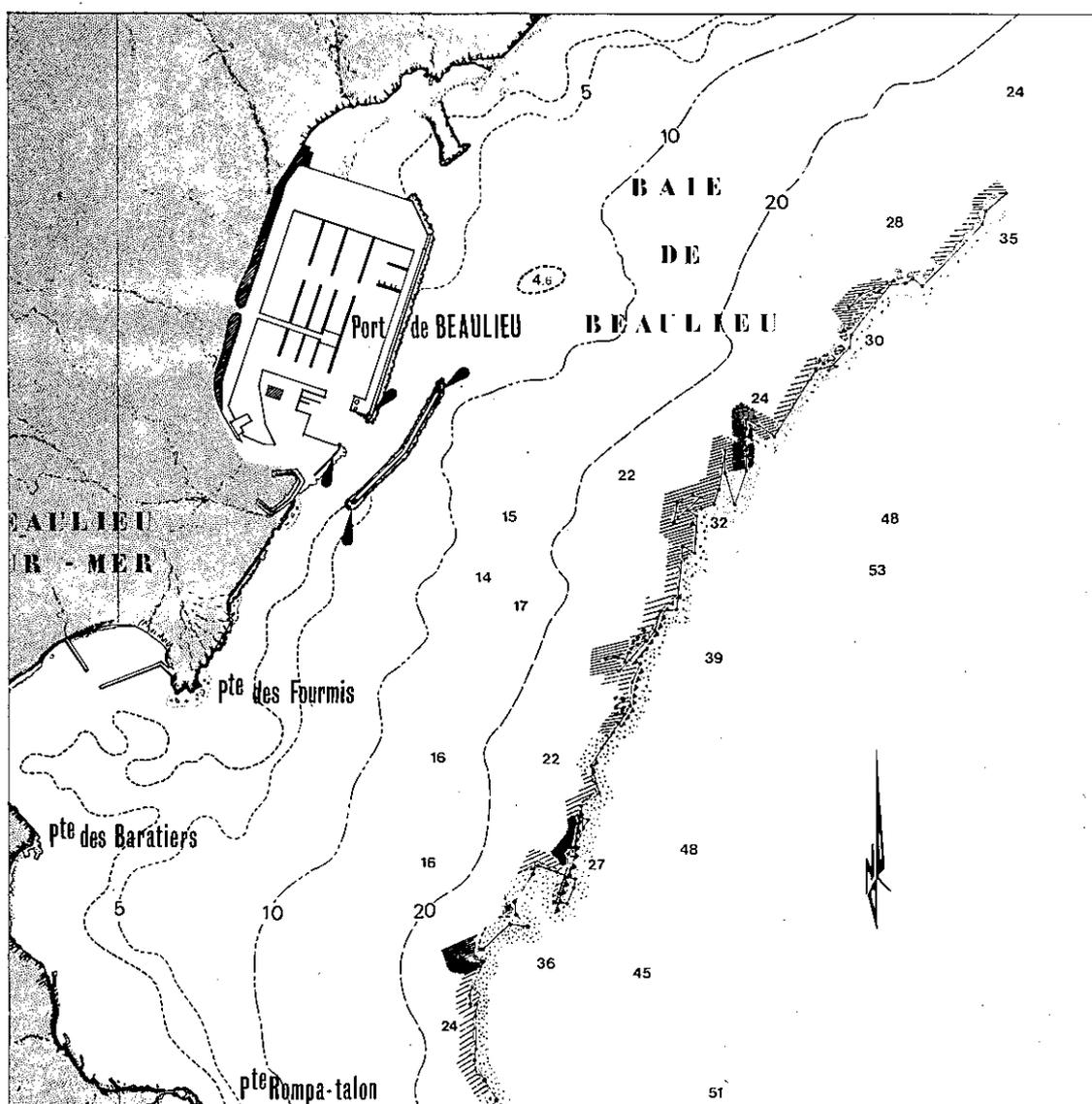


Fig. 2. Présentation des résultats cartographiés – Détail de la carte au 1/5000° de la Baie de Beaulieu.

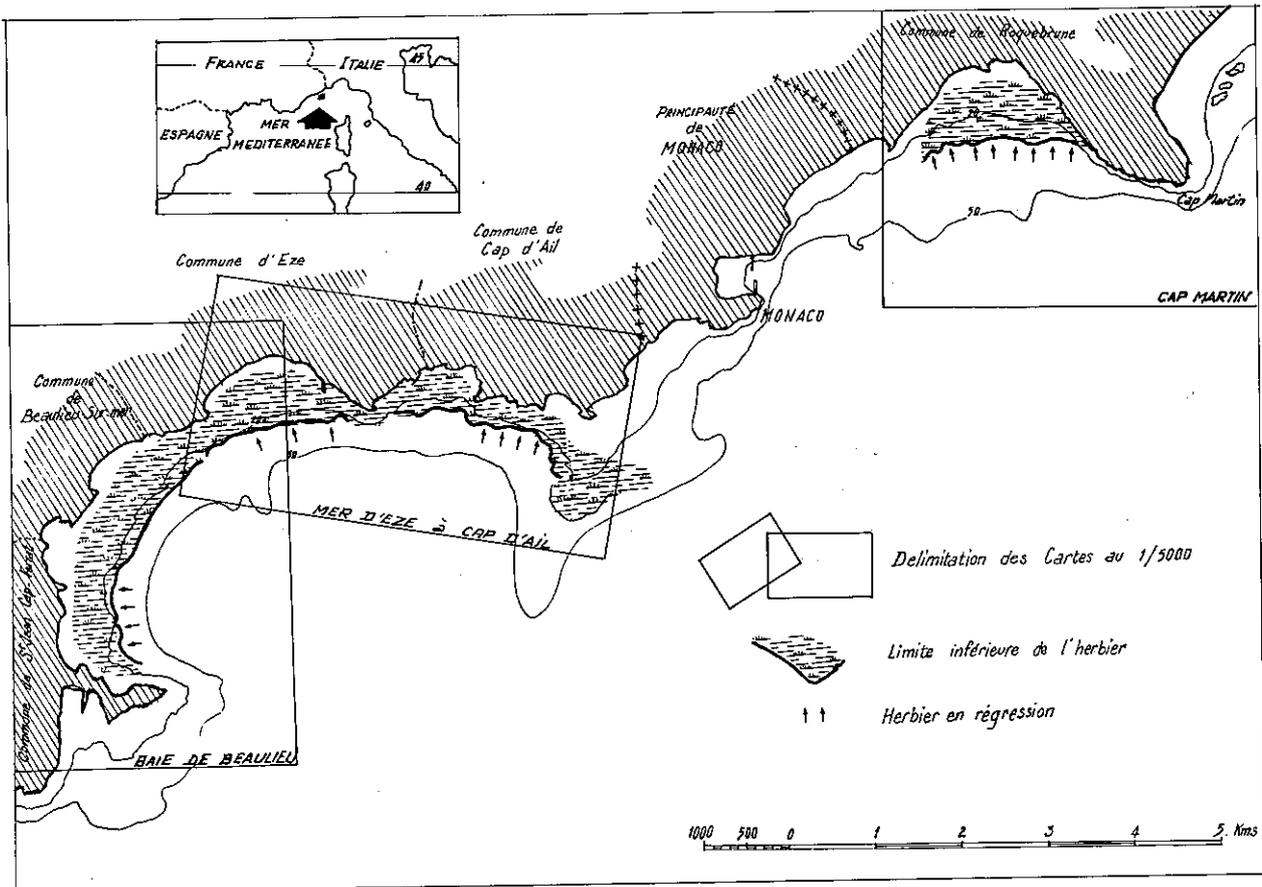


Fig. 3. Zones cartographiées à l'Est de Nice

nous avons de nouveau rencontré des tombants rocheux. Les herbiers s'y développent par touffes éparées entre les blocs rocheux situés au-dessus de  $-27$  m.

Dans la mer d'Eze, la limite est relativement uniforme avec un recouvrement assez faible (entre 5 et 25%) et un aspect très échancré avec des touffes isolées de 1 à 10 m situées au-delà de la limite; nous avons noté la présence de «trous» à l'intérieur de la limite (herbier de type 1 ou 1 en régression).

#### Baie de Beaulieu

La limite d'herbier a été parcourue sur 3,28 km. Entre le Cap Roux et la Pointe des Fourmis, la limite de l'herbier se situe entre  $-24$  et  $-26$  m; entre la Pointe des Fourmis et St Hospice nous l'avons trouvée entre  $-22$  et  $-24$  m.

Dans le secteur situé entre le Sud du Cap Roux et l'Est du feu de la passe Ouest du port de Beaulieu, l'herbier se termine sous forme de touffes éparées, la limite est de ce fait très irrégulière, échancrée. Le recouvrement est faible ( $< 5\%$ ); (herbier de type 1 ou 1 en régression). Dans le secteur situé entre l'Est du feu de la passe Ouest du Port de Beaulieu et l'Est de la

Pointe des Baratiers, nous avons rencontré des tombants de 3 à 6 m de hauteur avec de nombreux rochers au sommet. Les Posidonies sont présentes au sommet de ces tombants, le recouvrement est très variable et peut dépasser 50% (herbier de type 1 et 2 ou 1 en régression). A l'Est de la Pointe des Baratiers et au Nord de l'Anse de la Scaletta, nous avons rencontré une limite très irrégulière: limite échancrée, touffes éparées, grandes lacunes d'herbiers en son sein etc... Les rhizomes étaient rarement apparents (herbier de type 1 ou 1 en régression).

#### Golfe Juan Est

La limite d'herbier a été parcourue dans cette zone sur 4 km. La majeure partie de l'herbier se situe entre  $-22$  et  $-26$  m.

Au voisinage de la Pointe de l'Ilette, nous avons rencontré des tombants et un fond rocheux (le Rascoui). L'herbier est très éparé au sommet du tombant (herbier de type 1); les touffes de faisceaux vivants sont parfois entourées d'herbier mort (herbier de type 1 en régression). Ces faisceaux sont parfois déchaussés (herbier de type 2 en régression). Du Rascoui vers le Graillon, le

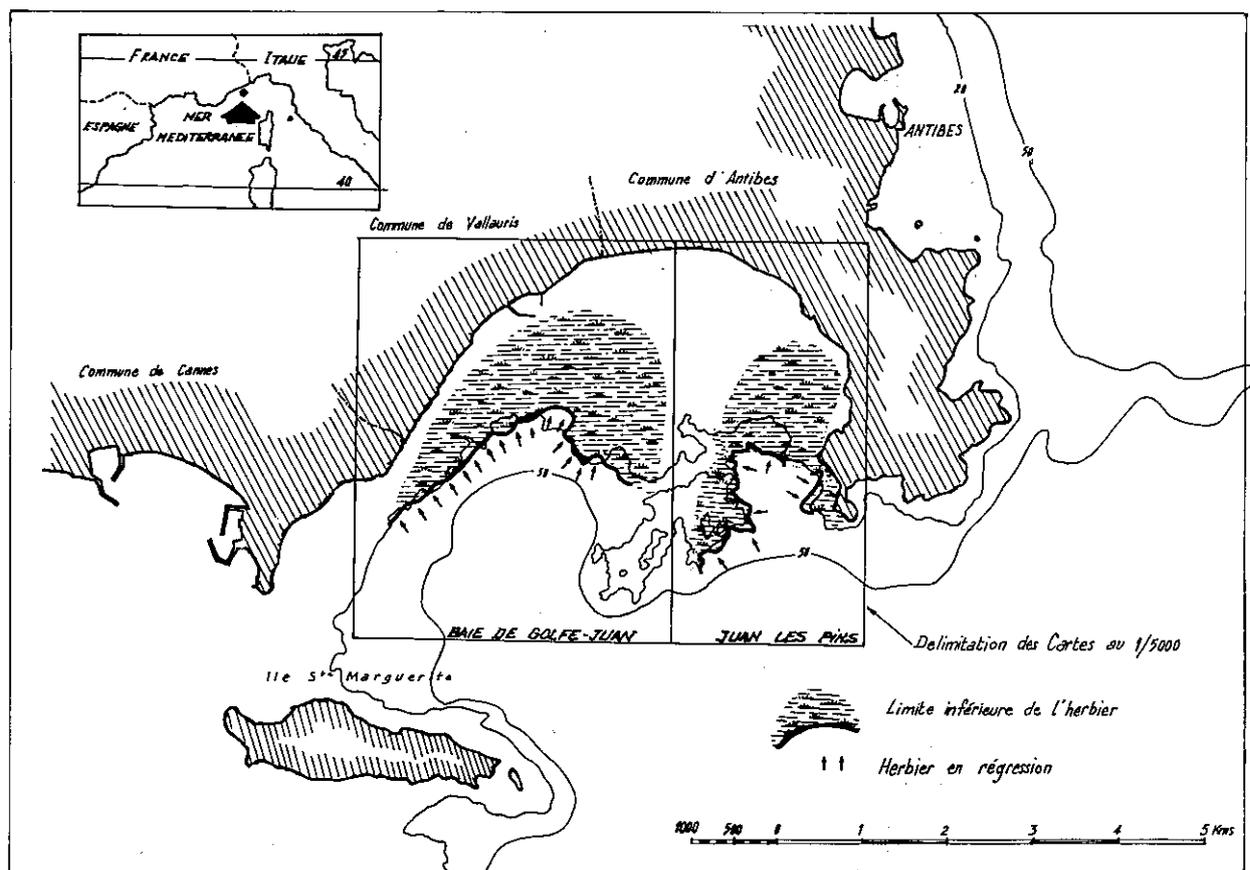


Fig. 4. Zones cartographiées dans le Golfe Juan

fond est plus régulier (sablo-vaseux). On passe rapidement d'une limite présentant un herbier de type 1 au type 2 et même 3. La limite est parfois dégradée, mais nous avons également trouvé des rhizomes traçants partant à la base d'un rebord de matte en régression. Vers le Nord (Le Lampadour) l'herbier est en mauvais état sur plus de 500 m; nous avons rencontré des mattes mortes (herbier de type 3 en régression) des touffes déchaussées (herbier de type 2 en régression). Parfois la limite redevient brusquement nette et dense sans rebord de matte (herbier de type 2). Aux alentours des hauts fonds du Secanion, nous avons rencontré une succession de tombants avec un fond rocheux. Tous les types d'herbiers peuvent s'y rencontrer (sains ou en régression) des rhizomes traçants ont également été aperçus.

#### Golfe Juan Ouest

Dans l'Ouest du Golfe Juan la limite de l'herbier a été suivie sur 4,875 km. Nous avons trouvé celle-ci entre - 25 m et - 18 m avec des zones où l'herbier ne se rencontre qu'à partir de - 16 m.

A l'Est de la bouée située à l'aplomb de la zone de rejet de l'émissaire de Vallauris-Golfe Juan, l'herbier

est assez dense (recouvrement entre 25 et 50%) avec une limite échancrée (herbier de type 1 ou 2). Au voisinage de la zone de rejet, l'herbier devient très dégradé: plages de rhizomes morts au sein de l'herbier, matte morte sur plusieurs dizaines de mètres vers le fond (herbier de type 3 en régression). Les premiers faisceaux vivants sont, soit isolés (3 ou 4 au m<sup>2</sup>), soit regroupés pour former des touffes de diamètre et de densité variable. La limite de l'herbier vivant est souvent difficile à cerner: parfois sans changer de profondeur, on rencontrait des vastes surfaces de rhizomes morts. Au Nord de la zone de rejet les premières touffes de l'herbier vivant ne se rencontrent qu'entre - 18 et - 16 m. Vers le fond tout l'herbier est mort (herbier de type 2 ou 3 en régression). A l'Ouest de l'émissaire nous avons trouvé partout des fonds où l'herbier était en mauvais état: faisceaux foliaires isolés, déchaussés, touffes éparées, larges plages dégarnies au sein de l'herbier, limite échancrée (herbier de type 1 et 2 en régression).

Au Nord et à l'Ouest de ce secteur on assiste donc à une régression générale de l'herbier qui a reculé de plusieurs dizaines de mètres (et au voisinage immédiat de l'émissaire de plusieurs centaines de mètres).

### Structure, état et dynamique de l'herbier au niveau de sa limite inférieure

La structure, l'état et la dynamique de l'herbier de Posidonies ont fait l'objet de nombreuses études; cependant la plupart des observations ou des hypothèses ne concernent que la couverture supérieure de l'herbier (entre 0 et - 15 m). Les nombreuses investigations que l'un de nous (Meinesz) a pu effectuer en plongée sous-marine sur les côtes occidentales de la Méditerranée ont pu être complétées au cours de la campagne Poséïdon 76 par un examen d'ensemble de 23 km de limite inférieure.

La synthèse de toutes ces observations nous permet de définir les différents aspects de l'herbier à sa limite inférieure. Nous avons ainsi distingué trois types d'état de l'herbier auxquels correspondent trois types de limite et trois stades de régression. Ces premières descriptions des différents aspects de la limite inférieure nous ont amené à émettre des hypothèses qui nécessitent bien entendu des vérifications ultérieures. Les distinctions suivantes ne concernent que la limite inférieure d'un herbier se développant sur un fond de relief homogène (non rocheux) ayant une pente régulière.

### Les différents types d'état et de limite d'un herbier sain - (figs. 5 et 6)

*L'herbier de type 1.* Ce type d'herbier ne se rencontre qu'en limite (limite de type 1) (figs. 5 et 6A).

Cet herbier présente des rhizomes qui se développent horizontalement ou sub-horizontalement, ces rhizomes forment une couche très superficielle et éparse, plus ou moins enfouie sous le sédiment (sablo-vaseux le plus souvent). Les faisceaux foliaires partent directement de ces rhizomes horizontaux. (Il n'y a pas de croissance verticale des rhizomes: fig. 7).

L'aspect de la limite est échancré, irrégulier, avec des plages de sédiments non colonisées à l'intérieur de l'herbier. Le recouvrement de l'herbier est très faible en limite où il est souvent réduit à quelques unités de

faisceaux foliaires au m<sup>2</sup>. Les faisceaux sont soit isolés soit groupés en touffes éparses (recouvrement souvent inférieur à 5%). C'est ce type d'état et de limite de l'herbier sain que nous avons rencontré dans plusieurs secteurs explorés au cours de la campagne Poséïdon 76 (toute la mer d'Eze et une grande partie de la Baie de Beaulieu).

Dans ces secteurs, le substrat est sablo-vaseux en limite et dans l'herbier. Les rhizomes sont toujours plus ou moins enfouis dans ce substrat: les courants côtiers semblent favoriser une certaine sédimentation et ne s'opposent pas à la fixation des Posidonies. Ainsi, dans ces conditions la lumière peut être considérée comme le seul facteur limitant; en effet, à sa limite inférieure l'herbier atteint son point de compensation. En dessous du point de compensation la plante ne peut plus vivre; au dessus, elle se développe. Ce point de compensation est donc déterminé par le bilan radiatif reçu par la plante; ce bilan ne doit pas être déficitaire pendant un temps trop prolongé.

Lorsque la pente est très douce, le point de compensation est réparti sur une large surface correspondant à une dénivellation de 1 à 2 mètres. Dans cette zone critique, l'herbier se trouve dans un état métastable, ce qui peut expliquer l'herbier de type 1 et sa limite (l'herbier se termine en dégradé avec un très faible recouvrement en limite). Lorsque la pente est plus accentuée la zone du point de compensation est réduite à une faible surface, la densité de l'herbier augmente très rapidement vers la côte.

Au-dessus de l'herbier de type 1 on trouve les deux autres types d'herbier, qui sont plus denses et plus stables (et qui peuvent être très anciens); (fig. 5).

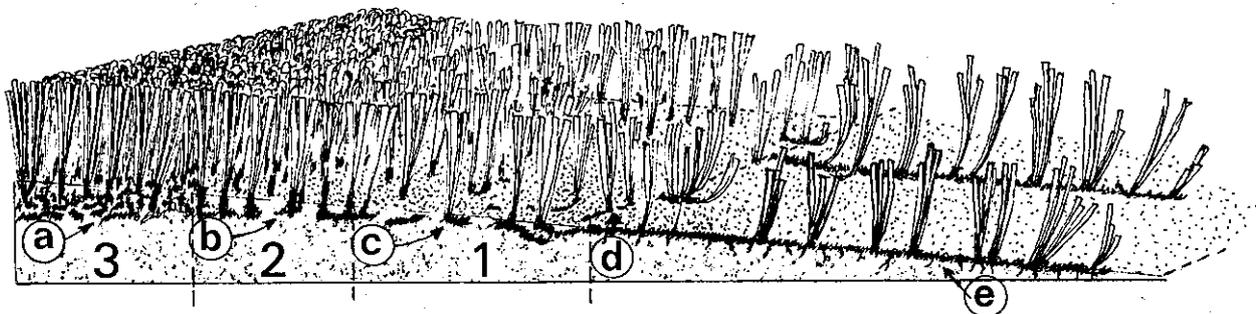
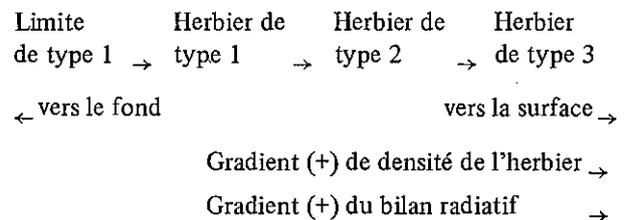


Fig. 5. Les différents types d'herbier (1-2-3). (a) couche épaisse de rhizomes (matte). (b) Rhizomes verticaux. (c) Rhizomes horizontaux. (d) Limite inférieure. (e) Rhizomes traçants.

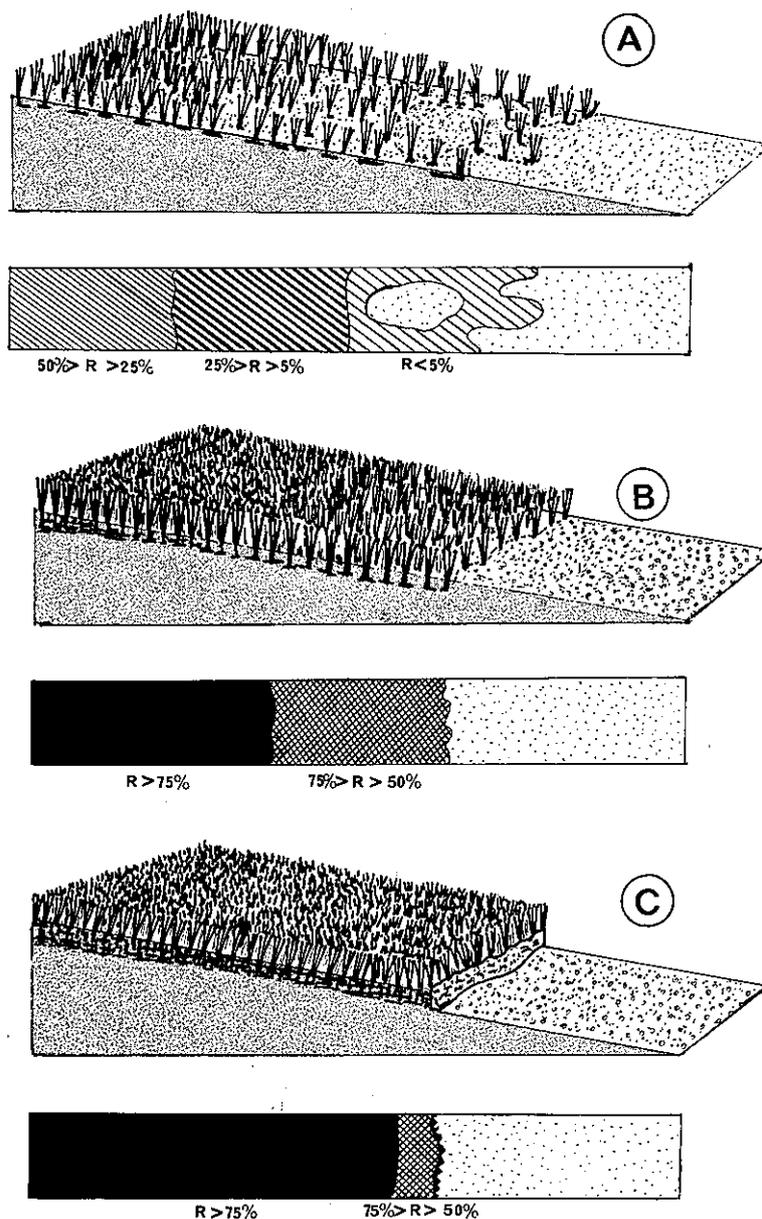


Fig. 6. Les différents types de limite de l'herbier (A) limite de type 1. (B) Limite de type 2. (C) Limite de type 3. R = Recouvrement

Harmelin et Laborel (1976) signalent un type d'herbier similaire à - 35 m (Port-Cros) mais avec la présence de rhizomes traçants de plusieurs mètres.

*L'herbier de type 2.* Ce type d'herbier peut se rencontrer soit au-dessus d'un herbier de type 1 (fig. 5) soit en bordure (fig. 6B): limite de type 2.

L'herbier présente des rhizomes qui se développent verticalement. La couche de rhizomes (morts ou vivants) est encore superficielle et n'est pas assez importante pour être qualifiée de mat. Le recouvrement foliaire est toujours supérieur à 50% et dépasse parfois 75%.

Cet état de l'herbier a été rencontré au-dessus du type 1 à Beaulieu et en mer d'Eze. Il a été rencontré en limite (de type 2) dans la baie de Saint Laurent d'Eze, ainsi que par endroit dans l'Est du Golfe Juan. La moitié Nord de la limite d'herbier balisée à Villefranche sur Mer en 1975 (Meinesz 1976) est sous cet aspect.

Ce sont Molinier et Picard (1952) qui ont donné la première hypothèse concernant la croissance verticale des rhizomes. Cette croissance correspondrait à une réaction contre le lent ennoyage des rhizomes provoqué par l'accumulation des sédiments par les rhizomes et les frondaisons.

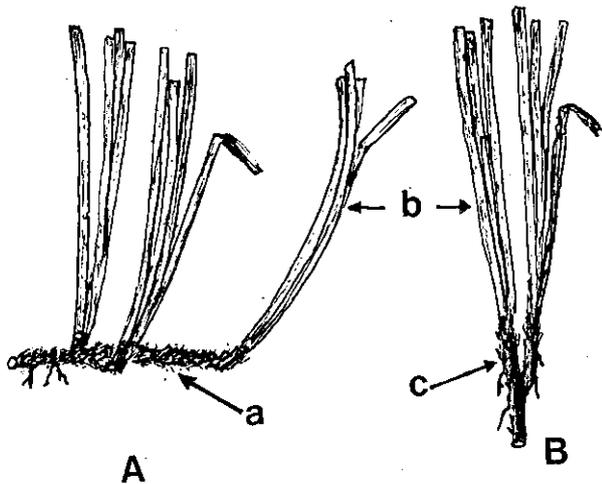


Fig. 7. Croissance des rhizomes. (A) Croissance horizontale. (B) Croissance verticale. (a) Rhizome horizontal. (b) Faisceau de feuilles. (c) Rhizome vertical.

Cette hypothèse n'est pas vérifiée au niveau d'un herbier de type 1 où les rhizomes isolés, pourtant soumis à un certain enfouissement, se développent horizontalement ou sub-horizontalement. En fait, cette position du rhizome permet à une plante isolée de se fixer mieux sur un fond meuble (non exposé à des courants importants) et d'y puiser les matières nutritives. La modification de tropisme du rhizome semble directement liée à l'augmentation du coefficient de sociabilité de la plante, car c'est lorsqu'une certaine densité des faisceaux foliaires est atteinte qu'une croissance verticale des rhizomes apparaît. Celle-ci peut donc s'expliquer par une réaction de concurrence pour l'utilisation du substrat ou pour l'exposition à la lumière. Le piège à sédiments constitué par un ensemble dense de rhizomes et de frondaisons permet à la végétation de se consolider et de se développer en hauteur loin et indépendamment du substrat initial. Ainsi, dans cette hypothèse l'accumulation des sédiments représente une nécessité propre à assurer le développement dans le sens vertical d'une végétation dense, et non une contrainte amenant une réaction en croissance verticale de la plante.

Cette hypothèse est confirmée par certaines observations effectuées sur des cultures de *Posidonies* par Cooper (1976 p. 11 à 13).

Lorsque l'herbier est dans cet état en limite (de type 2) son aspect est très net: l'herbier s'arrête franchement formant des méandres plus ou moins accentués. A son niveau, on peut bien observer la progression verticale des rhizomes qui sont parfois déchaussés. A l'intérieur de l'herbier on trouve rarement des plages de sédiments non colonisés.

Ce type de limite a été rencontré le plus souvent sur un fond de sable grossier et de graviers (détritique côtier). Il semble que la progression de l'herbier vers de plus grandes profondeurs soit limitée par un substrat trop

pauvre en matières humiques ou par des apports sédimentaires trop faibles (ou entraînés par les courants côtiers). Dans ce cas, l'herbier serait donc limité par la «richesse nutritive» du substrat: l'herbier ne se maintient que si le recouvrement est important, car seul le piège à sédiments constitué par une végétation dense permet à celle-ci de capter et de fixer les particules en suspension, sources d'éléments nutritifs.

Lorsque le recouvrement de l'herbier est important, le bilan radiatif doit être régulièrement suffisant; l'herbier ne peut donc se maintenir qu'au-dessus du niveau où il est en situation métastable, c'est-à-dire où la lumière devient le facteur limitant.

*L'herbier de type 3.* Ce type d'herbier peut se rencontrer soit au-dessus d'un herbier de type 2 (fig. 5) soit en bordure (fig. 6C): limite de type 3. L'herbier présente alors des rhizomes qui se développent verticalement. La couche de rhizomes est importante et constitue une matre. Le recouvrement foliaire est toujours très important (supérieur à 75%); (ce qui peut représenter 1225 faisceaux au m<sup>2</sup>: Giraud *et al.* 1976).

C'est l'élévation progressive de la végétation (rhizomes en croissance verticale) qui a engendré une couche de rhizomes enchevêtrés. Les rhizomes situés à la base de la matre sont morts et imputrescibles. Molinier et Picard (1952) ont observé des mattes atteignant 6 mètres de hauteur; ils ont pu estimer la vitesse de la croissance verticale, dans certains endroits particulièrement favorables, à 1 mètre par siècle.

L'herbier est dans cet état jusqu'au niveau de la limite supérieure. De très nombreuses études concernant la constitution et l'évolution de la matre ont été réalisées.

Lorsque l'herbier est dans cet état en limite inférieure (limite de type 3), celle-ci est matérialisée par un rebord de matre de hauteur variable:

Rebord de la matre = limite du type 3 → Herbier de type 3 ← Vers le fond Vers la surface →

De ce fait, l'aspect de la limite est très net avec des méandres plus ou moins accentués. Pendant la campagne Poséidon 76 ce type de limite n'a été observé que sur quelques dizaines de mètres à l'Ouest du Cap d'Antibes. Le rebord de la matre situé vers - 28 mètres ne mesurait que 20 à 30 cm de hauteur.

Au cours de nos plongées nous avons également pu observer des rebords de matre en limite de 30 cm de hauteur au mouillage d'Elbo (Corse) à - 32 m et de 20 cm de hauteur à l'Ouest de la plage Passable (Villefranche) à - 28 m.

Harmelin et True (1964) ont observé en limite inférieure un rebord de 0,5 m devant le sémaphore de Pomègues à - 29 m. Harmelin et Laborel (1976) signalent à Port-Cros une ligne de tombant de matre d'une hauteur moyenne variant entre 0,50 m et 1 m sur plus d'un kilomètre entre - 28 m et - 32 m.

Comme nous l'avons indiqué pour la limite de type 2, l'arrêt brusque de l'herbier aurait pour cause la pauvreté du substrat ou le faible apport de sédiments. Dans ce cas les courants côtiers peuvent avoir une double action symétrique: ils s'opposent à la sédimentation et érodent la limite de la végétation pour constituer un rebord de matre plus ou moins important. Harmelin et True (1964) pensent également que le courant est l'agent d'érosion du rebord de matre observé à Pomègues «dont le front doit reculer vers le rivage à mesure que l'herbier régresse».

Cette limite inférieure se situe parfois nettement au-dessus de la zone du point de compensation: nous avons observé entre - 5 et - 15 m des rebords de matre de 0,3 à 0,5 m de hauteur sur des limites inférieures de l'herbier situé dans des régions où l'eau est cristalline: au Sud de la plage de Saleccia (Désert des Agriates-Corse); à l'Est du Cap Nègre et de la Plage de Pramoussier (Var).

#### *Les différents stades de la régression de l'herbier à partir de la limite inférieure*

Avant de décrire les différents stades de la régression de l'herbier au niveau de la limite inférieure, il est utile de rappeler brièvement les différentes causes de la disparition et de la raréfaction de l'herbier. Celles-ci sont multiples et ont fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles on peut citer les suivantes:

— Erosion mécanique due à la pratique de la pêche aux arts traînants: — Harmelin et True (1964) — Astier (1972) — Pérès et Picard (1975).

— Raclage des zones de mouillage par les ancres des bateaux de plaisance a été constaté: à Port-Cros par Augier et Boudouresque (1970); dans les Alpes-Maritimes par Meinesz et Lefèvre (1976).

— Disparition totale d'un herbier consécutive à une restructuration du rivage: signalée dès 1883, par Marion, lors de la construction des Ports de Marseille; cette destruction irréversible est importante dans les Alpes-Maritimes (Meinesz et Lefèvre 1976).

— Influence des pollutions domestiques qui détruisent l'herbier au voisinage des émissaires: Rade d'Hyères — Maggi (1972—1973); Toulon — Astier (1972—1975), Astier et Taillez (1976); Marseille — Harmelin et True (1964). L'action de cette pollution a été analysée récemment par Pérès et Picard (1975) qui distinguent:

— d'une part l'altération de toute la masse de l'herbier par l'action de polluants chimiques (ils citent les travaux d'Arnoux et Chamley (1974) qui ont montré que certaines argiles accumulées par les Posidonies sont particulièrement aptes à adsorber les détergents anioniques, ceux-ci désorbant ensuite de façon plus ou moins accentuée;

— d'autre part la régression de la limite inférieure de l'herbier imputable à l'augmentation de la turbidité des eaux littorales (non seulement par les particules inertes en suspension mais par l'effet d'enrichissement en sels minéraux et en matières organiques provoquant un accroissement de la densité moyenne du plancton).

Toutes ces causes de régression sont le fait de l'homme; elles doivent être distinguées des causes de régression naturelles surtout observées au niveau de la limite supérieure et qui sont essentiellement dues à l'érosion hydrodynamique, laquelle s'oppose à l'élévation de la matre (Molinier et Picard 1952).

Nos observations concernent la limite inférieure de l'herbier et c'est essentiellement l'augmentation de la turbidité des eaux littorales qui provoque sa régression à ce niveau. En effet, l'augmentation de la turbidité diminue le bilan radiatif et fait donc remonter la profondeur de compensation. Cette cause de régression peut être invoquée chaque fois que l'herbier reste sain et inchangé au-dessus de la zone altérée localisée au niveau de la limite inférieure.

Lors des plongées à bord du GRIFFON nous avons rencontré des herbiers en régression très nette au niveau de leur limite inférieure, et nous avons distingué trois stades de régression correspondant à l'altération des trois types d'herbier que nous avons définis.

*Le stade 1 = (Herbier de type 1 en régression) (fig. 8A).* L'herbier de type 1 en régression est caractérisé par la présence de rhizomes horizontaux morts. Les premiers faisceaux vivants sont soit isolés, soit regroupés en touffes formant des «îlots témoins» situés parfois assez loin des autres faisceaux foliaires vivants suffisamment regroupés pour matérialiser la nouvelle limite. L'herbier de type 2 situé au-dessus n'est pas altéré. Nous avons souvent rencontré cet herbier dégradé dans le Golfe Juan et d'une façon très localisée dans la mer d'Eze et dans la Baie de Beaulieu. Nous avons expliqué que l'herbier de type 1 était situé très vraisemblablement au niveau de la zone du point de compensation. L'herbier de type 1 est donc plus particulièrement sensible aux variations du bilan radiatif. En fait cet herbier est en situation instable: il se développe ou régresse selon les années où le bilan radiatif a été favorable ou défavorable pour la plante.

Ce stade de régression est donc peu significatif car il peut être imputable aux variations naturelles de la turbidité des eaux littorales.

*Le stade 2 = (Herbier de type 2 en régression) (fig. 8B).* L'herbier de type 2 en régression se termine par des touffes de faisceaux foliaires vivants, mais dont les rhizomes verticaux sont très déchaussés. Les faisceaux foliaires situés en bordure de ces «îlots témoins» sont souvent penchés et même couchés. On trouve plus rarement des faisceaux isolés, très déchaussés, qui ne

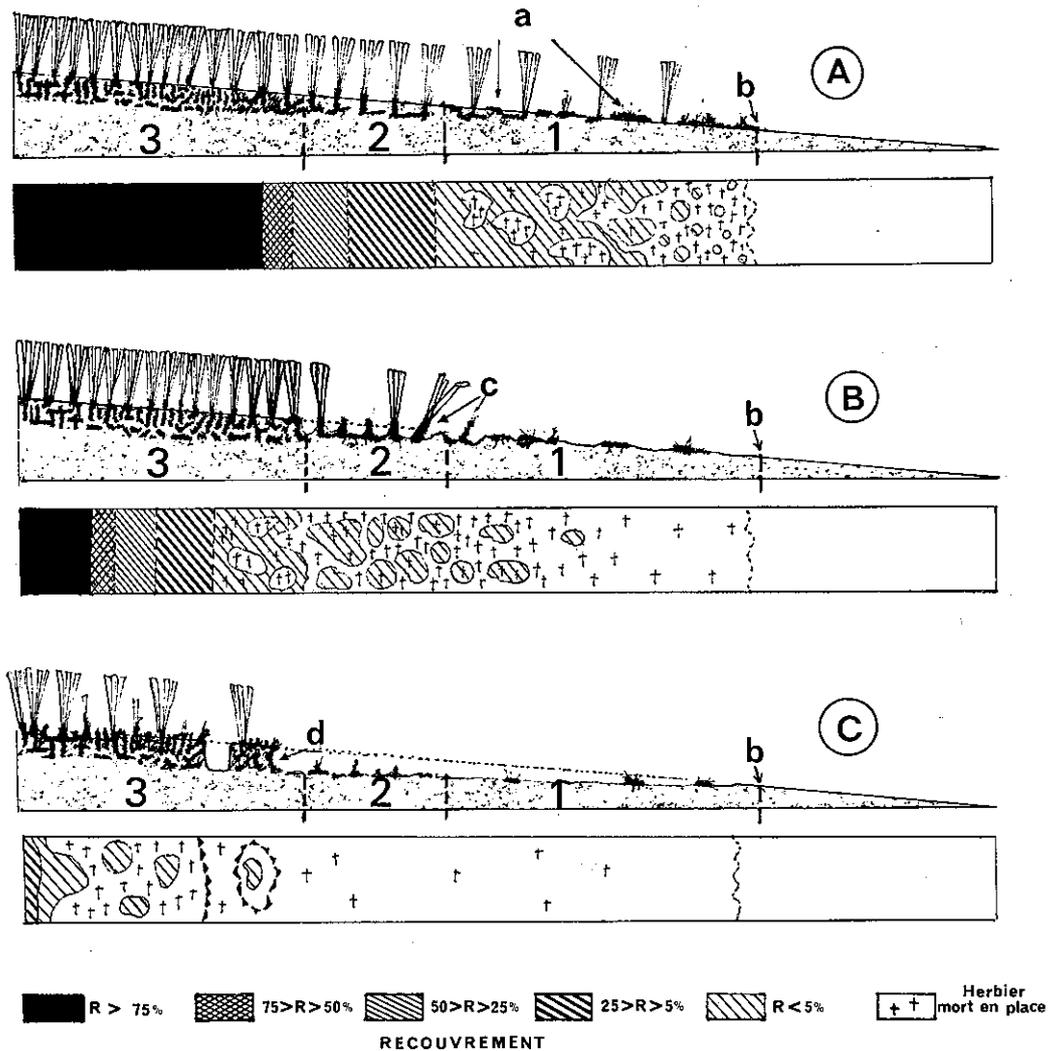


Fig. 8. Les différents stades de la régression des herbiers. (A) Herbier de type 1 en régression. (B) Herbier de type 2 en régression. (C) Herbier de type 3 en régression. (a) Rhizomes morts. (b) Ancienne limite inférieure. (c) Faisceaux foliaires déchaussés et effondrés. (d) Rebord de mat. (1-2-3) Les trois types d'herbier.

sont pas encore effondrés. On a observé entre les touffes de faisceaux vivants un lacs de rhizomes horizontaux (en position superficielle) d'où partent des moignons de rhizomes verticaux (sans feuilles). Vers la surface, l'herbier est de moins en moins altéré et l'herbier de type 3 reste intact. Vers le fond, on peut rencontrer les vestiges de l'herbier de type 1 sous forme de rhizomes horizontaux morts sans moignons de rhizomes verticaux. Ce stade de régression de l'herbier a été observé dans toute la baie de Roquebrune Cap Martin et par endroits dans le Golfe Juan.

Dans ce cas, il est permis de penser que l'augmentation de la turbidité littorale est importante, car la zone du point de compensation est remontée sensiblement pour atteindre l'herbier de type 2 qui est relativement stable. Le bilan radiatif étant insuffisant, l'herbier

devient chétif; il est ainsi plus facilement attaqué par les courants côtiers, qui le désagrègent et déchaussent les rhizomes verticaux.

*Le stade 3 = (Herbier de type 3 en régression) (fig. 8C).* L'herbier situé sur la mat est affecté par la régression. L'herbier est éparé; seuls des faisceaux isolés, des touffes persistent. Entre ces témoins vivants de l'herbier, on trouve des rhizomes enchevêtrés plus ou moins enfouis sous une pellicule de sédiments. Des algues sciaphiles (dont le développement nécessite peu de lumière) se fixent sur les moignons de rhizomes verticaux qui émergent. La mat morte est le plus souvent érodée par les courants côtiers ce qui a pour effet de constituer un rebord de mat plus ou moins apparent; ce rebord peut être irrégulier et morcelé avec des îlots de mat morte séparés par des chenaux. Si l'érosion est faible,

on peut retrouver des vestiges des autres types d'herbiers situés vers le fond et qui ont été détruits antérieurement: rhizomes morts en position superficielle, isolés ou réunis en plaques plus denses (toujours recouverts d'algues). Vers la surface les faisceaux vivants deviennent de plus en plus denses pour atteindre le recouvrement maximum normal pour une matre saine.

Nous avons rencontré ce stade de régression dans le Golfe Juan (à l'Ouest du Cap d'Antibes) sur quelques dizaines de mètres. A l'Ouest du Golfe Juan au voisinage de l'émissaire de Vallauris-Golfe Juan, la matre était également très altérée, cependant la densité de l'herbier ne redevient pas normale lorsque l'on pénètre l'herbier vers la surface. Dans ce cas, il est permis de penser que l'altération de toute la masse de l'herbier est provoquée par l'action des polluants rejetés par l'émissaire: à cette altération générale s'ajoute la régression de la limite inférieure imputable à l'augmentation de la turbidité.

Ce stade de régression témoigne d'une augmentation très importante de la turbidité des eaux littorales car c'est un herbier très stable et ancien qui est affecté.

#### *La progression horizontale*

La progression horizontale d'un herbier ne peut être évaluée qu'après des observations répétées sur un site balisé. Des limites inférieures d'herbier de *Posidonies* ont été récemment balisées: ce qui permettra de mesurer avec précision toute modification de la végétation (Parc National de Port-Cros - Var: Harmelin 1976; Rade de Villefranche - Alpes-Maritimes: Meinesz 1976; Parc Régional de la Corse - Réserve Scandola: Meinesz 1977). On peut cependant observer in situ deux types de rhizomes en progression horizontale.

#### *Les rhizomes traçants (fig. 5)*

Ces rhizomes horizontaux non ramifiés peuvent mesurer plusieurs mètres de longueur (nous avons estimé à 10 mètres la longueur de certains rhizomes traçants situés entre le Graillon et la Pointe de l'Illette dans le Golfe Juan). Ces rhizomes portent de nombreux faisceaux foliaires sur toute leur longueur (nous avons compté 40 faisceaux vivants sur des rhizomes de 4 m de longueur dans le Golfe Juan). Ces rhizomes traçants se rencontrent groupés; ils descendent parallèlement vers le fond (séparés de 50 cm à 1 m).

Nous avons rencontré de tels rhizomes dans le Golfe Juan. La plupart portaient de la base d'un rebord de matre plus ou moins dégradée.

#### *Les rhizomes courts à progression horizontale (fig. 7A).*

Ces rhizomes peuvent se rencontrer dans chaque type d'herbier ou en bordure des trois types de limite définis

précédemment. Ils peuvent mesurer entre dix et trente centimètres de longueur. Ils se ramifient rapidement soit horizontalement (latéralement) soit verticalement.

#### Conclusion

Les moyens exceptionnels mis en oeuvre au cours de la campagne Poséidon 76 ont permis de dresser cinq cartes extrêmement précises de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonies* situé dans plusieurs secteurs des Alpes-Maritimes. Les cartes ainsi réalisées ne peuvent pas être comparées aux rares cartes, très imprécises, réalisées jusqu'à présent avec des moyens conventionnels (plomb de sonde, dragages, plongées). Nos cartes représentent des documents de base qui témoignent de la position actuelle des herbiers et permettront d'évaluer l'évolution ultérieure de ces derniers.

Dans les secteurs explorés, la limite de l'herbier a été rencontrée en moyenne entre - 24 et - 28 m. La profondeur atteinte par la limite inférieure des *Posidonies* constitue souvent un indice de la «qualité» des eaux: si les masses d'eaux littorales sont généralement claires la limite est profonde; inversement, si les eaux sont souvent turbides, la limite est élevée.

L'aspect de l'herbier est très irrégulier selon les sites parcourus. Il est en régression sensible au niveau de sa limite inférieure dans toute la Baie de Roquebrune Cap Martin. Il est altéré dans toute sa masse au Nord et à l'Ouest de la zone de rejet de l'émissaire de Vallauris-Golfe Juan (figs. 2 et 3).

La richesse des observations recueillies à bord du GRIF-FON, complétées par des observations ponctuelles effectuées en plongée sous-marine, nous a permis de définir et de classer les différents aspects de l'herbier au niveau de sa limite inférieure. Cette étude, purement descriptive, est accompagnée de nombreuses hypothèses qui devront être vérifiées. Des mesures d'irradiance à long terme, des mesures de courantologie, l'analyse pédologique du substrat ainsi que des mesures localisées concernant la dynamique de l'herbier (balisage) devraient permettre de vérifier ces hypothèses.

#### Remerciements

Nous remercions le Capitaine de Vaisseau Fritch Commandant du Groupe d'Intervention sous la mer, le Capitaine de Corvette Thery, commandant le bâtiment d'intervention et d'exploration sous la mer «TRITON», le lieutenant de Vaisseau Plançon, Commandant du sous-marin d'exploration «GRIFFON» et tous les officiers et hommes d'équipage du TRITON et du GRIFFON pour avoir participé avec dévouement à l'opération Poséidon 76. Nous remercions également le personnel de la CIPAIM: les brigadiers chargés de déplacer et de surveiller les balises à terre, ainsi que les dessinateurs des cartes (MM. Amoros et Candela).

## Bibliographie

- Astier, J. M. 1972. Régression de l'herbier de Posidonies en rade de Vignettes à Toulon. *Ann. Soc. Sci. nat. Archeol. Toulon* 24: 97-103.
- Astier, J. M. 1975. Cartographie des fonds marins de la région de Toulon par le Groupe *ECOMAIR*. *Ann. Soc. Sci. nat. Archeol. Toulon*: 1-15.
- Astier, J. M. et P. Tailliez. 1976. Impact, des effluents du grand collecteur du Cap Sicie (égouts de Toulon, la Seyne, Six Fours) sur la vie des fonds marins. *Document publié par la commission extra-municipale d'écologie marine «Ecomair-Toulon»*. 27 pp.
- Augier, H. et C. F. Boudouresque. 1970. Végétation marine de l'île de Port Cros (Parc national) (V): La baie de Port-Man et le problème de la régression de l'herbier de Posidonies. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille* 30: 145-164.
- Augier, H. et C. F. Boudouresque. 1970. Végétation marine de l'île de Port Cros (Parc national) VI: Le récif barrière de Posidonies. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille* 30: 221-228.
- Chevalier, M. A. 1917. Etude bathylithologique des côtes de la Méditerranée d'Antibes à Menton. *Ann. Inst. Océanogr. de Monaco* 7: 1-36.
- Cooper, G. 1976. La culture des Posidonies. *Cahier n° 1 de l'Association Fondation G. Cooper - Marin-pêcheur*. p. 7-40.
- Cuyelier, M. 1976. Surveillance en temps réel de l'évolution des herbiers: nouvelle méthode de recensement des herbiers par cartographie au sonar latéral. *Rapport P. V. Réunions Com. int. Explor. Sci. Médit.* (sous presse), 3 pp.
- Giraud, G., C. F. Boudouresque, J. Marcot, A. Meinesz, M. Verlaque. 1976. Indices foliaires de *Posidonia oceanica* (Linné) Delile en Corse et dans la région marseillaise. *Rapport P. V. Réunions Com. int. Explor. Sci. Médit.* (sous presse), 2 pp.
- Harmelin, J. G. 1976. L'herbier de Posidonies de Port Cros régresse-t-il? Mise en place de jalons témoins à sa limite. *Trav. Sci. Parc nation. Port Cros* 2: 189-190.
- Harmelin, J. G. et M. A. True. 1964. Délimitation cartographique de l'extension actuelle des herbiers de *Posidonia oceanica* Delile dans le Golfe de Marseille. *Rec. Trav. Stn. mar. Endoume* 34 (50): 157-160.
- Harmelin, J. G., et J. Laborel. 1976. Note préliminaire sur la morphologie de l'herbier profond de Posidonies, *Posidonia oceanica* (Linné) Delile, à Port Cros. *Trav. Sci. Parc nation Port Cros* 2: 105-113.
- Kremer, Y. 1974. *Littoral et précontinent de Menton (A. M.) Morphologie, sédimentologie et structure*. Thèse de doctorat de spécialité - Université de Nice. Laboratoire de Géologie et de sédimentologie - 160 pp.
- Maggi, P. 1972. Les herbiers à Posidonies et la pollution urbaine dans le Golfe de Giens (VAR). *Ann. Inst. Michel Pacha* 5: 1-11.
- Maggi, P. 1973. Le problème de la disparition des herbiers de Posidonies dans le Golfe de Giens. *Sci. Pêche, Bull. Inst. Pêches marit.* 221: 7-20.
- Marion, A. F. 1883. Esquisse d'une topographie zoologique du Golfe de Marseille. *Ann. Mus. Hist. nat. Marseille Zoologie* 1: 6-108.
- Meinesz, A. 1976. Balisage de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* en Rade de Villefranche (A. M.) France. *Rapp. P. V. Réunions Comm. int. Explor. Sci. Médit.* (sous presse) 2 pp.
- Meinesz, A. 1977. Surveillance des herbiers de Posidonies dans la réserve sous-marine de Scandola. *Courrier du Parc de la Corse* 26: 24-27.
- Meinesz, A. et J. R. Lefèvre. 1976. L'aménagement de la côte entre Menton et Théoule (Alpes-Maritimes et Monaco). Inventaire des restructurations du rivage et impacts sur la vie sous-marine littorale. *S. O. S. Vie, nature, environnement* 19: 1-35.
- Molinier, R. et J. Picard. 1952. Recherches sur les herbiers de phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Ann. Inst. Océanogr. Paris* 27 (3): 157-234.
- Ollivier, G. 1929. Etude de la Flore marine de la Côte d'Azur. *Ann. inst. Océanogr. Paris* 7 (3): 1-173.
- Pérès, J. M. et J. Picard. 1975. Cause de la raréfaction et de la disparition des herbiers de *Posidonia oceanica* sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Aquatic Bot.* 1 (2): 133-139.