

UTILISATION DE L'HERBIER A *POSIDONIA OCEANICA* COMME INDICATEUR BIOLOGIQUE DE LA QUALITÉ DU MILIEU LITTORAL EN MÉDITERRANÉE : ÉTAT DES CONNAISSANCES

**Gérard PERGENT ⁽¹⁾, Christine PERGENT-MARTINI ⁽¹⁾,
Charles-François BOUDOURESQUE ⁽²⁾**

(1) Eq.E.L. & EP CNRS 75, Université de Corse, Faculté des Sciences, 20250 Corte, France

(2) L.B.M.E.B. & EP CNRS 75, Faculté de Luminy, 13288 Marseille Cedex 9, France

RÉSUMÉ

L'utilisation de bioindicateurs apparaît aujourd'hui comme un moyen d'investigation des plus appropriés dans toute recherche d'écologie appliquée en général et, plus particulièrement, en écotoxicologie. Ils permettent notamment d'évaluer l'importance et la variation de la qualité (transparence, oxygénation) et/ou de la contamination du milieu marin (polluants chimiques d'origine minérale ou organique, matières organiques). De plus, les polluants xénobiotiques peuvent très souvent se bioconcentrer dans des organismes, ce qui présente un intérêt majeur pour le monitoring de ces polluants dans l'environnement. Ces bioindicateurs, surtout lorsqu'ils présentent une durée de vie importante, intègrent la contamination moyenne du milieu et ses variations dans le temps.

*L'herbier à *Posidonia oceanica*, phanérogame marine endémique de Méditerranée, constitue un puissant intégrateur de la qualité globale des eaux littorales. Très largement distribué sur tout le littoral méditerranéen, particulièrement sensible à la pollution et aux agressions liées aux activités humaines, solidaire du fond, il rend compte, par sa présence et sa vitalité (ou sa régression matérialisée par des mattes mortes), de la qualité des eaux qui dérivent au-dessus de lui. L'empreinte de la qualité des eaux sur les herbiers à *Posidonia oceanica* est permanente, elle ne dépend, ni du sens du vent ni des courants.*

Les nombreuses études réalisées à ce jour sur la vitalité des herbiers, tout autour du bassin méditerranéen, ont permis de progresser de façon importante. Plusieurs descripteurs sont d'ores et déjà opérationnels pour caractériser la vitalité d'un herbier et évaluer l'impact de telle ou telle dégradation. D'autres nécessitent encore des études complémentaires, pour optimiser leur signification et/ou pour développer une méthode d'étude standardisée.

*L'utilisation de *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de pollution chimique tend à se développer depuis une vingtaine d'années. En effet, cette phanérogame présente toutes les qualités requises pour une utilisation en ce sens : espèce benthique, longévive, largement répandue dans tout le bassin méditerranéen, présentant un fort pouvoir de concentration vis à vis des polluants chimiques. La découverte récente de la lépidochronologie fait de *Posidonia oceanica* un véritable enregistreur biologique capable de mémoriser les teneurs en métaux traces sur plusieurs décennies. Toutefois un effort de standardisation doit être entrepris, au plus vite, pour développer l'utilisation de cet indicateur de contamination du milieu.*

MOTS-CLÉS : Indicateur biologique, Méditerranée, Phanérogame marine, *Posidonia oceanica*,

ABSTRACT

The use of bioindicators is today recognized as one of the most effective investigation techniques for all applied ecological research, and in particular in the field of ecotoxicology. Bioindicators offer the means to assess the degree and variability of the quality (transparency, oxygenation) and/or the contamination of the marine environment (chemical pollutants of mineral or organic origin, organic matter). Moreover, the xenobiotic pollutants may often be bioconcentrated in organisms, which makes them of major interest for monitoring these pollutants in the natural environment. These bioindicators record the mean contamination of the environment and its variations over time.

*The meadow of *Posidonia oceanica*, a marine phanerogam endemic to the Mediterranean, constitutes a powerful record of the overall quality of the coastal water. Very widespread throughout the Mediterranean coastline, particularly sensitive to pollution and the impact of human activities and fixed to the bottom, *Posidonia oceanica* provides evidence by its presence and vitality (or its regression as shown by dead matte) of the quality of the overlying water. The imprint of the water quality on the *Posidonia oceanica* meadows is permanent, and does not depend on the direction of the wind or currents.*

The extensive research that has been carried out on the vitality of the meadows throughout the Mediterranean basin has enable considerable progress to be made. Several descriptors are already being used to characterize the vitality of a meadow and assess the impact of one or other form of degeneration. Others still require further study in order to fully exploit their possible significance and/or to develop a standard method of investigation.

*The use of *Posidonia oceanica* as a biological indicator of chemical pollution has been developing progressively over the past twenty or so years. This phanerogam meets all the requirements for this role : its longevity, the fact that it is a benthic species, is widespread in the Mediterranean and has a strong capacity for concentrating chemical pollutants. The recent discovery of the technique of lepidochronology has made *Posidonia oceanica* into a biological " recorder " that is capable of memorizing trace metal contents over several decades. Nevertheless, work is urgently required to standardize procedures if the use of this environmental contamination indicator is to develop.*

KEY-WORDS : Biological indicator, Mediterranean, marine phanerogam, *Posidonia oceanica*.

A - INTRODUCTION

Les écosystèmes méditerranéens présentent un intérêt écologique majeur par rapport aux autres zones biogéographiques de la biosphère; toutefois la région méditerranéenne, et plus particulièrement les écosystèmes propres aux zones littorales, figure parmi les plus menacées. Une des causes de cette dégradation est représentée par les considérables sources de pollution qui se concentrent plus particulièrement dans les parties côtières et la zone néritique marine (Ramade, 1990). Compte tenu de l'interdépendance entre les écosystèmes marins et continentaux, il est apparu très vite que les activités terrestres de la plupart des pays riverains étaient la cause d'importantes dégradations marines.

L'utilisation de bioindicateurs apparaît aujourd'hui comme un moyen d'investigation des plus appropriés dans toute recherche d'écologie appliquée en général et, plus particulièrement, en écotoxicologie. Ils permettent notamment d'évaluer l'importance et la variation de la qualité (transparence, oxygénation) et/ou de la contamination du milieu marin (polluants chimiques d'origine minérale ou organique, matière organique). De plus, les polluants xénobiotiques peuvent très souvent se bioconcentrer dans des organismes, ce qui présente un intérêt majeur pour le monitoring de ces polluants dans l'environnement. Ces bioindicateurs, surtout lorsqu'ils présentent une durée de vie importante intègrent la contamination moyenne du milieu et ses variations dans le temps.

Les phanérogames marines dans leur ensemble sont tout particulièrement indiquées pour ce type d'étude. En effet, de nombreuses recherches montrent qu'elles sont capables, à l'instar d'autres phanérogames aquatiques (Guilizzoni, 1991), d'intégrer aussi bien la qualité générale d'un milieu que sa concentration en polluants chimiques (Augier, 1985; Pergent, 1991b).

Posidonia oceanica est une phanérogame marine, endémique de la Méditerranée, qui constitue de vastes prairies sous-marines, appelées herbiers, entre la surface et 30 à 40 mètres de profondeur (Molinier & Picard, 1952; Pérès & Picard, 1964; Meinesz & Laurent, 1978; Giraud, 1980). Les feuilles, de 80 cm de long en moyenne pour 1 cm de large, sont groupées en faisceaux de 6 à 8 feuilles à l'extrémité de tiges, appelées rhizomes. La croissance des rhizomes peut être horizontale ou verticale, ce qui permet à la plante de lutter contre l'enfouissement (Boudouresque & Jeudy de Grissac, 1983). Les rhizomes, les racines, et le sédiment qui colmate les interstices, constituent un ensemble extrêmement compact que l'on nomme matre. A l'automne, des inflorescences de 4 à 10 fleurs peuvent apparaître et donner naissance à des fruits. Entre Mai et Juillet, les fruits, sortes d'olives brun foncé, se détachent et assurent la dissémination de l'espèce. Toutefois la reproduction se fait, le plus souvent, de manière asexuée par bouturage.

L'herbier à *Posidonia oceanica* constitue la base de la richesse des eaux littorales en Méditerranée (Molinier & Picard, 1952; Cinelli *et al.*, 1974; Boudouresque & Meinesz, 1982) :

- par les surfaces qu'il occupe : entre 1 et 2% des fonds de la

Méditerranée, soit 2.5 à 5 millions d'hectares (Pergent, 1993),

- par le rôle essentiel qu'il joue au niveau écologique : production et exportation de grandes quantités de matière végétale, production d'oxygène, lieu de frayère, de nurseries ou habitat permanent pour des milliers d'espèces animales et végétales = pôle de biodiversité (Boudouresque & Meinesz, 1982; Bell & Harmelin-Vivien, 1983; Chraïbi, 1987; Romero *et al.*, 1992),

- par son action au niveau des équilibres littoraux : stabilisation des fonds meubles, atténuation de la puissance des courants et de la houle, protection des plages (Blanc & Jeudy de Grissac, 1984; Jeudy de Grissac & Boudouresque, 1985; Gambi *et al.*, 1989).

L'importance des herbiers à *Posidonia oceanica* est telle, que cette espèce est inscrite sur la liste des espèces menacées de Méditerranée dans le cadre du PNUE (PNUE, 1990), elle est protégée en France, dans le cadre de la loi du 10 Juillet 1976 relative à la protection de la nature, par l'arrêté du 19 Juillet 1988 relatif à la liste des espèces végétales marines protégées (Pergent, 1991a) même si ce n'est pas réellement l'espèce qui est menacée mais plutôt l'écosystème qu'elle édifie (Boudouresque *et al.*, 1995). Cette protection est confirmée par le décret du 20 Septembre 1989 (code de l'urbanisme, dispositions particulières au littoral). Des textes similaires existent en Espagne (Catalogne, Ordre du 31 Juillet 1991; Comunidad Valenciana, Ordre du 23 Janvier 1992) appuyés par des recommandations internationales (Directive Habitats de l'Union Européenne en date du 21 Mai 1992 ratifiée par les états membres signataires de la Convention de Barcelone)

Mais l'herbier à *Posidonia oceanica* constitue surtout un puissant intégrateur de la qualité globale des eaux marines (Giaccone, 1981; Augier, 1985; Pergent, 1991b). Très largement distribué sur tout le littoral méditerranéen, particulièrement sensible à la pollution (Bourcier, 1976; Augier *et al.*, 1984a) et aux agressions liées aux activités humaines (Meinesz & Lefèvre, 1978; Jeudy de Grissac & Tiné, 1980; Ardizzone & Pelusi, 1984; Charbonnel *et al.*, 1992), solidaire du fond, il rend compte, par sa présence et sa vitalité (ou sa régression matérialisée par des matres mortes), de la qualité des eaux qui dérivent au-dessus de lui. L'empreinte de la qualité des eaux sur les herbiers à *Posidonia oceanica* est permanente, elle ne dépend, ni du sens du vent ni des courants.

De plus, *Posidonia oceanica* présente la particularité de conserver le long de son rhizome des restes de tissus foliaires (anciens pétioles), dont l'âge peut être très précisément connu (lépidochronologie). Il est donc possible, à partir de ce bioindicateur (i) d'évaluer la qualité moyenne du milieu " intégrée " dans les tissus foliaires vivants, mais également, (ii) de suivre l'évolution de ce milieu sur de longues périodes de temps (au moins 20 ans) dans les pétioles conservés au sein de la matre.

Si les études consacrées à l'utilisation de *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu sont chaque année plus nombreuses, il n'existe à ce jour aucune synthèse récente. En effet, bien que des efforts importants soient faits pour standardiser les méthodes d'études (biométrie foliaire, lépidochronologie in Boudouresque & Pergent,

1992), leur emploi reste relativement sporadique. Quant à l'interprétation, elle fait appel à des données parfois imprécises (polluants stables) ou incomplètes (types d'herbiers / densité des faisceaux). Aussi, l'objectif de cette synthèse est-il (i) de sélectionner plusieurs paramètres spécifiques de *Posidonia oceanica* (descripteurs) pouvant traduire rapidement l'état d'un milieu, y compris sa contamination, et (ii) de fournir un protocole d'étude standardisé et une " grille " de lecture et d'interprétation des résultats.

B - ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LA VITALITÉ DE L'HERBIER

1. - Limite inférieure

Description

La répartition bathymétrique de l'herbier à *Posidonia oceanica* s'étend entre la surface (récifs-barrières) et 30 à 40 m de profondeur en eau claire; ce qui correspond globalement à l'étage infralittoral. La limite inférieure (extension bathymétrique maximale) rend compte de la profondeur de compensation (respiration = photosynthèse). En effet, comme tout végétal chlorophyllien, *Posidonia oceanica* a besoin d'une quantité suffisante de lumière pour assurer sa photosynthèse. La croissance de la plante n'est possible que si la photosynthèse compense la respiration.

La position de cette limite dépend donc essentiellement de la transparence moyenne des eaux. Elle est d'autant plus profonde que la transparence est élevée. Dans des secteurs où la turbidité des eaux est importante (rejets en mer d'émissaires ou embouchure de fleuves côtiers), la lumière est absorbée beaucoup plus rapidement, et la position de cette limite se rapproche de la surface.

La position et l'état de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* est mentionnée dans plus de 150 publications scientifiques. Dans les zones où la transparence de l'eau est maximale, ces auteurs signalent des limites généralement situées à plus de 35 m de profondeur et des faisceaux

vivants pouvant atteindre 50 m (Tableau 1). En revanche lorsque la transparence des eaux diminue, on assiste à une remontée de la limite inférieure. Par exemple, dans des secteurs caractérisés par des apports importants en matières en suspension (particules d'origine minérale ou organique) la limite inférieure s'établit entre 10 et 15 m; c'est notamment le cas à proximité du débouché de fleuves côtiers ou du rejet en mer d'émissaires urbains ou industriels (Tableau 2).

Outre sa position bathymétrique, la limite inférieure présente des aspects différents en fonction de l'évolution des conditions du milieu. On distingue classiquement quatre types de limites (Figure 1).

- Les limites progressives, caractérisées par la présence de rhizomes horizontaux disposés parallèlement au sens de la pente. L'herbier n'édifie pas de matte mais il colonise des substrats situés plus profondément. Elles traduisent en principe une amélioration, au moins momentanée, de la transparence des eaux.

- Les limites brusques, caractérisées par la présence de rhizomes partiellement verticaux mais sans édification de matte. En avant de cette limite le substrat n'est pas constitué de matte morte. Le manque de lumière semble à l'origine de ce type de limite. Elles correspondent souvent à une stabilisation des conditions de milieu (transparence des eaux).

- Les limites érosives, caractérisées par la présence de petits tombants de matte. Ces formations résultent de courants de fond qui érodent l'herbier et interdisent toute progression. L'hydrodynamisme semble donc être à l'origine de cette limite.

- Les limites régressives, caractérisées par la présence de mattes mortes et de quelques faisceaux témoins en avant de cette limite. Elles traduisent ainsi une remontée de l'herbier. Ces limites, assez répandues, sont vraisemblablement liées à une augmentation de la turbidité moyenne des eaux.

Tableau 1 : Extension bathymétrique maximale de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* en eau claire.

Références	Localité	Limite inférieure	Faisceaux vivants
Augier & Boudouresque, 1979	Ile du Levant (Var)	43 m	48 m
Boudouresque & Bianconi, 1986	Scandola (Corse)	40 m	44 m
Colantoni <i>et al.</i> , 1982	Ischia (Italie)	39 m	-
De Vaugelas & Meinesz, 1992	Ile Cerbicale (Corse)	40 m	-
Francoeur, 1990	Port-Cros (Var)	37 m	-
Giraud <i>et al.</i> , 1979	Ischia (Italie)	38 m	-
Meinesz, 1987	Bagaud/Port-Cros (Var)	39 m	-
Meinesz & Bianconi, 1986	Scandola (Corse)	36 m	-
Meinesz <i>et al.</i> , 1987	Scandola (Corse)	40 m	-
Meinesz <i>et al.</i> , 1988	Lavezzi (Corse)	38 m	-
Meinesz & Laurent, 1982	Iles de Lérins (Alpes Maritimes)	35 m	-
Natali 1992	Iles Sanguinaires (Corse)	38 m	-

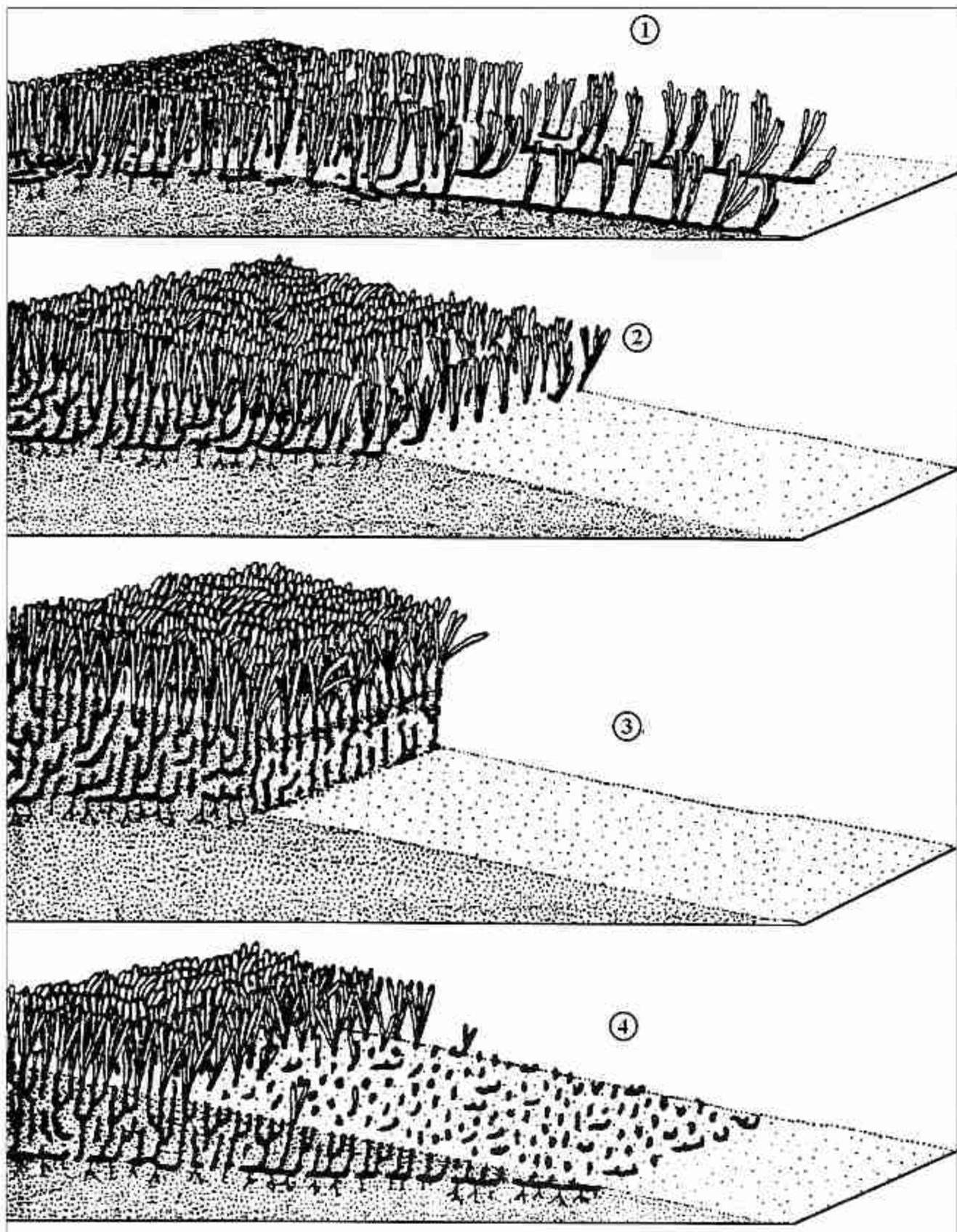


Fig. 1 : Différents types de limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* : (1) : Limite progressive, (2) : Limite brusque, (3) : Limite érosive, (4) : Limite régressive (d'après Meinez et Laurent, 1978, modifié par Boudouresque).

Tableau 2 : Extension bathymétrique maximale de la limite inférieure de l'herbier à *Posidonia oceanica* lorsque la transparence des eaux est réduite.

Références	Localité	Limite inférieure
Astier, 1984	Toulon (Var)	10 - 15 m
Avril <i>et al.</i> , 1984	Les Aresquiers (Hérault)	12 - 15 m
Azouz, 1980	Gabès (Tunisie)	15 m
Ben Mustapha <i>et al.</i> , 1993	Gabès (Tunisie)	10 m
Blanc et Joudy de Grissac, 1978	Pontau (Bouches-du-Rhône)	10 m
Bodoy <i>et al.</i> , 1982	Aigues-Mortes (Hérault)	15 m
Darmoul, 1988	Gabès (Tunisie)	10 m
Gautier, 1957	Golfe de Fos (Bouches-du-Rhône)	9 - 15 m
Ktari-Chakroun et Azouz, 1971	Gabès (Tunisie)	10 - 15 m
Pergent, 1991b	Cortiou (Bouches-du-Rhône)	9 m
Pergent-Martini et Pergent, 1993	Cortiou (Bouches-du-Rhône)	9 - 10 m

Protocole d'étude

La profondeur de la limite inférieure de l'herbier est généralement estimée en plongée à l'aide d'un profondimètre électronique (précision ± 10 cm); compte tenu de la marée, la précision est généralement de l'ordre de ± 0.5 m. Dans un secteur donné, il est recommandé d'effectuer plusieurs mesures distantes de quelques dizaines de mètres le long de la limite, afin d'obtenir une valeur moyenne.

Outre la localisation bathymétrique précise de cette limite (mesure ponctuelle), il apparaît également très intéressant de suivre son évolution dans le temps. En effet, toute régression ou progression de cette limite apparaît de nature à nous renseigner quant à l'évolution de la turbidité (ou de la transparence) des eaux. La mise en place d'un balisage peut se révéler nécessaire. Bien que les expériences de ce type soient nombreuses dans la littérature, il paraît opportun d'utiliser un protocole standardisé et dont la fiabilité a déjà été testée à grande échelle. A cet égard, le choix de la méthode développée dans le cadre du Réseau de Surveillance Posidonies de la région PACA semble le plus judicieux (Boudouresque *et al.*, 1990). Basée sur la mise en place de repères fixes (10 à 12 balises espacées de 5 m les unes des autres) au contact de l'herbier et de photographies de ces balises (généralement au printemps), elle permet de définir exactement la position de l'herbier en arrière de chacune d'elles et de suivre toute évolution temporelle. La fiabilité de cette technique permet de détecter des variations, de quelques dizaines de centimètres, de la position de la limite inférieure.

Interprétation

Bien qu'il soit difficile d'établir une échelle stricte permettant de corréler la transparence des eaux à la position de la limite inférieure, d'autres facteurs comme l'hydrodynamisme pouvant intervenir, il est possible d'utiliser le classement ci-après (Tableau 3). Il s'applique aux limites progressives, brusques ou régressives. Bien qu'empirique, il devrait servir de base à des études plus précises prenant notamment en compte les pourcentages d'absorption de la lumière. En revanche, dans la mesure où les limites érosives sont essentiellement engendrées par des phénomènes d'ordre hydro-

dynamique, cette échelle de classement ne s'avère pas adaptée dans ce cas.

Tableau 3 : Echelle d'évaluation de la transparence des eaux en fonction de la profondeur moyenne de la limite inférieure

Profondeur	Interprétation
Supérieure à -15 m	Eaux très peu transparentes
-15 à -25 m	Eaux peu transparentes
-25 à -35 m	Eaux transparentes
Inférieure à -35 m	Eaux très transparentes

En ce qui concerne l'évolution de la position d'une limite, par la mise en place d'un balisage, un pas d'observation de trois ans, avec des remises en état régulières (une par an) semble un bon compromis. Toutefois, dans le cas d'une modification importante du milieu, pouvant entraîner une modification de la transparence de l'eau, des observations plus rapprochées doivent être envisagées.

2. - Phénologie

Les critères phénologiques peuvent apparaître comme de bons indicateurs de la vitalité de *Posidonia oceanica* et, par là même, de la qualité moyenne du milieu où elle se développe. Cependant, l'un des principaux obstacles réside dans le fait que ces paramètres sont fortement influencés par le facteur "saison". Il faut donc, généralement, disposer de mesures réalisées à différentes périodes de l'année pour évaluer avec précision ces indices. Aussi, compte tenu de leur diversité, seuls les paramètres ne présentant pas ces fluctuations saisonnières marquées seront abordés de façon détaillée.

2.1. Densité de l'herbier

Description

La densité d'un herbier à *Posidonia oceanica* correspond au nombre de faisceaux par unité de surface, généralement le mètre carré. Les faisceaux en division sont dénombrés comme des faisceaux différents, à partir du moment où une écaille (traduisant la chute d'une feuille) est visible entre les deux nouveaux faisceaux.

Ce paramètre est tout particulièrement intéressant, au niveau de sa mise en oeuvre, car il reste constant tout au long de l'année et dépend peu de la période à laquelle est réalisée la mesure, même si la division des faisceaux foliaire se produit au printemps et en automne (Caye, 1982). De plus, il bénéficie de protocoles d'étude standardisés et d'une échelle d'évaluation, adoptée par de nombreux chercheurs. Elle permet de distinguer différents types d'herbiers en fonction de leur densité (Tableau 4).

Tableau 4 : Classement des herbiers à *Posidonia oceanica* en fonction de la densité des faisceaux foliaires (d'après Giraud, 1977). Au-dessous de 50 faisceaux par m², on ne parle plus d'herbier mais de tiges isolées.

	Densité (Nb. faisce./m ²)	Description
Type I	plus de 700	Herbiers très denses
Type II	400 à 700	Herbiers denses
Type III	300 à 400	Herbiers clairsemés
Type IV	150 à 300	Herbiers très clairsemés
Type V	50 à 150	Semi-herbiers

La densité de l'herbier varie en fonction, d'une part, de la profondeur et, d'autre part, des conditions du milieu (lumière, type de substrat). En effet, la densité est fortement liée à la quantité d'énergie lumineuse disponible (Pirc, 1984); ainsi, l'herbier présente une densité très élevée dans les stations superficielles alors qu'elle est plus réduite en profondeur (limite inférieure) ou en zones particulièrement turbides. De même, Cristiani (1980) montre que, dans des stations comparables (profondeur, hydrodynamisme et transparence des eaux), les herbiers qui se développent sur substrats durs présentent des densités plus élevées que sur substrats meubles. Toutefois, compte tenu de leur recouvrement, plus faible, la densité moyenne de ces herbiers, ramenée au m², est équivalente.

Les valeurs relevées dans la littérature (Figure 2) montrent des variations très importantes (23 à 1 278 faisceaux par m²) en fonction de la station considérée (profondeur, substrat, localité). Ce paramètre est complémentaire de la position bathymétrique de la limite inférieure, car il permet d'évaluer la transparence des eaux, non seulement au niveau de cette limite, mais également, sur toute la zone d'extension bathymétrique de l'herbier. Il faut toutefois prendre en compte la structure agrégative de l'herbier (répartition en taches) dans l'évaluation de sa densité moyenne, par la réalisation de répliques (Panayotidis *et al.*, 1981).

Aussi l'échelle de Giraud (1977), si elle permet de caractériser un herbier, n'intègre pas le facteur profondeur. Elle est donc peu adaptée à la prise en compte de ce paramètre en tant qu'indicateur biologique de la qualité du milieu. En effet, une densité de 450 faisceaux par m² (herbiers denses) n'aura pas la même signification si elle est mesurée à 5 m ou 20 m de profondeur. De la même manière la probabilité de rencontrer un herbier très dense au niveau d'une limite inférieure située au-delà de 20 m de profondeur est quasi-inexistante.

Protocole d'étude

Les mesures de densité sont réalisées dans des quadrats de dimension standardisée (40 cm de côté); mais, du fait que l'herbier se présente souvent sous forme de petites touffes de moins de 40 cm de côté en limite inférieure, la taille du quadrat peut alors être ramenée à 20 cm de côté dans ces stations (Boudouresque & Pergent, 1992).

Le nombre de répliques doit correspondre à une estimation de la densité moyenne dont l'intervalle de confiance doit être inférieur à 20%; sauf cas particuliers un nombre de 10 répliques satisfait à cette condition. Les mesures sont réparties de façon

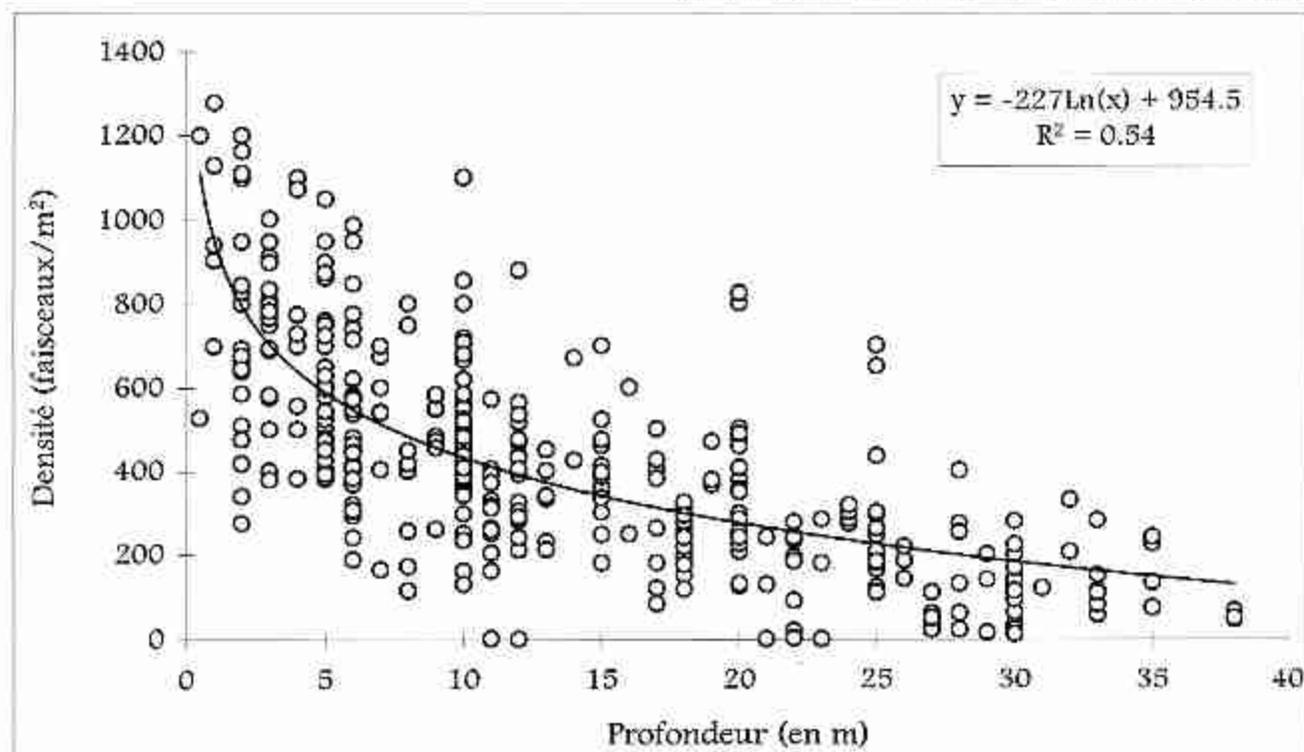


Fig. 2 : Évolution de la densité de l'herbier à *Posidonia oceanica* en fonction de la profondeur, à partir des données de la littérature. L'équation de la régression et le coefficient de détermination sont indiqués.

aléatoire dans l'herbier. Les quadrats sont lancés d'une hauteur de un mètre et le comptage s'effectue au point de chute.

Interprétation

L'échelle de Giraud (1977) convient tout à fait à la caractérisation d'un herbier donné (type d'herbier). Toutefois, l'utilisation de ce paramètre, en tant qu'indicateur biologique, nécessite de faire la part entre les variations liées à la profondeur, et celles liées aux autres facteurs (e.g. turbidité, substrat).

Un essai de classification introduisant l'effet de la profondeur sur la densité de l'herbier a déjà été réalisé par Romero-Martinengo (1985). Ce classement est basé sur l'expression exponentielle générale $d = d_0 \cdot e^{-k \cdot p}$, où d représente la densité, d_0 la densité maximale de l'herbier (en théorie pour une profondeur nulle), p la profondeur et k le taux de diminution des faisceaux en fonction de la profondeur. Comme le suggère Romero-Martinengo (1985), la constante k est fonction du coefficient d'atténuation de la lumière λ , paramètre dont dépend l'extension bathymétrique des phanérogames (Duarte, 1991). Il devient alors théoriquement possible de caractériser un herbier en fonction des valeurs de d_0 et de k . Ainsi des valeurs basses de d_0 traduisent des perturbations des herbiers superficiels, alors que des valeurs élevées de k , indiquent une turbidité élevée ou une perturbation des herbiers profonds (e.g. chalutage). Mais, à l'usage, cette classification s'avère souvent malaisée à mettre en œuvre, du fait de l'absence de

certains paramètres. C'est la raison pour laquelle nous avons essayé d'intégrer, de manière simplifiée, le facteur bathymétrie. A partir de la synthèse des données de la littérature (près de 400 valeurs concernant l'ensemble de la Méditerranée), il apparaît que la densité suit un modèle logarithmique classique en fonction de la profondeur (Figure 2).

La variabilité du facteur densité est donc expliquée à 54 % par la profondeur (qui intègre également la pénétration de la lumière), les 46 % restants étant liés à d'autres paramètres comme la turbidité moyenne, la pollution, l'hydrodynamisme ou la nature du substrat. Une comparaison de la densité pour des stations présumées "peu anthropisées" et pour des stations "fortement anthropisées" montre, à profondeur équivalente, des valeurs naturellement plus élevées dans les stations "peu anthropisées" (Figure 3). Alors que pour ces dernières, la part de la variation attribuée à la profondeur est encore plus importante (près de 67 %); en revanche, dans les stations "fortement anthropisées", elle ne représente plus que 41 % de la variation observée. La part de variation imputable à des facteurs autres (e.g. turbidité, pollution, etc.) est donc plus grande. L'équation de la régression, au niveau des stations "peu anthropisées", fournit la densité moyenne que devrait présenter, en théorie, un herbier, situé à une profondeur donnée, en l'absence de toute perturbation (Tableau 5). Il devient alors possible d'interpréter la densité, relevée à une profondeur donnée, en fonction de l'écart entre cette valeur, mesurée *in situ*, et la valeur théorique moyenne.

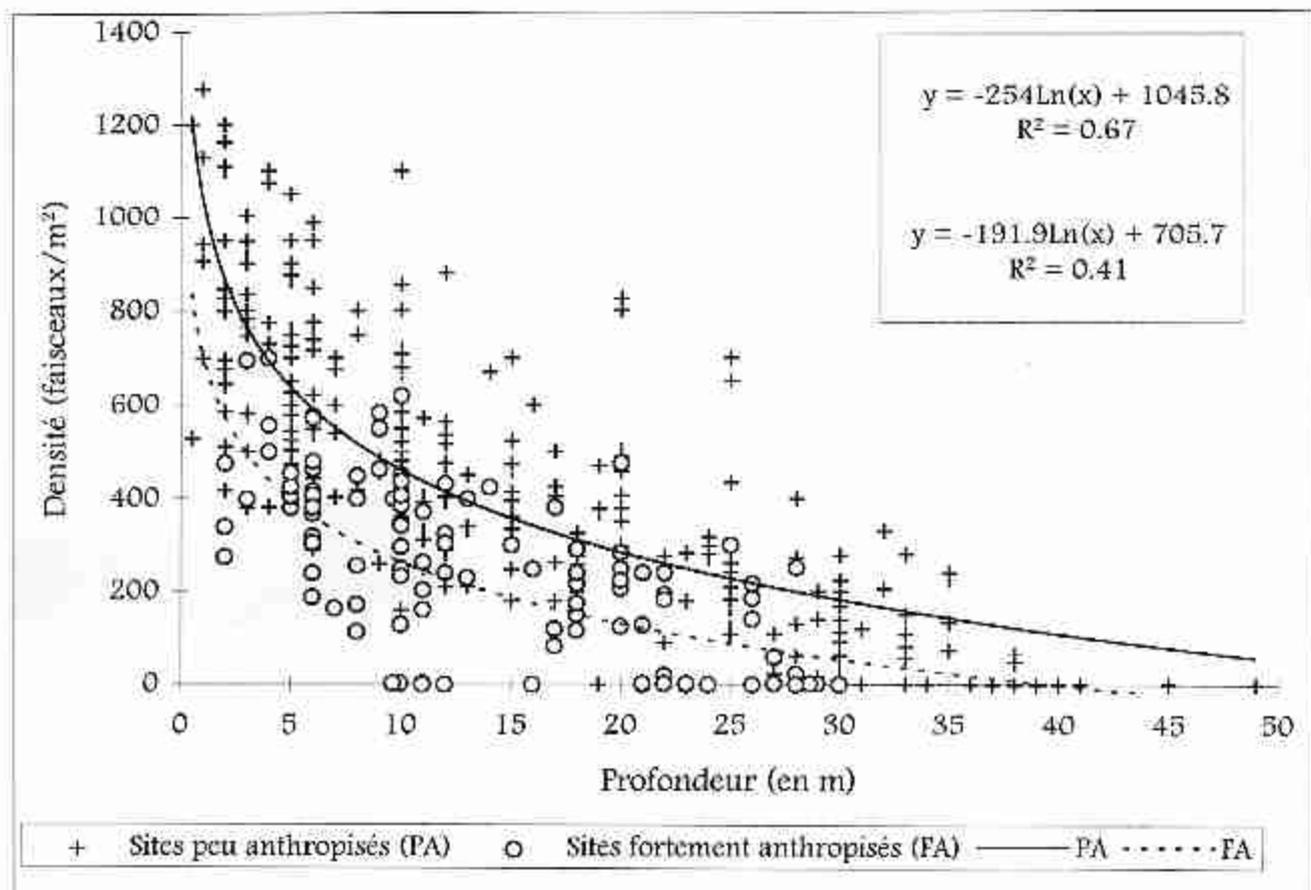


Fig. 3 : Évolution de la densité de l'herbier à *Posidonia oceanica* en fonction de la profondeur, à partir des données de la littérature, dans des sites "peu anthropisés" ou "fortement anthropisés". L'équation de la régression et le coefficient de détermination sont indiqués.

Tableau 5 : Valeur de la densité moyenne théorique en fonction de la profondeur.

Profondeur (en m)	Densité théorique moyenne
1	1046
5	637
10	461
15	358
20	285
25	228
30	182
35	143

Toutefois, il apparaît que l'adéquation entre le modèle théorique et la réalité perd de sa précision pour les profondeurs élevées. En effet, le modèle logarithmique ne parvient pas à traduire le fait que, au-delà d'une certaine profondeur, même dans des sites "propres" la densité est nulle (cf. position de la limite inférieure). Pour remédier à ce biais, une estimation de l'erreur standard moyenne, mesurée au seuil de 95 %, est calculée. Elle permet d'établir une classification simplifiée avec une aire de densité normale, centrée sur le modèle en eaux claires, et, de part et d'autre, des secteurs de densités sub-normales, voire même anormales (Figure 4; Tableau 6).

élevée, le recouvrement peut atteindre 80 à 100%. Il peut présenter des valeurs beaucoup plus faibles lorsque l'herbier est soumis à des conditions de développement défavorables (Tableau 7). Ainsi, il diminue en limite d'extension (limite inférieure) et dans des secteurs soumis à une régression naturelle (hydrodynamisme, sédimentation) ou anthropique (turbidité, destructions mécaniques). Toutefois l'utilisation de ce paramètre peut être entaché d'imprécisions notamment liées à : (i) l'appréciation de l'observateur (précision de 10 à 20 %), et (ii) à la saison où s'effectue la mesure (variations de la longueur des feuilles). De plus, l'absence totale de standardisation de la méthode (surface d'observation, nombre de répliques doit conduire à la plus grande prudence quant à son utilisation. La réalisation de photographies sous-marines verticales (Cristiani, 1980) après la pose d'un cadre de surface connue (16 à 20 m²) sur le fond semble actuellement le meilleur compromis, encore faut-il tenir compte d'une part de la période de mesure et d'autre part du nombre de répliques (micro-structure de l'herbier). Des mesures (5 à 10 répliques), réalisées en hiver ou au printemps, quand la longueur des feuilles et les accumulations de feuilles mortes sur le fond (litière) sont minimales, semblent le meilleur choix. Il est toutefois difficile de proposer une échelle d'interprétation standardisée du fait de la multitude de facteurs pouvant intervenir

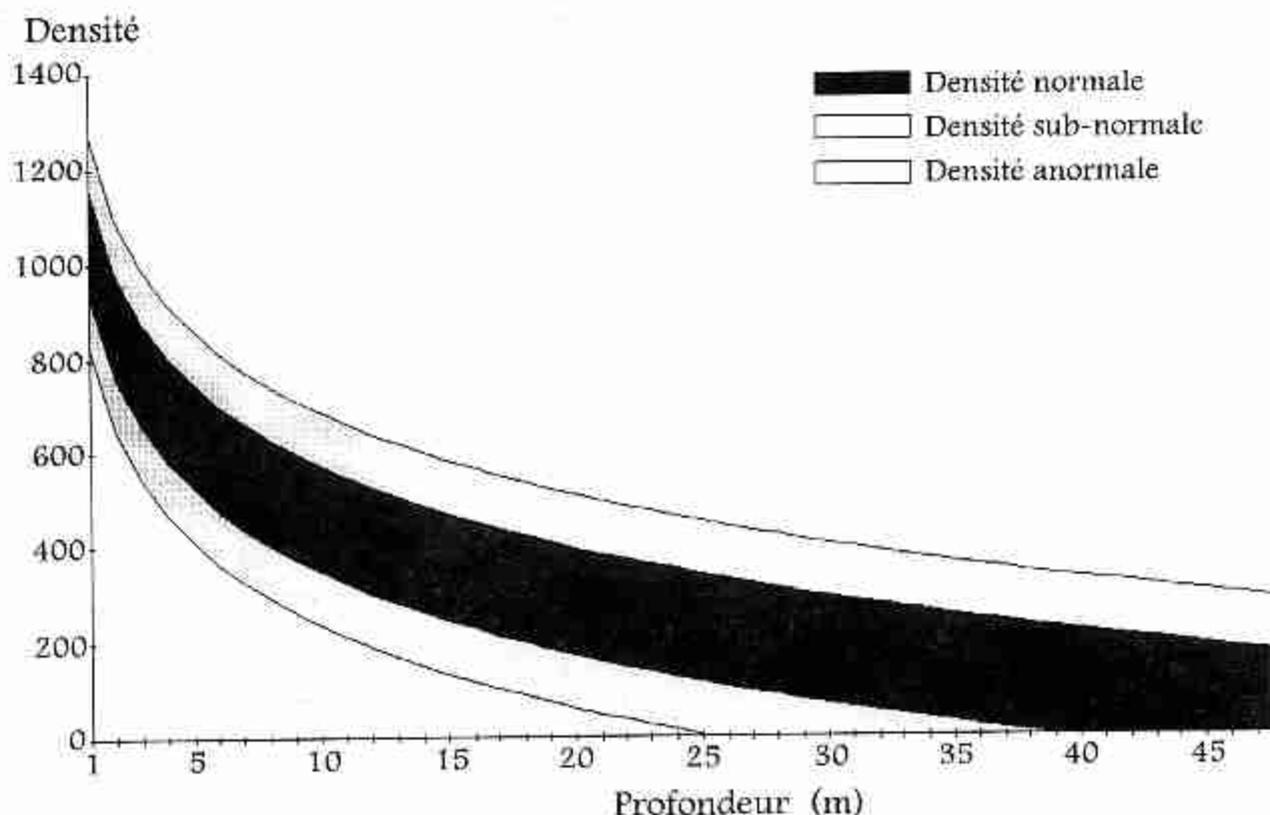


Fig. 4 : Signification de la densité des herbiers en fonction de la profondeur.

2.2. Autres paramètres phénologiques

Recouvrement

Le recouvrement correspond au pourcentage de couverture du substrat par les frondaisons de *Posidonia oceanica* par rapport aux zones non couvertes (sable, matière morte,...) (Figure 5). Dans le cas d'un herbier continu, présentant une vitalité (turbidité, profondeur, hydrodynamisme, contamination chi-

mique, équilibre sédimentaire, ancrages, chalutages,...) et du petit nombre d'études concernant l'évolution de la structure de l'herbier (dynamique temporelle, macro et micro structure). En revanche, l'utilisation de ce paramètre pourrait être généralisé à des opérations de suivi temporel de l'état d'un herbier (impact d'aménagements, réduction de sources de pollution, suivi de limites inférieures,...).

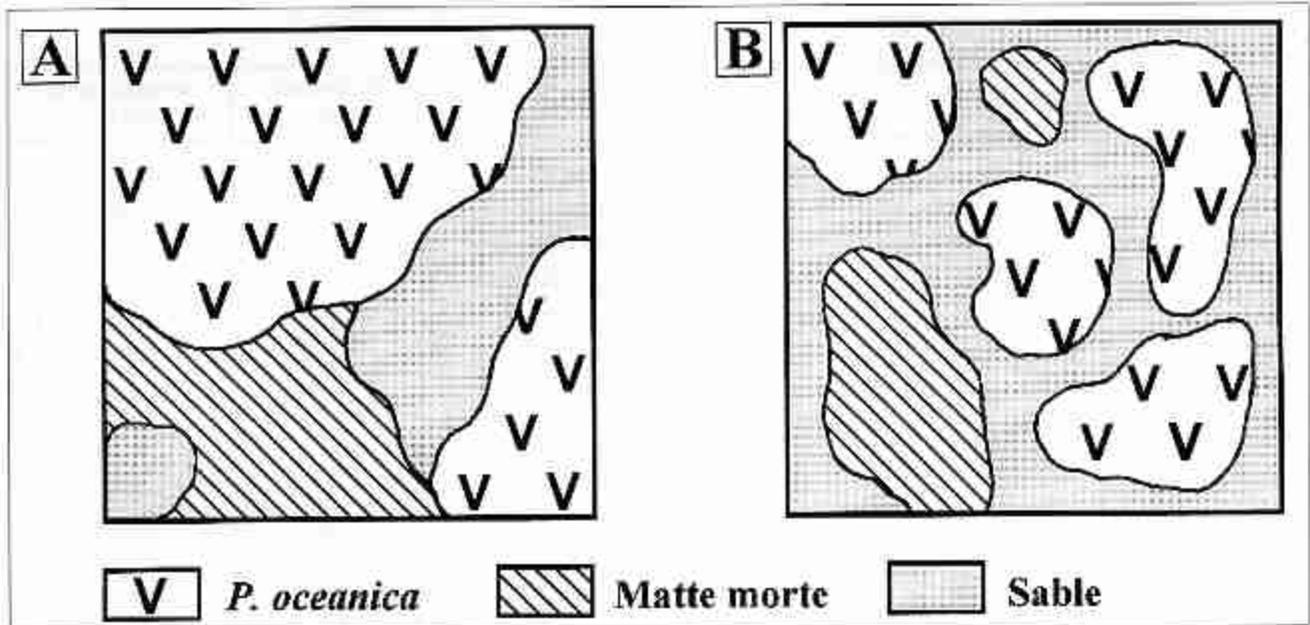


Figure 5 : Estimation du recouvrement d'un herbier à *Posidonia oceanica*. A : recouvrement = 77%. B : recouvrement = 22 %.

Tableau 6 : Classification de la densité des herbiers en fonction de la profondeur. DA : densité anormale ; DSI : densité sub-normale inférieure ; DN : densité normale (en grisé) ; 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	→

Tableau 7 : Recouvrement du substrat (en %) par l'herbier à *Posidonia oceanica* dans différents secteurs de Méditerranée.

Références	Localité	Profondeur (m)	Recouvrement (en %)
Augier, 1983	Marseille (Fr)	-10 à -22	5 à 20
Avril <i>et al.</i> , 1984	Aresquier (Fr)	-7 à -8	> 50
Bertrand <i>et al.</i> , 1988	Carry-le-Rouet (Fr)	-29	22
	Marseille (Fr)	-26	27
	Le Brus (Fr)	-33	< 20
Bertrand <i>et al.</i> , 1989	La Ciotat (Fr)	-33	10
Boudouresque <i>et al.</i> , 1986	Scandola (Corse)	-16	22
Charbonnel <i>et al.</i> , 1992	Bormes (Fr)	-38	10 à 20
Cristiani, 1980	Côte Bleue (Fr)	-3 à -6	32 à 68
Garcia-Charlon <i>et al.</i> , 1993	Port-Cros (Var)	-3,5	40 à 99
Gravez <i>et al.</i> , 1993	Giens (Var)	12	29 à 40
Gravez <i>et al.</i> , 1990	Marseille (Fr)	10	55
Nieri <i>et al.</i> , 1991	Hyères (Var)	-5 à -10	70 à 90
Pergent-Martini <i>et al.</i> , 1992	Corse (Fr)	-10 à -15	40 à 70
Pergent-Martini <i>et al.</i> , 1993a	Riou (Fr)	-18	80
	Cortiou (Fr)	-9	60 à 70
	Sardaigne (It)	-5	73
Rico & Pergent, 1990		-10	76
		-15	69

Déchaussement des rhizomes.

Les rhizomes de *Posidonia oceanica* sont caractérisés par une croissance horizontale (rhizomes plagiotropes) et/ou verticale (rhizomes orthotropes). Cette dernière permet à la plante de lutter contre l'enfouissement lié à la sédimentation: elle est à l'origine de l'édification des mattes. Dans des secteurs présentant soit un hydrodynamisme élevé (tout au moins à certaines périodes), soit un taux de sédimentation très faible, l'apex des faisceaux foliaires se situe bien au-dessus du sédiment (Figure 6). Ce déchaussement des rhizomes, mesuré, qui correspond à la distance entre le point végétatif de la plante et la surface du sédiment (Boudouresque *et al.*, 1984), a pour principale conséquence une fragilisation de l'herbier, qui peut être lourde de conséquences dans certains secteurs exposés à l'hydrodynamisme (Boudouresque & Meinesz, 1982). Le déchaussement des rhizomes peut également résulter d'une perturbation du milieu due à une modification artificielle du régime des courants (aménagement littoraux). A partir des données de la littérature il est possible de distinguer trois situations distinctes :

- (Hyper-sédimentation : Le point végétatif est profondément enfoui dans le sédiment (la ligule¹ de la feuille adulte la plus âgée est elle-même enfouie dans le sédiment)

- Équilibre sédimentaire : Le point végétatif est situé au voisinage du sédiment (la ligule de la feuille la plus, âgée se situe entre 0 et 7 cm au-dessus du sédiment)

1. La ligule correspond à la limite entre le pétiole et le limbe des feuilles adultes.

-Déficit sédimentaire : Le point végétatif est situé très au-dessus du sédiment (la ligule de la feuille la plus âgée se situe entre 8 et 20 cm au-dessus du sédiment)

Toutefois, ce paramètre doit être utilisé avec précaution car le déchaussement apparent d'un herbier peut varier très rapidement en fonction des conditions météorologiques (e.g. marées de sable in Azzolina *et al.*, 1985); seule une technique comme la lépidochronologie est en mesure de nous renseigner précisément sur le taux moyen de sédimentation (C.f. 3 - Lépidochronologie).

Biométrie foliaire

Les variations de la phénologie des faisceaux foliaires de *Posidonia oceanica*, et plus particulièrement leur biométrie foliaire, sont souvent employées pour caractériser un herbier. La prise en compte de ces paramètres est facilitée par l'existence de méthodes d'études standardisées reconnues, et couramment utilisées par l'ensemble des chercheurs méditerranéens. Cette standardisation permet de distinguer trois catégories de feuilles (Giraud, 1977) : (i) les feuilles adultes, pourvues d'un pétiole (base engainante), (ii) les feuilles intermédiaires, sans pétiole et de longueur supérieure à 50 mm, et (iii) les feuilles juvéniles, sans pétiole et dont la longueur est inférieure à 50 mm. Pour chaque faisceau foliaire, les feuilles sont séparées, en respectant l'ordre distique d'insertion, et mesurées selon un protocole précis (Tableau 8). A partir de ces données, il est ensuite possible de calculer plusieurs indices :

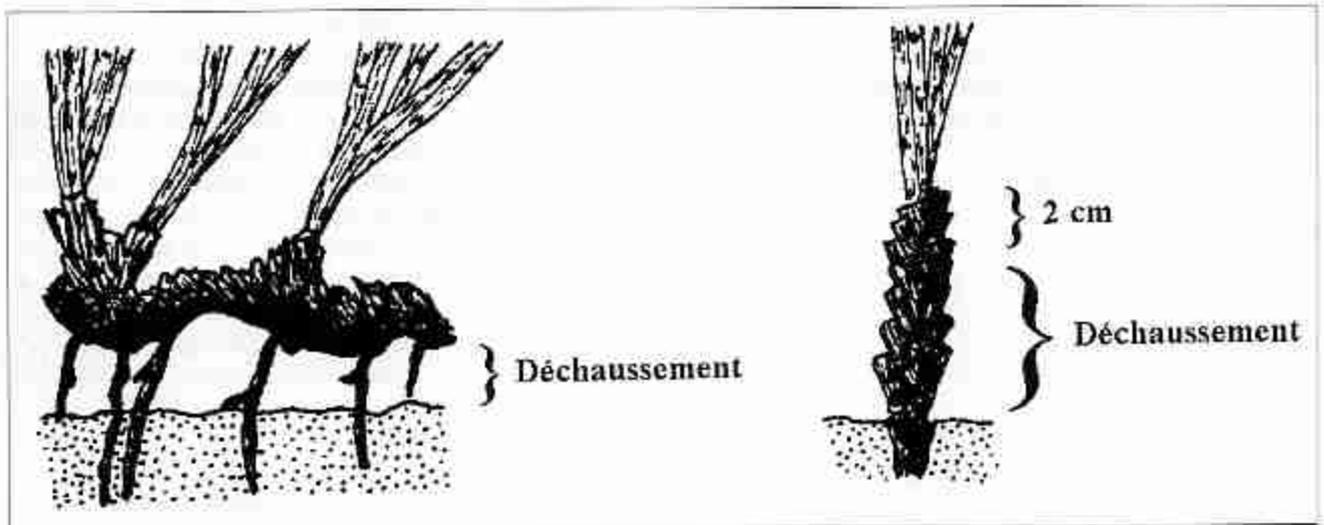


Figure 6 : Définition de la hauteur de déchaussement des rhizomes de *Posidonia oceanica* (d'après Boudouresque et al., 1980b).

Tableau 8 : Exemple de représentation des mesures de biométrie foliaire, et évaluation de la surface foliaire par faisceau et du Coefficient A correspondant. () feuilles entières.

Faisc. N° 1	Longueur totale (mm)	Longueur pétiole (mm)	Largeur moyenne (mm)
F. Adultes	458 325 (412)	41 36 28	11.5 11.5 11.0
F. Intermédiaires	(368) (156)		11.0 11.0
F. Juvéniles	(35) (5)		9.5 6.0

Surface foliaire (cm²/ faisce.) : F. Adultes = 135.4 ;

F. Intermédiaires = 57.6.

Coefficient A : F. Adultes = 66.7 % ; F. Intermédiaires = 0 %.

-La surface foliaire par faisceau (S.F.) (en cm²),

-L'indice foliaire ou Leaf Area Index (LAI), qui correspond à la surface des feuilles par m² d'herbier (Drew & Jupp, 1976),

-Le Coefficient A qui traduit le pourcentage de feuilles ayant perdu leur apex (broutage par des herbivores ou hydrodynamisme).

La biométrie foliaire, la surface foliaire et le Leaf Area Index apportent des renseignements quant à la vitalité de la plante. En effet, il semble que dans des secteurs très oligotrophes, les valeurs relevées sont très faibles (Sardaigne in Rico & Pergent, 1990 et Pergent-Martini & Pergent, 1991). Inversement, si ponctuellement l'apport en nutriments est trop important, on assiste à une compétition entre *Posidonia oceanica* et ses épiphytes qui conduit généralement à une diminution de la surface foliaire par faisceau (Pergent-Martini, 1992). De même, le Coefficient A est en mesure de nous informer sur la pression exercée par les herbivores sur le milieu, car les marques de broutage laissées sur les feuilles par cer-

tains d'entre-eux (le poisson *Sarpa salpa* ou l'oursin *Paracentrotus lividus*) sont caractéristiques (Boudouresque & Meinesz, 1982). La difficulté principale, liée à l'utilisation de ces paramètres, réside dans le fait qu'ils montrent des variations saisonnières très marquées et qu'ils doivent être mesurés au cours d'un cycle annuel, ou comparés à des prélèvements effectués à la même période de l'année. De même, du fait de la variabilité intrinsèque de *Posidonia oceanica*, il est nécessaire pour chaque prélèvement d'étudier un nombre suffisant de faisceaux foliaires (10 à 20).

Epiphytes

La couverture épiphytique (algues et faune) des feuilles de *Posidonia oceanica* est très variable tant au niveau qualitatif (nombre d'espèces rencontrées) que quantitatif (biomasse). Ce peuplement varie fortement en fonction de la saison considérée (biomasse maximale au printemps à la fin de l'été, biomasse minimale en automne), du rang de la feuille (âge et longévité), et de la profondeur (appauvrissement quantitatif). Toutefois, cette croissance semble fortement influencée par des facteurs physiques (température, hydrodynamisme) et chimiques (teneur en nutriments). Dans les sites présentant une forte pollution organique, la biomasse épiphytique algale augmente (Jupp, 1977; Mendez, 1994). Ce phénomène est vraisemblablement à mettre en relation avec l'enrichissement du milieu en nutriments. Des expériences d'enrichissement artificiel *in situ* ont également conduit à un développement massif de la couverture épiphytique (Pergent-Martini, 1992), ce qui semble confirmer cette hypothèse. Ce paramètre pourrait donc apporter des indications quant à la concentration moyenne en nutriments du milieu et faciliter ainsi la caractérisation de la zone d'influence de tel ou tel rejet (émissaire, fermes aquacoles). Compte tenu du petit nombre d'études disponibles, et de la variabilité saisonnière de ce paramètre, il apparaît, cependant, plus judicieux de promouvoir des recherches complémentaires afin de mieux appréhender ce descripteur et d'en proposer un protocole d'étude standardisé. Le calcul d'un indice d'épiphytisme (IE) a également été proposé pour évaluer l'épiphytisme des feuilles de

Posidonia oceanica (Morri, 1991). Bien qu'intéressante, cette méthode nécessite une bonne connaissance des différents groupes d'épiphytes présents sur les feuilles (algues encroûtantes, algues érigées, bryozoaires, hydriales...).

3. - Lépidochronologie

Description

Quand les feuilles de *Posidonia oceanica* meurent, seul le limbe tombe. Le pétiole (base foliaire) reste attaché sur le rhizome; il est alors souvent désigné sous le nom «d'écaille». Les écailles et les rhizomes sont peu putrescibles et peuvent persister plusieurs millénaires au sein de la matre (plus de 4 600 ans, in Boudouresque *et al.*, 1980a). L'épaisseur de ces écailles, de même que plusieurs paramètres anatomiques, varient de façon cyclique en fonction de leur rang d'insertion sur le rhizome (Crouzet, 1981). Par analogie avec la dendrochronologie, l'étude de ces variations cycliques est appelée "lépidochronologie" (Boudouresque *et al.*, 1983).

Tous les rhizomes étudiés (orthotropes et plagiotropes, provenant de profondeurs et de localités différentes) présentent ces cycles de variation d'épaisseur de leurs écailles. L'évolution, au cours du temps, de l'épaisseur de la dernière écaille, apparue à l'apex du rhizome, est un phénomène cyclique présentant une alternance de deux phases : ascendante et descendante. Le passage d'une phase à l'autre détermine l'inversion du cycle. Ces cycles ont une périodicité annuelle avec un maximum et un minimum d'épaisseur par an. Les dates d'inversion des cycles d'épaisseur sont constantes, d'une année à l'autre, pour une même station : les écailles "fines" apparaissent à la fin de l'hiver ou au début du printemps, tandis que les écailles "épaisses" apparaissent en automne.

Les cycles d'épaisseur des écailles sont synchrones avec les cycles de variations de la structure anatomique de certains tissus (nombre de couches de cellules du sclérenchyme et du parenchyme, aspect plus ou moins palissadique du sclérenchyme ventral, présence d'îlots de sclérenchyme dorsal, cellules à tanin). La variation de l'épaisseur des écailles, observée le long d'un rhizome, peut s'expliquer, d'une part par la variation du nombre de couches de cellules (e.g. parenchyme, sclérenchyme dorsal) et, d'autre part par la forme de certains tissus (e.g. aspect plus ou moins palissadique du sclérenchyme ventral, cellules "écrasées" du parenchyme). Le synchronisme, existant entre les cycles de variation de l'épaisseur des écailles et les cycles anatomiques, confirme la signification chronologique des cycles. En effet, si après la mort des feuilles, des phénomènes de turgescence ou de vidage des cellules peuvent se concevoir, entraînant de ce fait des variations importantes de l'épaisseur de l'écaille, en aucun cas, des modifications du nombre de cellules ou leur différenciation ne peuvent avoir lieu (organe mort).

Les différents paramètres qui caractérisent les cycles (amplitude, période, épaisseur moyenne) présentent des modulations qui ne sont pas aléatoires. Ces modulations pourraient traduire une réaction de la plante en réponse à des facteurs d'origine endogène ou exogène. Dans un certain nombre de

stations, des années caractéristiques sont mises en évidence : elles correspondent à des cycles présentant une épaisseur moyenne maximale ou minimale, ou une amplitude particulière, et ce, pour l'ensemble des rhizomes de la station. De la même façon, une corrélation significative entre la température moyenne et l'épaisseur moyenne des écailles a été observée dans les stations superficielles. Un autre exemple : une augmentation de la profondeur ou de la turbidité entraînent une réduction du nombre moyen d'écailles par cycle et une augmentation du nombre des cellules à tannin dans les écailles (Pergent, 1988). Il apparaît donc que les écailles de *Posidonia oceanica* agissent comme un enregistreur multicanal, chaque canal (paramètre variant de façon cyclique) enregistre un signal distinct.

Le long de rhizomes présentant un grand nombre de cycles annuels, des cycles pluriannuels sont mis en évidence. Ces cycles sont relativement comparables à ceux observés dans l'épaisseur des cernes des arbres (Fritts, 1976; Serre, 1976). L'utilisation de l'analyse spectrale, couramment utilisée en dendrochronologie, nous a permis de détecter des cycles de différentes périodes sur un même rhizome. Pour tous les rhizomes étudiés, le spectre présente un maximum d'énergie pour une valeur correspondant au nombre moyen d'écailles par cycle (périodicité annuelle), mais également pour des périodicités de 3, 6 et 11 ans. Toutefois, ces cycles pluriannuels sont rarement synchrones d'un rhizome à l'autre et leur signification, vraisemblablement d'origine endogène, n'est pas encore élucidée.

Relativement assimilable, dans son principe, à la dendrochronologie et à la dendroclimatologie, la lépidochronologie donne accès à l'exploitation d'archives biologiques naturelles concernant la presque totalité des zones marines littorales de Méditerranée. La préservation des rhizomes et des écailles, dans les mattes, sur plusieurs mètres d'épaisseur (au moins 8 m), correspondant à plusieurs millénaires (datation au Carbone 14), souligne les perspectives exceptionnelles qu'ouvre la lépidochronologie (Boudouresque *et al.*, 1980a).

Protocole d'étude

Des rhizomes orthotropes, terminés par un faisceau foliaire vivant de *Posidonia oceanica*, sont prélevés en scaphandre autonome, en respectant une distance d'environ un mètre les uns des autres. Compte tenu de la variabilité observée, un nombre de 10 à 20 faisceaux est nécessaire pour caractériser une station. En revanche, un seul prélèvement est nécessaire, le facteur saisonnalité n'intervenant pas.

Les rhizomes sont nettoyés et les écailles soigneusement détachées (Figure 7). Les écailles étant emboîtées les unes dans les autres, la dissection se fait des plus anciennes vers les plus récentes (Pergent, 1990). Les écailles sont numérotées, en fonction de leur position sur le rhizome : l'écaille se trouvant juste en dessous de la première feuille vivante porte le rang N°1. Le rang des écailles augmente donc en s'éloignant du point végétatif (des plus récentes vers les plus anciennes). La position des maxima et minima d'épaisseur est notée pour chaque rhizome. Lorsque l'épaisseur de l'écaille est mini

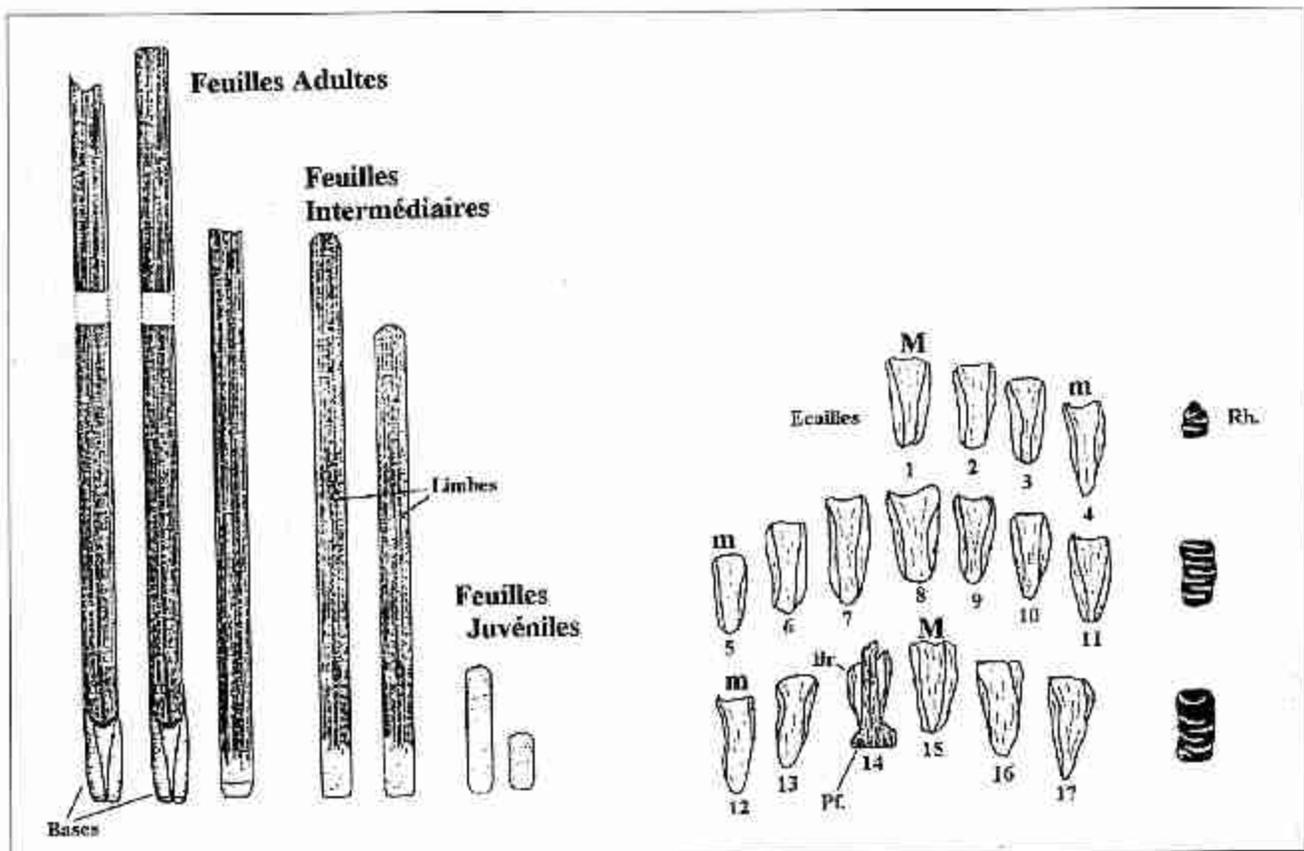


Figure 7 : Méthode de dissection des faisceaux et rhizomes de *Posidonia oceanica* pour l'étude lépidochronologique. M = maximum d'épaisseur, m = minimum d'épaisseur, Rh = rhizome, Br = bractée, Pf = péduncule floral. Le rang des écailles est indiqué.

male, le rhizome est coupé au niveau de l'insertion de cette écaille. On obtient ainsi une série de tronçons de rhizome, délimités par deux minima d'épaisseur (Figure 7). Les tronçons de rhizomes sont placés dans une étuve à 70°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant (généralement 72 heures).

Interprétation

La découverte de la lépidochronologie, et plus particulièrement la possibilité de rétro-dater avec précision des segments de rhizomes et les écailles y afférents, apporte une solution à toute une série de problèmes spécifiques :

- La présence de cycles annuels de l'épaisseur des écailles permet d'évaluer le nombre de feuilles produites annuellement (nombre d'écailles par cycle). Cette valeur apparaît relativement constante dans les différentes stations étudiées. Toutefois, dans certains secteurs caractérisés par des eaux pauvres en nutriments (Sardaigne in Rico & Pergent, 1990 ; Pergent-Martini & Pergent, 1991), cette production foliaire est faible :

- La possibilité de connaître l'âge d'un tronçon de rhizome, et d'y découper des segments correspondant à une ou plusieurs années, permet d'évaluer, de façon précise, la vitesse de croissance et la part de la production consacrée à l'allongement des rhizomes (Pergent, 1987; Pergent & Pergent-Martini, 1990). Nous disposons ainsi d'un enregistreur capable de nous renseigner sur les variations de la vitesse de sédimentation des rhizomes orthotropes est corrélée au taux de sédimentation (Boudouresque *et al.*, 1984). Toutefois, la distance

à l'axe plagiotope, auquel il est rattaché semble également intervenir (Pergent, 1987; Sanchez-Lizaso, 1993).

- La présence de restes de pédoncules floraux, intercalés entre les écailles le long des rhizomes, permet de retrouver et de dater des floraisons anciennes ("paléo-floraisons"). La floraison de *Posidonia oceanica* est un phénomène relativement peu observé, du fait, sans doute, de facteurs climatiques, mais également des difficultés liées à cette observation et du petit nombre d'observateurs compétents (Sanchez-Lizaso, 1993).

- La possibilité originale de datation du matériel biologique prend toute son importance dans l'étude de l'évolution temporelle des impacts d'une pollution (e.g. mémorisation des retombées de Césium 137 in Calmet *et al.*, 1988 ; 1991 ou de métaux traces in Pergent-Martini *et al.*, 1993b). Cet aspect sera développé plus en détail dans la suite du document (C - Impact de l'anthropisation).

D'autres informations quant à la vitalité de la plante et/ou la qualité du milieu sont également obtenues par lépidochronologie. Cependant leur étude s'avère plus complexe et nécessite généralement des prélèvements répartis sur plusieurs périodes de l'année :

- Associée à la phénologie, la lépidochronologie permet de modéliser le rythme de renouvellement des feuilles (rythme de formation, rythme de chute et longévité des feuilles) (Pergent & Pergent, 1985; Pergent & Pergent-Martini, 1990). Il est ainsi possible de détecter des modifications au niveau du développement de la plante.

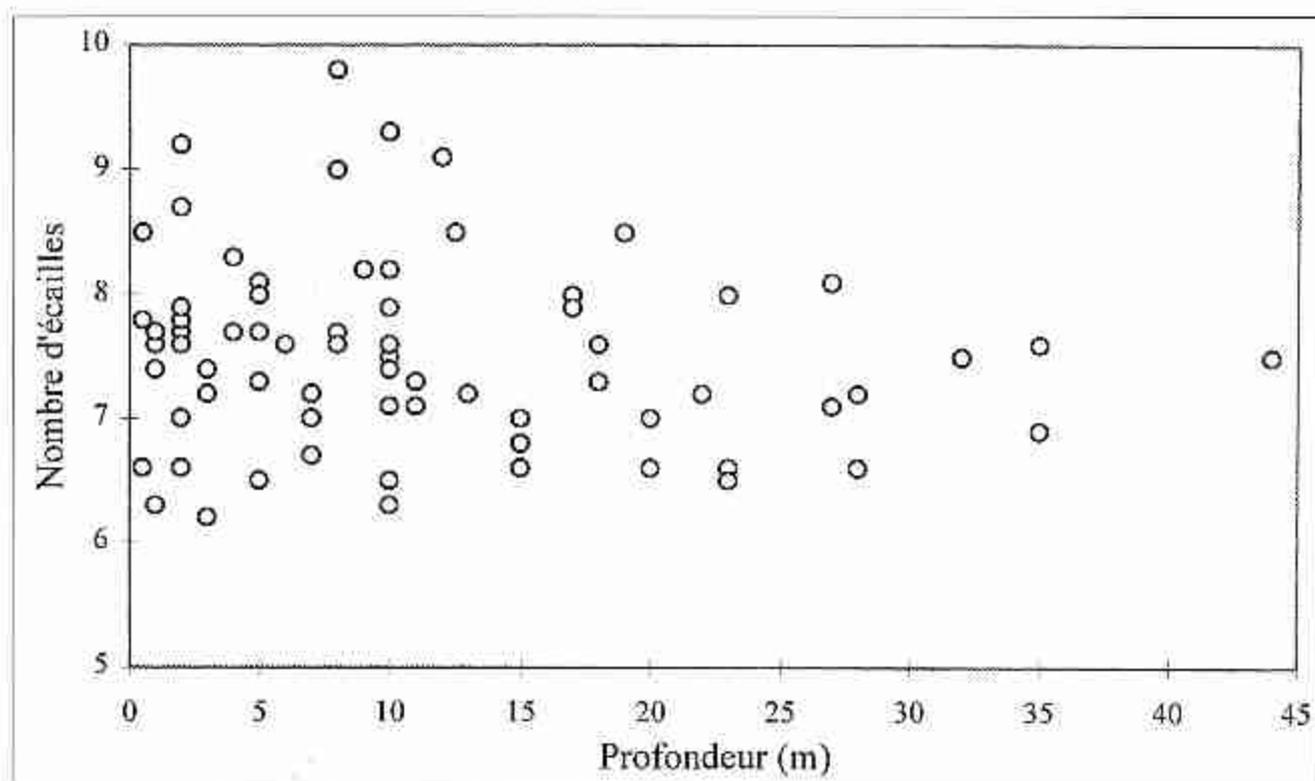


Figure 8 : Nombre d'écaillés par cycles dans différentes stations de Méditerranée.

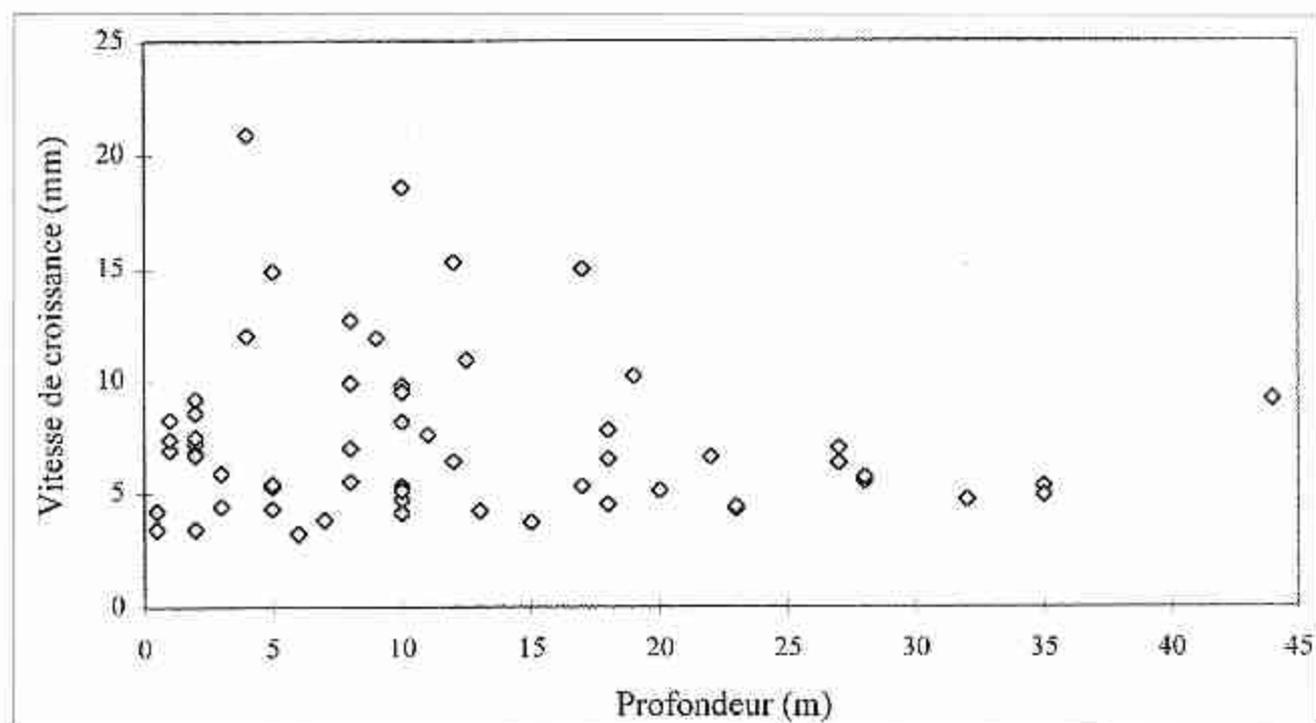


Figure 9 : Vitesse de croissance des rhizomes dans différentes stations de Méditerranée.

Tableau 9 : Signification de la production foliaire et de la vitesse de croissance des rhizomes par rapport aux valeurs moyennes.

Nombre de feuilles	Variation / moyenne	Vitesse de croissance (mm)	Variation / moyenne	Interprétation
6.8 à 8.3	de 0 à 10 %	5.9 à 8.9	de 0 à 20 %	Valeur normale
6.0 à 6.8 et 8.3 à 9.0	de 10 à 20 %	3.7 à 5.9 et 8.9 à 11.1	de 20 à 50 %	Valeur sub-normale
<6.0 et >9.0	plus de 20%	<3.7 et >11.1	plus de 50 %	Valeur anormale

- Il est également possible d'évaluer la production primaire nette de l'herbier (feuilles et rhizomes), et ses variations au cours du temps (Pergent & Pergent-Martini, 1991). Cette nouvelle méthode d'évaluation de la production primaire par lépidochronologie apparaît comme une technique très intéressante. En effet, (i) elle s'affranchit des problèmes d'interprétation liés à l'utilisation de techniques basées sur des mesures du métabolisme, (ii) elle élimine les effets du marquage, les valeurs obtenues sont très précises, et (iii) elle permet d'évaluer la production foliaire (limbe + pétiole) et de rhizome. Le travail de terrain, qu'elle nécessite, est très rapide et n'est soumis à aucune contrainte technique, aussi les prélèvements peuvent-ils être effectués de façon espacée (prélèvements trimestriels). Un avantage supplémentaire réside dans le fait qu'il devient possible, pour la première fois, d'estimer la production primaire non seulement durant la période d'étude mais également pour les années précédentes (Pergent *et al.*, 1992). Cet aspect revêt une importance toute particulière dans le cadre d'un suivi temporel d'un milieu ayant subi une modification naturelle ou anthropique (e.g. aménagements).

En ce qui concerne (i) le nombre de feuilles produites annuellement (= nombre d'écailles par cycle) et (ii) la vitesse de croissance des rhizomes, il est possible d'établir une échelle de répartition en fonction des mesures relevées dans la littérature (Figures 8 et 9). Si le nombre d'écailles par cycle est relativement constant (entre 6,2 et 9,8, moyenne = 7,5), en revanche la vitesse de croissance des rhizomes est beaucoup plus variable (entre 3,2 et 20,9 mm, moyenne = 7,4 mm). Le facteur profondeur ne semble pas intervenir au niveau de ces paramètres.

Nous proposons d'utiliser la même échelle de valeur que celle retenue pour la densité (e.g. valeur normale, sub-normale ou exceptionnelle) (Tableau 9). Toutefois, compte tenu du fait que la variabilité est très différente d'un paramètre à l'autre les limites retenues seront différentes.

Il faut toutefois préciser que la lépidochronologie est une technique relativement récente (une dizaine d'années) et que les valeurs moyennes indiquées ici sont appelées à être précisées dans l'avenir.

IMPACT DE L'ANTHROPISATION

1. - Métaux-traces

Problématique

Posidonia oceanica a été pressentie depuis de nombreuses années comme un indicateur biologique de la pollution par

les métaux-traces (Augier *et al.*, 1977; Augier, 1985). En effet, cette phanérogame marine présente des caractéristiques très intéressantes en ce sens :

- C'est un organisme fixé capable d'intégrer l'ensemble des fluctuations du site.

- Elle est bien représentée sur l'ensemble du littoral Méditerranéen.

- Le renouvellement de ses tissus foliaires (cycle végétatif) permet de suivre l'évolution du milieu par unité de temps (en fonction de l'âge des tissus pris en compte).

- C'est une espèce longévive (plusieurs années) présentant une durée de vie supérieure aux variations temporelles qu'elle est censée intégrer.

- Certaines structures foliaires peu putrescibles se conservent dans l'épaisseur de la mat, et il est ainsi possible, après datation (lépidochronologie), d'y rechercher des informations et de reconstituer ainsi l'historique du site sur plusieurs décennies.

- Elle présente un fort pouvoir de concentration vis à vis des polluants stables et plus particulièrement des métaux-traces.

- Elle peut être élevée en aquarium, ce qui permet de réaliser des expériences de contamination artificielle en milieu contrôlé.

Toutefois, son utilisation comme indicateur de la contamination du milieu se heurte à plusieurs problèmes essentiellement d'ordre méthodologique, dont l'absence de protocoles standardisés :

- Les tissus foliaires analysés ne sont pas toujours les mêmes (limbe ou pétiole, feuilles adultes ou intermédiaires, totalité du faisceau foliaire); il en est de même pour les rhizomes (rhizomes nus, rhizomes avec écailles). Il est également très difficile de savoir si les feuilles de *Posidonia oceanica* ont été, au préalable, débarrassées de leur épiphytes (végétaux et animaux).

- La taille de l'échantillon à analyser (lié à la variabilité individuelle) n'a fait l'objet d'aucune étude spécifique; aussi, les valeurs relevées dans la littérature sont très variables (1 à 20 faisceaux foliaires).

- Le nombre de répliques n'est que rarement précisé; les mesures sont souvent réalisées sur un seul échantillon, ce qui rend difficile la détection d'une éventuelle contamination artificielle, ou erreur de mesure, et ne permet pas d'estimer la variabilité intrinsèque.

Les variations liées à la période de prélèvement (cycle végétatif / âge des feuilles) ne sont que rarement prises en compte, et il n'est pas rare de rencontrer des études qui comparent des concentrations réalisées à des saisons différentes et qui gomment ce facteur lors de l'interprétation.

- Les résultats obtenus *in vitro* sont souvent entachés d'imprécisions, du fait des procédés utilisés pour maintenir les échantillons en bonne santé, de la durée de l'expérience, des différences physico-chimiques observées par rapport au milieu naturel et des concentrations des polluants stables utilisées.

- A la différence des mesures réalisées sur d'autres organismes, utilisés en routine (e.g. mollusques, poissons), il n'existe à ce jour aucune norme d'analyse précise pour *Posidonia oceanica* (Augier, 1989; IFREMER, 1993). Les techniques d'assurance de qualité décrite par le CIEM (CIEM, 1988), ne sont que rarement respectées; il n'existe généralement pas d'exercices d'intercalibration entre les différents laboratoires et l'utilisation de matériaux de référence certifiés n'est que rarement mentionnée.

- Enfin, l'évolution des techniques d'analyses et l'abaissement des seuils de détection rendent peu fiables les comparaisons entre des mesures réalisées à une vingtaine d'années d'intervalle.

L'utilisation de cette phanérogame reste donc liée à la définition de telles spécificités techniques. Elles ne pourront être définies que par la mise en commun d'expériences individuelles de chimistes, biologistes et écologistes travaillant dans ce domaine. Aussi, notre contribution, dans le cadre de cette étude, portera plus particulièrement sur la définition de facteurs biologiques à prendre en compte, car pouvant influencer sur les résultats obtenus.

Données disponibles

En dehors de quelques études, utilisant la technique d'analyse par activation neutronique, et prenant alors en compte un grand nombre d'éléments (Augier *et al.*, 1991; Grauby *et al.*, 1991), la presque totalité des travaux réalisés ne s'intéresse qu'à un petit nombre de métaux-traces (deux à cinq), voire à un seul. Le métal le plus étudié est sans conteste le mercure, puis le plomb, viennent ensuite le cadmium, le nickel et le cuivre.

Dans un secteur donné, les concentrations mesurées chez *Posidonia oceanica* varient fortement en fonction du métal étudié; y compris dans des stations présentant une faible anthropisation. Certains métaux comme le fer ou le zinc présentent des concentrations moyennes très élevées, le plomb et le cadmium des concentrations intermédiaires et le mercure des concentrations très faibles :

- Fer : 36.2 à 102.8 µg/g; Zinc : 31.2 à 187.4 µg/g dans les différents tissus foliaires de *Posidonia oceanica* récoltés à Calvi, en Corse (Pergent-Martini, 1992);

- Cadmium : 1.5 à 7.1 µg/g; Plomb : 1.6 à 7.7 µg/g dans les différents tissus foliaires de *Posidonia oceanica* récoltés à Calvi (Pergent-Martini, 1992);

- Mercure : 0.026 à 0.160 µg/g dans les différents tissus foliaires de *Posidonia oceanica* récoltés à Calvi (Bougerol, 1993; Guerrini, 1993).

Les données disponibles montrent également, pour un métal donné, de grandes variations, en fonction du tissu étudié et du lieu de prélèvement (Tableaux 10 et 11). A l'inverse, le facteur profondeur ne semble pas avoir d'incidence sur la contamination métallique. Toutefois, même si ces mesures doivent être prises avec précaution (e.g. manque de précision quant au tissu étudié ou au nombre de répliques; contamination éventuelle), il apparaît nettement que la concentration en métaux-traces chez *Posidonia oceanica* est fortement corrélée avec le niveau de contamination du site (Valère, 1984; Augier, 1985; Pergent-Martini *et al.*, 1993b).

Des expériences de contaminations artificielles en aquarium ont également été réalisées par plusieurs auteurs, principalement pour le cadmium, le cuivre et le mercure (Cristiani *et al.*, 1980; Augier *et al.*, 1988; Ledent *et al.*, 1993). Ces études préliminaires ont deux objectifs avoués :

-Vérifier et quantifier les corrélations existantes entre les concentrations en métaux-traces dans l'eau et dans les tissus foliaires de *Posidonia oceanica*,

-Établir des corrélations prévisionnelles entre les teneurs des tissus en polluants et les conséquences toxicologiques pouvant en résulter au plan physiologique, biochimique et tissulaire.

Tableau 10 - Concentration en mercure (en µg/g) chez *Posidonia oceanica* en fonction des sites et des tissus étudiés (d'après Augier *et al.*, 1976, 1977, 1978a, 1978b, Guerrini, 1993).

Site	Contamination	Feuilles	Concentration Rhizomes	Racines
Baie de Calvi	Faible	0.08	0.14 - 0.31	-
Ile de Port-Cros	Faible	0.07 - 0.08	0.09 - 0.12	0.13 - 0.14
Calanque de Sorniou	Faible	0.07	0.12 - 0.20	0.20 - 0.28
Iles du Frioul	Moyenne	0.11 - 0.15	0.15 - 0.40	0.20 - 0.41
Ile d'If	Moyenne	0.17	0.53	0.45
Marseille-Corniche	Moyenne	0.14 - 0.35	0.38 - 0.77	0.46 - 0.70
Zone de Cortiou	Forte	0.15 - 51.5	0.89 - 2.50	0.51 - 1.07
Golfe de Fos	Forte	4.58	0.42 - 1.26	0.61 - 0.84

Tableau 10 : Concentration en plomb (en $\mu\text{g/g}$) chez *Posidonia oceanica* en fonction des sites et des tissus étudiés (d'après Valère, 1984; Pergent-Martini, 1992).

Site	Contamination	Feuilles	Concentration Rhizomes	Racines
Baie de Calvi	Faible	2,83 - 7,16	1,33 - 510	-
Ile de Port-Cros	Faible	530	12,37	-
Calanque de Sormiou	Faible	5,40 - 11,20	3,80 - 5,70	7,70 - 10,50
Iles du Frioul	Moyenne	4,00 - 7,80	3,10 - 6,50	5,50 - 11,30
Ile d'If	Moyenne	12,50	3,90	-
Marseille-Corniche	Moyenne	6,10 - 15,30	5,00 - 21,10	13,30 - 26,10
Zone de Cortiou	Forte	5,40 - 13,10	2,50 - 17,80	15,80 - 22,70

Les données disponibles montrent également, pour un métal donné, de grandes variations, en fonction du tissu étudié et du lieu de prélèvement (Tableaux 10 et 11). A l'inverse, le facteur profondeur ne semble pas avoir d'incidence sur la contamination métallique. Toutefois, même si ces mesures doivent être prises avec précaution (e.g. manque de précision quant au tissu étudié ou au nombre de répliques; contamination éventuelle), il apparaît nettement que la concentration en métaux-traces chez *Posidonia oceanica* est fortement corrélée avec le niveau de contamination du site (Valère, 1984; Augier, 1985; Pergent-Martini *et al.*, 1993b).

Des expériences de contaminations artificielles en aquarium ont également été réalisées par plusieurs auteurs, principalement pour le cadmium, le cuivre et le mercure (Cristiani *et al.*, 1980; Augier *et al.*, 1988; Ledent *et al.*, 1993). Ces études préliminaires ont deux objectifs avoués :

- Vérifier et quantifier les corrélations existantes entre les concentrations en métaux-traces dans l'eau et dans les tissus foliaires de *Posidonia oceanica*.

- Établir des corrélations prévisionnelles entre les teneurs des tissus en polluants et les conséquences toxicologiques pouvant en résulter au plan physiologique, biochimique et tissulaire.

Toutefois, les données disponibles sont encore trop rares et l'absence d'homogénéité, tant au niveau des techniques de culture de *Posidonia oceanica*, qu'au niveau de la contamination elle-même (produits utilisés, concentrations retenues, durée de l'expérience, tissus analysés, etc.), rend toute interprétation aléatoire (Augier, 1985). Ces expériences représentent cependant une démarche intéressante qu'il serait bon de développer dans l'avenir en prenant garde de définir, au préalable, les paramètres d'étude.

Une autre voie de recherche prometteuse semble liée à l'utilisation de la lépidochronologie : le suivi temporel du degré de contamination d'un milieu, ou d'une pollution chimique. En effet, les expérimentations réalisées à l'aide du césium 137, montrent que les rhizomes mémorisent la teneur qui prévalait dans le milieu lors de leur formation (Calmet *et al.*, 1988). Il est ainsi possible de suivre, pour cet élément, l'évolution de sa concentration dans le milieu sur plusieurs décennies. Des études similaires réalisées sur plusieurs métaux-

traces (cadmium, cuivre, fer, mercure, plomb et zinc) semblent confirmer cette propriété de mémorisation des métaux-traces dans les écailles et les rhizomes (Pergent-Martini, 1992; Pergent-Martini, 1994; Guérini, 1993; Pergent, 1993; Pergent-Martini *et al.*, 1993b). Toutefois le développement de cette technique est tributaire des progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes d'accumulation (variations saisonnières, sites de fixation des polluants, physiologie de la plante) et d'éventuels relargages de certaines structures, au cours du temps (modification de la composition chimique des rhizomes et des écailles, cinétique de dégradation, transferts de photosynthétats).

Au vu des données de la littérature, il apparaît clairement que la toxicité des métaux-traces dépend largement de leur nature, de la composition chimique dans laquelle ils interviennent, des conditions physico-chimiques du milieu et de l'organisme-cible (Chabert, 1980; Bryan, 1984; Roméo, 1991). Si les processus de régulation, permettant à un organisme de lutter contre une contamination, sont plus aisés à mettre en oeuvre pour un métal essentiel (Amiard-Triquet & Amiard, 1980), c'est-à-dire intervenant plus ou moins directement, dans les mécanismes biochimiques du métabolisme (arsenic, chrome, cobalt, cuivre, étain, fer, manganèse, molybdène, nickel, sélénium, vanadium, zinc in Bryan, 1984) ils présentent tous à forte dose une toxicité aiguë qui peut atteindre le seuil de létalité (Roméo, 1991). De plus, les métaux non-essentiels (e.g. cadmium, mercure et plomb) sont également les plus toxiques (Chabert, 1979). Essentiellement d'origine anthropique (Ramade, 1993), ils ont vu leur teneur augmenter significativement avec le développement industriel et démographique enregistré depuis 1960 (Bethoux *et al.*, 1990). C'est notamment le cas du plomb, dont les apports sont principalement dus à la combustion des hydrocarbures par le parc automobile. Aussi avec la commercialisation de l'essence sans plomb, on assiste à une réduction significative de ces apports atmosphériques (Migon *et al.*, 1994). En ce qui concerne le mercure, et ses dérivés (e.g. méthyl-mercure), il présente également des propriétés de biomagnifications au niveau des réseaux trophiques, qui le rendent d'autant plus dangereux (e.g. accident de Minamata).

Même si des études complémentaires s'avèrent nécessaires, *Posidonia oceanica* apparaît comme un bon bioindicateur de la contamination du milieu par les métaux-traces. En effet,

cette phanérogame possède la propriété de concentrer différents métaux en relation avec leur concentration dans le milieu. Elle semble également relativement résistante à la contamination métallique car malgré une diminution de sa vitalité, l'espèce persiste au voisinage des grandes sources de pollution (zones portuaires, installations pétrochimiques, émissaires urbains). De plus, aucune étude effectuée *in situ* n'a permis de mettre en évidence une disparition de *Posidonia oceanica* en relation avec ce type de pollution et la sensibilité aux métaux pris isolément, aux concentrations effectivement présentes dans la nature, n'a pu être démontrée (Boudouresque *et al.*, 1990). Enfin, la faculté de *Posidonia oceanica* à mémoriser, au sein de ses tissus (écailles et rhizome), des teneurs anciennes, alliée aux possibilités de datation offerte par la lépidochronologie, ouvrent des perspectives uniques dans l'optique d'un suivi temporel de ces pollutions.

Méthodes de prélèvements et d'analyses proposées

Du fait de la multiplicité des méthodes de minéralisation et d'analyse, présentées par les différents auteurs, il semble difficile de recommander telle ou telle méthode ou appareillage. Toutefois toutes les techniques visant à minimiser les contaminations (e.g. minéralisation en enceintes closes, bombes hautes pressions) doivent être évidemment privilégiées. En outre un effort particulier doit être consenti à la réalisation d'exercices d'intercalibration entre laboratoires. Cependant, il apparaît intéressant, dans le cadre de cette étude, de proposer des modes d'échantillonnages et de préparation du matériel biologique qui semblent en adéquation avec le but rechercher.

Pour chaque site, les prélèvements doivent être réalisés en scaphandre autonome, en respectant une distance minimale d'un mètre entre chaque faisceau (non reliés par un faisceau plagiotrope vivant), l'utilisation d'objets métalliques pour ces récoltes (e.g. couteau) est à proscrire. Un pas d'échantillonnage trimestriel semble un compromis satisfaisant pour intégrer la variabilité saisonnière (cycle végétatif). Les faisceaux peuvent être regroupés par lots (répliques) dans des sacs en polyéthylène. Pour l'étude des faisceaux foliaires, trois répliques de 10 faisceaux semblent suffisantes pour évaluer la concentration moyenne. En ce qui concerne les rhizomes une longueur suffisante de 5 à 10 cm doit être récoltée.

Au laboratoire, la dissection des faisceaux foliaires de chaque réplique est effectuée selon la méthode de Giraud (1977) de façon à disposer de lots différents : (i) pétioles des feuilles adultes, (ii) limbe des feuilles adultes et (iii) feuilles intermédiaires. Chaque lot pouvant être éventuellement subdivisé en fonction du rang de chaque feuille (âge). Les épiphytes doivent être soigneusement retirés à l'aide d'une lame de verre. Il semble judicieux, du fait de leur nature physiologique différente, de séparer et d'analyser isolément les rhizomes et les écailles de chaque réplique. Les échantillons qui ne peuvent être analysés immédiatement, seront lyophilisés ou congelés.

2. - Autres polluants chimiques

Depuis plusieurs années, l'impact des détergents sur les herbiers à *Posidonia oceanica* a été pressenti comme un facteur de régression important (Astier, 1971; 1972a; 1972b; Cooper, 1974; Picard, 1978; Vicente, 1983).

Plusieurs études semblent indiquer qu'un certain nombre de polluants, tel que les borates et les tensioactifs, présents dans le milieu à des concentrations sublétales, ont un effet retardant ou inhibiteur sur la croissance foliaire de *Posidonia oceanica* (Cristiani *et al.*, 1980; Monnier-Besombes, 1983; Augier *et al.*, 1984b; Augier *et al.*, 1987). L'étude du degré de perturbation de la croissance foliaire, par rapport à des valeurs de référence, pourrait permettre de quantifier l'impact de ces substances (Augier, 1985).

Des expériences, réalisées en laboratoire, ont montré qu'il existe un transfert d'une fraction importante des tensioactifs anioniques (acide dobanique) et des borates (tétraborate de sodium), très utilisés dans la fabrication des détergents, de l'eau vers les sédiments et les feuilles de *Posidonia oceanica* (Augier *et al.*, 1984b; Augier *et al.*, 1987). Pour des concentrations croissantes de tensioactifs, ces tissus foliaires sont l'objet de phénomènes perturbateurs de la croissance et de lésions histologiques pouvant aller jusqu'à la nécrose des feuilles (Monnier-Besombes, 1983; Augier *et al.*, 1984b). Les premiers effets négatifs semblent apparaître pour des concentrations semblables à celles enregistrées à proximité des rejets en mer d'émissaires.

D'autres études, réalisées *in situ*, portant sur la toxicité à court terme d'un détergent anionique (dodecyl-benzène-sulfate) sur l'assimilation photosynthétique, ne montrent un impact direct de ce composé que pour des valeurs très élevées qui ne se rencontrent jamais ni dans l'eau ni dans les sédiments (10 à 50 ppm) (Libes, 1986). Toutefois, l'existence d'une relation interactive temps-concentration-production permet de penser que, sur de longues périodes, les faibles doses rencontrées dans l'eau et les sédiments ont effectivement un effet sur la photosynthèse.

Aussi, compte tenu des problèmes liés à la culture *in vitro* des plants de *Posidonia oceanica* et des difficultés d'expérimentation *in situ* sur de longues périodes de temps, des études complémentaires semblent indispensables pour confirmer ou infirmer l'impact de ces composés sur la croissance de *Posidonia oceanica*.

Parmi les polluants chimiques peu ou pas biodégradables, les composés organochlorés apparaissent comme les plus dangereux : réduction de la croissance, baisse de la fécondité, mortalité pour de nombreux organismes marins (Ramade, 1977). La contamination de *Posidonia oceanica* par des composés organochlorés est très variable. Les quelques données disponibles montre que le lindane ((HCH) est toujours présent dans les tissus foliaires, y compris dans des secteurs présentant une faible anthropisation (0.10 à 0.50 ppb à Port-Cros), alors que pour ces mêmes secteurs les PCB et DDT sont pratiquement inexistantes (Vicente & Chabert, 1981; Chabert *et al.*, 1984). Dans des secteurs présentant une anthropisation un peu plus élevée (lagune du Brus) la concentra-

tion moyenne en lindane est estimée à 0,50 ppb alors qu'elle atteint 9,70 ppb pour les PCB (Chabert, 1979; Chabert & Vicente, 1979). La concentration en PCB semble également varier avec la bathymétrie : elle est plus importante en profondeur dans les feuilles et dans les stations plus superficielles au niveau des rhizomes (Eugène, 1978).

A ce jour, les composés organochlorés n'ont fait l'objet que d'un petit nombre d'études, portant essentiellement sur des concentrations dans tel ou tel tissu foliaire. L'impact réel de ces substances sur *Posidonia oceanica* est inconnu et il est encore difficile d'établir l'existence d'une corrélation entre les concentrations relevées dans la plante et le niveau d'anthropisation du site de récolte.

D - CONCLUSIONS ET PROSPECTIVES

En ce qui concerne l'état des connaissances sur la vitalité des herbiers, il apparaît que les nombreuses études réalisées à ce jour, autour du bassin méditerranéen, ont permis de progresser de façon importante. Plusieurs descripteurs sont d'ores et déjà opérationnels et peuvent être utilisés "en routine" pour caractériser l'état de santé d'un herbier et évaluer l'impact de telle ou telle dégradation. D'autres descripteurs nécessitent des études complémentaires afin de préciser leur signification et/ou développer une méthode d'étude standardisée.

La position bathymétrique de la limite inférieure renseigne sur la transparence moyenne des eaux dans un secteur donné. Le type de limite (brusque, progressive ou régressive) permet également d'estimer l'évolution de la transparence des eaux au cours du temps. L'existence de courants de fond peut être détectée par la présence de limites érosives. La mise en place de balisages, au niveau des limites inférieures, dans des secteurs représentatifs, apporte des renseignements plus précis quant à l'évolution temporelle de cette limite, et par voie de conséquence de la transparence moyenne des eaux au cours de la même période.

La densité de l'herbier (nombre de faisceaux par m²) est également influencée par la quantité de lumière disponible, et donc par la turbidité des eaux. Ce paramètre est d'autant plus intéressant qu'il peut nous renseigner sur toute la tranche bathymétrique où se développe *Posidonia oceanica* et pas seulement au niveau de sa limite inférieure. De plus, plusieurs exemples tendent à indiquer que ce paramètre est plus sensible et réagit plus rapidement que le précédent lors d'une dégradation modérée du milieu (Pergent-Martini *et al.*, 1993a). Outre la transparence des eaux, d'autres facteurs : destructions mécaniques (arts traïnants, mouillages), équilibre sédimentaire ou hydrodynamisme sont de nature à modifier la densité de l'herbier, ce qui rend ce descripteur tout particulièrement indiqué pour suivre l'impact des aménagements littoraux.

Le déchaussement des rhizomes est influencé par le taux de sédimentation; toutefois ce descripteur peut varier fortement au cours du temps (phases de sédimentation ou d'érosion liées aux conditions météorologiques ou à l'hydrodynamisme). Il semble donc judicieux de lui adjoindre des mesures d'allon-

gement des rhizomes, par mesure des paramètres lépidochronologiques. Il est alors possible de connaître, année par année, la vitesse de croissance des rhizomes. Directement corrélé au taux de sédimentation, ce critère apporte des renseignements intéressants car il permet d'évaluer la vitesse de sédimentation dans un secteur donné (séries temporelles).

Le "Coefficient A", qui traduit la pression de prédation et/ou l'hydrodynamisme, s'avère, du fait de sa facilité d'utilisation, particulièrement pratique. De plus, dans la majorité des cas, il offre la possibilité d'estimer la part de l'hydrodynamisme par rapport à la pression de prédation et, dans ce deuxième cas, d'identifier à quel groupe appartient l'herbivore responsable du broutage des faisceaux (poisson, échinoderme, crustacé). Toutefois, son interprétation nécessite la prise en compte de (i) la période de prélèvement (forte variabilité saisonnière), (ii) l'hydrodynamisme et (iii) la profondeur.

Les mesures de biométrie foliaire, et plus particulièrement la surface foliaire par faisceau, sont des paramètres standardisés depuis déjà de nombreuses années, qui s'avèrent à même de renseigner sur le développement foliaire de *Posidonia oceanica*. Plus précisément, l'évaluation de la production foliaire : (i) nombre de feuilles produites annuellement (= nombre d'écailles par cycle) et (ii) production primaire (méthode lépidochronologique) permet de mieux cerner la croissance de *Posidonia oceanica*. De plus, la lépidochronologie, en intégrant le facteur temps, permet de suivre cette production sur plusieurs années (séries chronologiques). Nombre d'auteurs pensent que le développement foliaire de *Posidonia oceanica* est influencé par la teneur en nutriments disponibles dans le milieu. Si cette hypothèse se confirme, ce descripteur pourrait être appliqué à l'évaluation de l'impact d'un enrichissement du milieu ou à l'estimation de sa richesse moyenne. Toutefois deux obstacles majeurs s'opposent encore à son utilisation en routine : (i) la complexité de certaines mesures (e.g. production primaire), et (ii) la nécessité de réaliser des prélèvements à plusieurs saisons de l'année. Aussi, il paraît judicieux de n'utiliser ces paramètres traduisant la croissance foliaire que pour des études nécessitant un suivi pluriannuel et en collaboration avec des scientifiques.

La couverture épiphytique, et plus particulièrement la biomasse des algues épiphytes, semble fortement influencée par la richesse du milieu en nutriments. Ce descripteur, encore peu utilisé, nécessite des études complémentaires pour être aisément accessible mais il semble très prometteur. Son utilité, pour suivre par exemple l'intensité et la zone d'influence d'un enrichissement ponctuel du milieu (rejet d'émissaires, lessivage de terres agricoles, installations aquacoles), est montrée par les quelques études disponibles. En fonction des informations qu'il semble susceptible d'apporter, un effort particulier devrait être consenti pour que son étude soit approfondie. Il faudrait notamment promouvoir une recherche spécifique, permettant de préciser ces fluctuations en réponse à une modification des conditions du milieu (lumière, température, concentration en tel ou tel nutriment). Une voie de recherche complémentaire, qu'il serait judicieux d'explorer, concerne la caractérisation de cette couverture épiphytique.

par l'utilisation d'un indice d'épiphytisme qui permet d'estimer séparément la contribution des différents groupes d'épiphytes.

Le recouvrement du substrat par l'herbier, utilisé par plusieurs auteurs, semble dans l'état actuel, peu utilisable du fait de la multiplicité des facteurs pouvant intervenir (turbidité, substrat, hydrodynamisme, sédimentation,...) et des difficultés inhérentes à la technique de mesure (précision, influence saisonnière, micro- et macro-structure de l'herbier). Il présente un intérêt indéniable, dans le cadre de suivi pluriannuel de structures fixes, de type carrés permanents, car il permet d'appréhender, avec une grande précision (quelques dizaines de cm²), l'évolution du recouvrement d'un herbier, en s'affranchissant, tout au moins en partie du biais inhérent à la mesure de ce paramètre (définition et reproductibilité des surfaces étudiées).

De nombreux auteurs ont tenté, depuis quelques années, d'utiliser *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de pollution chimique (métaux-traces, détergents, organochlorés, radionucléides). Toutefois, l'évolution des techniques d'analyse et l'absence de standardisation au niveau de l'échantillonnage (tissus étudiés, répliques,...) rend l'interprétation de leurs résultats quelquefois difficile. Ceci apparaît d'autant plus regrettable que cette phanérogame présente toutes les qualités requises pour une utilisation en ce sens : espèce benthique, longévive, largement répandue dans tout le bassin méditerranéen, présentant un pouvoir de concentration certain vis à vis des polluants chimiques. De plus, la découverte récente de la lépidochronologie en fait un véritable enregistreur biologique capable de mémoriser les teneurs en métaux-traces sur des séries chronologiques précises.

Toutefois, toute généralisation de cette technique, passe nécessairement par la définition et la mise au point d'un protocole d'étude standardisé précisant :

- La méthode d'échantillonnage (prélèvements, répliques, taille de l'échantillon), les différents tissus à analyser (limbe, pétiole, type de feuilles, écailles et rhizomes), et la période de récolte.

- Les normes d'analyses (techniques d'assurance qualité, exercices d'intercalonnage).

Au vu des études disponibles, il apparaît clairement que les concentrations mesurées dans les différents tissus foliaires de *Posidonia oceanica* sont en relation avec les teneurs présentes dans le milieu. Cette corrélation est plus nette pour les métaux non-essentiels (cadmium, mercure, plomb), les radionucléides (césium 137), les détergents et vraisemblablement les composés organochlorés. En ce qui concerne les métaux essentiels, il semble que des mécanismes de régulation plus complexes sont mis en oeuvre et rendent l'interprétation plus difficile. Seules des études, portant sur une meilleure compréhension des mécanismes physiologiques et biochimiques mis en oeuvre, permettront de préciser utilement les résultats obtenus. En ce sens, un effort particulier doit être consenti pour promouvoir (i) les expériences de contaminations artificielles, en milieu contrôlé ou *in situ*, et (ii) les études dans

des secteurs où les flux de contaminants sont connus (e.g. rejets industriels).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amiard-Triquet C., Amiard J.C., 1980. Radioécologie des milieux aquatiques. Ecologie appliquée et sciences de l'environnement 1, Masson éd. : 106-113.

Ardizzone G.D., Pelusi P., 1984. Yield and damage evaluation of bottom trawling on *Posidonia* meadows. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. édité, GIS Posidonie publ., 1 : 63-72.

Astier J.M., 1971. Régression de l'herbier de Posidonies et rupture des chaînes alimentaires. *Nat. Agric. Environ.*, 2 : 16-18.

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

Astier J.M., 1972b. Régression de l'herbier de Posidonies et rupture des chaînes alimentaires. (suite). *Nat. Agric. Environ.*, 3 : 8-10.

Astier J.M., 1984. Impact des aménagements littoraux de la rade de Toulon, liés aux techniques d'endiguage, sur les herbiers à *Posidonia oceanica*. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. édité, GIS Posidonie publ., 1 : 255-259.

Auger D., 1989. Méthode de dosage du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc dans la chair de poisson. Rapport IFREMER DERO-89-07-MR : 1-7.

Augier H., 1983. Étude et balisage des vestiges de l'herbier de Posidonies de la zone en instance de restructuration, en baie du Prado (Golfe de Marseille). DGST Marseille : 1-35.

Augier H., 1985. L'herbier à *Posidonia oceanica*, son importance pour le littoral méditerranéen, sa valeur comme indicateur biologique de l'état de santé de la mer, son utilisation dans la surveillance du milieu, les bilans écologiques et les études d'impact. *Vie Marine*, 7 : 85-113.

Augier H., Boudouresque C.F., 1979. Premières observations sur l'herbier de Posidonies et le détritique côtier de l'île du Levant (Méditerranée, France), à l'aide du sous-marin Griffon de la Marine Nationale. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 5 : 141-153.

Augier H., Giglio Y., Ramonda G., 1988. Étude *in vitro* de l'influence d'une peinture anti-fouling à base de Cuivre sur la phanérogame marine *Posidonia oceanica* (L.) Defile. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, 31 (2) L-VIII 67: p 157.

Augier H., Gilles G., Ramonda G., 1976. Recherche sur la pollution par le mercure dans le golfe de Fos : comportement des phanérogames marines de deux stations-tests par rapport

à celles du parc national de Port-Cros. *III Journées Étud. Pollutions, Split, CIESM* : 93-94.

Augier H., Gilles G., Ramonda G., 1977. Recherche sur la pollution mercurielle en rade d'Hyères et dans l'archipel des Stoechades (Méditerranée, France). 3. Teneur en mercure de la Phanérogame marine *Posidonia oceanica* en fonction de la profondeur et la pollution dans l'île de Port-Cros. Comparaison avec d'autres régions du littoral méditerranéen français. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 3 : 27-38.

Augier H., Gilles G., Ramonda G., 1978a. Recherche sur la pollution mercurielle du milieu maritime dans la région de Marseille (Méditerranée, France). Degré de contamination par le mercure de la Phanérogame marine *Posidonia oceanica* Delile à proximité du complexe portuaire et dans la zone de rejet du grand collecteur d'égout de la ville de Marseille. *Environ. Pollut.* 17 : 269-285.

Augier H., Gilles G., Ramonda G., 1978b. Recherche sur la pollution mercurielle dans le golfe de Fos (Méditerranée, France) : degré de contamination par le mercure des Phanérogames marines *Posidonia oceanica* Delile, *Zostera noltii* Horneman et *Zostera marina* (L.). *Rev. internation. Océanogr. méd.* (éd.) 51-52 : 55-69.

Augier H., Gilles G., Ramonda G., 1984a. L'herbier de *Posidonia oceanica* et la pollution par le mercure sur le littoral des Bouches-du-Rhône et du Var (France). *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 1 : 399-406.

Augier H., Monnier-Besombes G., Sigoillot G., 1984b. Influence des détergents sur *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 1 : 407-418.

Augier H., Monnier-Besombes G., Sigoillot J.C., 1987. Étude préliminaire sur l'influence des borates constitutifs des détergents sur la phanérogame marine *Posidonia oceanica* Delile. *Rev. int. Océanogr. méd.*, 86/87 : 75-81.

Augier H., Ronneau C., Roucoux P., Lion R., Charlent O., 1991. Elementary composition study by neutronic activation of the marine phanerogam *Posidonia oceanica* (L.) Delile collected in a referring area of Port-Cros National Park (Mediterranean, Fr). *Mar. Biol.*, 109(2) : 345-353.

Avril A., Dutrieux E., Nicolas F., Vaxelaire A., 1984. Étude des fonds marins des Arésquières (Languedoc) : état des herbiers de Posidonies. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 1 : 173-177.

Azzolina J.F., Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Thelin L., Sageder G., Francour P., Sourenian P., 1985. Étude écologique des secteurs acquis ou susceptibles d'être acquis par le Conservatoire du littoral dans le département du Var : le domaine marin. Contrat Parc national de Port-Cros, Conservatoire du littoral, N°8300983400 : 150 p.

Azouz A., 1980. Les mers tunisiennes, zone de transition entre les deux bassins Occidental et Oriental de la Méditerranée. *Journées Étud. Systém. Biogéogr. médit., Cagliari, CIESM* : 69-72.

Bell J.D., Harmelin-Vivien M.L., 1983. Fish fauna of french mediterranean *Posidonia oceanica* seagrass meadows. Feeding habits. *Téthys*, 11 (1) : 1-14.

Ben Mustapha S., Guillaumont B., Ben Moussa H., 1993. Étude de la pollution marine dans le Golfe de Gabès en Tunisie. *III^e Symposium international "Protection du Milieu marin contre la Pollution urbaine"* Marseille : 4p.

Bertrand M.C., Boudouresque C.F., Bouladier E., Foret P., Gravez V., Lefèvre J.R., Meinesz A., Pergent G., 1988. Réseau de surveillance Posidonies. Rapport 2^{ème} Année. GIS Posidonie publ., Marseille : 1-81.

Bertrand M.C., Boudouresque C.F., Bouladier E., Foret P., Gravez V., Lefèvre J.R., Meinesz A., Pergent G., 1989. Réseau de surveillance Posidonies. Rapport 3^{ème} Année. GIS Posidonie publ., Marseille : 1-65.

Bethoux J.P., Courau P., Nicolas F., Ruiz-Pino D., 1990. Trace metal pollution in the Mediterranean Sea. *Oceanologica Acta*, 13(4) : 481-488.

Blanc J.J., Jeudy de Grissac A., 1978. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence. Contrat CNEXO 76/4043, 77/4074. Centre Nation. Exploit. Océans édit. : 1-185, i-vii, 42 pl. h.t.

Blanc J.J., Jeudy de Grissac A., 1984. Érosions sous-marines des herbiers à *Posidonia oceanica* (Méditerranée). *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 1 : 23-28.

Bodoy A., Nicolas F., Vaulot D., 1982. Inventaire préliminaire des formations de Posidonies dans le Golfe d'Aigues-Mortes (Méditerranée Nord-Occidentale). *Téthys*, 10(4) : 382-383.

Boudouresque C.F., Ballesteros E., Ben Maiz N., Boisset F., Bouladier E., Cinelli F., Cirik S., Cormaci M., Jeudy de Grissac A., Laborel J., Lanfranco E., Lundberg B., Mayhoub H., Meinesz A., Panayotidis P., Semroud R., Sinnassamy J.M., Span A., Vuignier G., 1990. Livre rouge "Gérard Vuignier" des végétaux, peuplements et paysages marins menacés de Méditerranée. UNEP/IUCN/ GIS Posidonie. MAP Technical Report Series N° 43. UNEP, Athens : 1-250.

Boudouresque C.F., Bertrand M.C., Bouladier E., Foret P., Meinesz A., Pergent G., Vitiello P., 1990. Le réseau de surveillance des herbiers de Posidonies mis en place en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (France). *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 32(1) B-118 : 11.

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

- Boudouresque C.F., Crouzet A., Pergent G., 1983.** Un nouvel outil au service de l'étude des herbiers à *Posidonia oceanica* : la Lépidochronologie. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internationale. Explor. sci. Médit.*, 28 (3) : 111-112.
- Boudouresque C.F., Giraud G., Panayotidis P., 1980b.** Végétation marine de l'île de Port-Cros (Parc national). XIX. Mise en place d'un transect permanent. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 6 : 207-221.
- Boudouresque C.F., Gravez V., Meinesz A., Molenaar H., Pergent G., Vitiello P., 1995.** L'herbier à *Posidonia oceanica* en Méditerranée : Protection légale et gestion. In "Pour qui la Méditerranée au 21^{ème} Siècle - Villes des rivages et environnement littoral en Méditerranée". OKEANOS 94, Maison de l'Environnement de Montpellier Édité. : 209-220.
- Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., 1983.** L'herbier à *Posidonia oceanica* : les interactions entre la plante et le sédiment. *J. Rech. océanogr.*, 8 : 99-122.
- Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A., Meinesz A., 1984.** Relation entre la sédimentation et l'allongement des rhizomes orthotropes de *Posidonia oceanica* dans la baie d'Elbu (Corse). *International Workshop on Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. and Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 1 : 185-191.
- Boudouresque C.F., Lefèvre J.R., Meinesz A., 1986.** Cartographie du carré permanent de la marina d'Elbu. *Trav. sci. Parc nat. rég. Rés. nat. Corse*, 2 : 24-35.
- Boudouresque C.F., Meinesz A., 1982.** Découverte de l'herbier de Posidonies. *Cahier Parc nation. Port-Cros*, 4 : 1-79.
- Boudouresque C.F., Pergent G., 1992.** The *Posidonia* Programme. In : B.F. Keegan (ed.) *Cost 647 - Coastal Benthic Ecology - Activity report 1988-1991*. Report EUR 13984 EN, Environmental Research Programme of the Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research and Development publ., Brussels : 352-360.
- Boudouresque C.F., Thommeret J., Thommeret Y., 1980a.** Sur la découverte d'un bioconcrétionnement fossile intercalé dans l'herbier à *Posidonia oceanica* dans la baie de Calvi (Corse). *Journées Étud. Systèm. Biogéogr. médit.*, Cagliari, C.I.E.S.M. : 139-142.
- Bougerol X., 1993.** Mise au point d'une technique analytique de dosage du mercure chez *Posidonia oceanica* (L.) Delile et *Sarpa salpa* (L.) - Résultats préliminaires. Mémoire DESS Biotoxicologie Appliquée aux Nuisances Industrielles, Université de Lille II : 1-38.
- Bourcier M., 1976.** Économie benthique d'une baie méditerranéenne largement ouverte et des régions voisines en fonction des influences naturelles et humaines. Thèse Doctorat d'Etat Sci. nat., Univ. Aix-Marseille II : 1-50 + 1-161.
- Bryan G.W., 1984.** Pollution due to heavy metals and their compounds. In *Marine Ecology*, O. Kinne ed., J. Wiley & Sons publ., 5 (3) : 1289-1431.
- Calmet D., Boudouresque C.F., Meinesz A., 1988.** Memorization of nuclear atmospheric tests by rhizomes and scales of the mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. *Aquat. Bot.*, 30 (4) : 279-294.
- Caye G., 1982.** On the apical regions of the axis of *Posidonia oceanica* (L.) Delile. In *Studies on aquatic vascular plants*, Symoens J.L., Hooper S.S. & Compere P. édité., Royal botanical Soc. Belg. : p80.
- Chabert D., 1979.** Pollution chimique par les métaux lourds et les composés organochlorés d'un milieu lagunaire (lagune du Brus - Méditerranée). Thèse 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille III : 1-145.
- Chabert D., 1980.** Pollution chimique par les métaux lourds et les composés organochlorés d'un milieu lagunaire : Lagune du Brus - Méditerranée. *Vie Marine*, HS, 2 : 1-145 + 80 Fig. h.t.
- Chabert D., Vicente N., 1979.** Variations au cours du temps de la concentration en organochlorés dans l'eau, la matière vivante et les sédiments de la lagune du Brus (Var, France). *Vie Marine*, 1 : 30-37.
- Chabert D., Vicente N., Huang W., 1984.** Pollution par les composés organochlorés dans les rades du Parc National marin de Port-Cros. II - Contrôle pluriannuel. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 10 : 51-67.
- Charbonnel E., Bertrand M.C., Boudouresque C.F., Foret P., Leccia M., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ragazzi M., Rico-Raimondino V., 1992.** Réseau de surveillance Posidonies, Rapport 3^e phase/2^e année. GIS Posidonie publ., Marseille : 1-138.
- Chraïbi F., 1987.** Dynamique des populations des principaux crustacés de l'herbier de Phanérogame marine *Posidonia oceanica* (L.) Delile au Parc National de Port-Cros (Méditerranée, France). Thèse Doc. 3^e Cycle Écol. mar., Fac. Sci. Univ. Aix-Marseille III : 1-126 + 42 Tabl. + 76 Fig. h.t.
- C.I.E.M., 1988.** Results of the 1985 Baseline Study of Contaminants in Fish and Shellfish. ICES Cooperative Research Report N° 151.
- Cinelli F., Colantoni P., Fresi E., Solaini P., 1974.** La prateria sommersa. *Subacqueo*, 1 (9) : 19-21.
- Colantoni P., Gallignani P., Fresi E., Cinelli F., 1982.** Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile beds around the island of Ischia (Gulf of Naples) and adjacent waters. *Marine Ecology*, 3 (1) : 53-74 + 2 cartes h.t.
- Cooper G., 1974.** Les Posidonies... la pollution. Importance écologique et physique. *Bull. Observ. Mer*, 1 : 48-51.
- Cousteau J.Y., Paccalet Y., 1987.** La mer blessée. La Méditerranée. Flammarion édit. : 1-192.
- Cristiani G., 1980.** Biomasse et répartition de l'herbier de *Posidonia oceanica* de la Côte Bleue (B.d. Rh., France) et pollution marine par les métaux lourds. Thèse 3^e cycle, Univ. Aix-Marseille III, 1-150 + I-IX, + 1 carte h.t.

- Cristiani G., Gassend R., Augier H.**, 1980. Étude de la contamination expérimentale de la phanérogame marine *Posidonia oceanica* (L.) Delile par les composés mercuriques. Partie 1 - Modalités de la contamination par le chlorure mercurique. *Environ. Pollut.*, 1(23) : 153-162.
- Crouzet A.**, 1981. Mise en évidence de variations cycliques dans les écailles de rhizomes de *Posidonia oceanica* (Potamogetonaceae). *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 7 : 129-135.
- Darmoul B.**, 1988. Pollution dans le Golfe de Gabès (Tunisie). Bilan de six années de surveillance (1976-1981). *Bull. Inst. Océanogr. Pêche, Salammbô*, 15 : 61-84.
- De Vaugelas J., Meinesz A.**, 1992. *Premiers éléments sur les peuplements sous-marins des îles Cerbicales (Corse du Sud)*. Association de Gestion des îles Cerbicales et Lavezzi/PNRC/Labo. Env. Marin Litt. Univ. Nice Sophia Antipolis. 20 p.
- Drew E.A., Jupp B.P.**, 1976. Some aspects of the growth of *Posidonia oceanica* in Malta. *Underwater Research*, Academic Press, London, p. 357-367.
- Duarte C.M.**, 1991. Seagrass depth limits. *Aquat. Bot.*, 40 : 363-377.
- Eugène C.**, 1978. *Étude de l'épifaune des herbiers de Posidonia oceanica (L.) Delile du littoral provençal*. Thèse Doct. spécialité Océanol., Univ. Aix-Marseille II : 1-117 + 13 p. non num. + 11 Tabl. h.t.
- Francour P.**, 1990. *Dynamique de l'écosystème à Posidonia oceanica dans le Parc national de Port-Cros. Analyse des compartiments matre, litière, faune vagile, échinodermes et poissons*. Doctorat d'Université, Univ. P.M. Curie, Paris : 373 p.
- Fritts H.C.**, 1976 : *Tree rings and climate*. Academic Press, London, : 1-567 + ixii.
- Gambi M.C., Buia M.C., Casola E., Scardi M.**, 1989. Estimates of water movement in *Posidonia oceanica* beds : a first approach. *International Workshop on Posidonia Beds*, Boudouresque C.F., Meinesz A., Fresi E. & Gravez V. édité. GIS Posidonie publ., 2 : 101-112.
- García-Charton J.A., Bayle-Sempere J.T., Sanchez-Lizaso J.L., Chiesa P., Laurado F., Perez C., Djian H.**, 1993. Respuesta de la pradera de *Posidonia oceanica* y su ictiofauna asociada al anclaje de embarcaciones en el parque nacional de Port-Cros (Francia). *Publ. Espec. Inst. Esp. Oceanog.*, 11 : 423-430.
- Gautier Y.**, 1957. Recherches sur les biocénoses benthiques des côtes de Camargue et du golfe de Fos. *Rev. Trav. Stn. mar. Endoume*, 22 : 55-64.
- Giaccone G.**, 1981. Le risorse biologiche vegetali nella valorizzazione e protezione della fascia costiera. *Conv. Progetto finalizzato Oceanografia e Fondi marini*, Roma : 75-86.
- Giraud G.**, 1977. *Contribution à la description et à la phénologie quantitative des herbiers à Posidonia oceanica (L.) Delile*. Thèse Doctorat 3^e cycle, Université Aix-Marseille II : 1-150.
- Giraud G.**, 1980. *Synthèse cartographique des herbiers de Posidonies (Posidonia oceanica) entre Fos-sur-Mer et la rade d'Hyères*. Rapp. Contrat D.C.A.N. Toulon/Université Aix-Marseille II, N° C 79 48 869 512 : 43 p.
- Giraud G., Boudouresque C.F., Cinelli F., Fresi E., Mazzella L.**, 1979. Observations sur l'herbier de *Posidonia oceanica* (L.) Delile autour de l'île d'Ischia (Italie). *G. bot. ital.*, 114 (4) : 261-274.
- Grauby H., Augier H., Lion R., Charlent O.**, 1991. Neutron activation analysis of elemental composition in marine phanerogam, *Posidonia oceanica* (L.) Delile : a biological indicator of pollution. *Environ. Exper. Bot.*, 31(3) : 255-263.
- Gravez V., Boissery P., Francour P., Sinnassamy J.M., Boudouresque C.F.**, 1993. *Surveillance de l'herbier à Posidonia oceanica du golfe de Giens (Var, France). Premier suivi*. Syndicat Intercommunal Hyères-Carqueiranne pour l'assainissement de la baie de Giens & GIS Posidonie édité., : 1-59.
- Gravez V., Nieri M., Laffond R.**, 1990. *Surveillance de l'herbier de Posidonies de la baie du Prado (Marseille). Suivi 1989*. DGST Ville de Marseille & GIS Posidonie, Marseille, : 1-40 + annexe.
- Guerrini P.**, 1993. *Mise au point d'une méthode d'analyse du mercure chez Posidonia oceanica. Mémoire M.S.T. "Valorisation des Ressources Naturelles"*. Univ. Corse / CEVA-REN : 1-29 + annexes.
- Gullizzoni P.**, 1991. The role of heavy metals and toxic materials in the physiological ecology of submersed macrophytes. *Aquat. Bot.*, 41 : 87-109.
- IFREMER**, 1993. *Qualité du milieu littoral*. Rapport IFREMER : 1-240.
- Jedy de Grissac A., Boudouresque C.F.**, 1985. Rôles des herbiers de phanérogames marines dans les mouvements des sédiments côtiers : les herbiers à *Posidonia oceanica* Coll. *fr.-japon. Océanogr.*, Marseille 16-21 Sept. 85, 1 : 143-151.
- Jedy de Grissac A., Tiné J.**, 1980. *Géologie et sédimentologie littorale et marine de l'aire toulonnaise*. Tome I. Contrat Marine nationale, Bureau d'études anti-pollution / GEOMER : 116 p.
- Jupp B.P.**, 1977. The effects of organic pollution on benthic organisms near Marseille. *Internation. J. Environment. Studies*, 10 : 119-123.
- Ktari-Chakroun F., Azouz A.**, 1971. Les fonds chabutables de la région Sud-Est de la Tunisie (Golfe de Gabès). *Bull. Inst. Océanogr. Pêche Salammbô*, 2 (1) : 4-47.
- Ledent G., Warnau M., Temara A., Jangoux M., Dubois P.**, 1993. Contamination par les métaux lourds et dynamique de l'accumulation du Cadmium chez la phanérogame marine *Posidonia oceanica*. In : Boudouresque C.F., Avon M. & Pergent-Martini C. (eds.) *Qualité du milieu marin - Indicateurs biologiques et physico-chimiques*. 3^e Rencontres scientifiques de la Côte Bleue. GIS Posidonie publ. : 249-252.

- Libes M.**, 1986. *Étude de la toxicité à court terme d'un détergent anionique sur l'assimilation photosynthétique de Posidonia oceanica (phanérogame marine) et ses épiphytes*. Contrat GIS Posidonie/Parc nation. Port-Cros, N° 83017-83400 PC, 49 p.
- Meinesz A.**, 1987. *Limite inférieure de Posidonia oceanica entre Port-Cros et Bagaud (passe Nord)*. Contrat Parc National de Port-Cros/GIS Posidonie : 7p.
- Meinesz A., Bianconi C.H.**, 1986. Suivi du balisage de la limite inférieure de l'herbier de Posidonies dans la baie d'Elbu. *Trav. sci. Parc nat. rég. Rés. nat. Corse*, 2 : 33-36.
- Meinesz A., Boudouresque C.F., Bianconi C.H., Simonian M.**, 1987. Cartographie de la limite inférieure de l'herbier de Posidonies de la baie d'Elbu. *Trav. sci. Parc nat. rég. Rés. nat. Corse*, 13 : 27-37.
- Meinesz A., Caye G., Charbonnel E., Lefèvre J.R.**, 1988. Localisation de la limite inférieure des herbiers à *Posidonia oceanica* et observations sur sa fructification dans la Réserve Naturelle des îles Lavezzi. *Trav. sci. Parc nat. rég. Rés. nat. Corse*, 14 : 53-70.
- Meinesz A., Laurent R.**, 1978. Cartographie et état de la limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans les Alpes-maritimes (France). Campagne Poséidon 1976. *Botanica marina*, 21 (8) : 513-526.
- Meinesz A., Laurent R.**, 1982. Cartes de la végétation sous-marine des Alpes-Maritimes (côtes françaises de la Méditerranée). I. Limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans le Golfe Juan et à l'Est des îles de Lérins. *Ann. Inst. océanogr.*, 58 (1) : 103-112.
- Meinesz A., Lefèvre J.R.**, 1978. Destruction de l'étage infralittoral des Alpes-Maritimes (France) et de Monaco par les restructurations du rivage. *Bull. Ecol.*, 9 (3) : 259-276.
- Mendez S.**, 1994. *Impact des installations d'aquaculture sur les herbiers à Posidonia oceanica : Identification des descripteurs*. Mémoire MST. Valorisation des Ressources Naturelles. Université de Corse : 1-29.
- Migon C., Jourdan E., Nicolas E., Gentili B.**, 1994. Effects of Reduced Leaded Fuel Consumption on Atmospheric Lead Behaviour. *Chemosphere*, 28(1) : 139-144.
- Molinier R., Picard J.**, 1952. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral méditerranéen français. *Ann. Inst. océanogr.*, Paris, 27 (3) : 157-234.
- Monnier-Besombes G.**, 1983. *Étude de la contamination de la Posidonie (Posidonia oceanica L. Delile) et de son milieu par des composants de détergents synthétiques*. Thèse Doct. 3^e cycle Écol., Univ. Aix-Marseille II : 1-162.
- Morri C.**, 1991. Présentation d'un indice synthétique pour l'évaluation de l'épiphytisme foliaire chez *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Posidonia Newsletter*, 4(1) : 33-37.
- Natali C.**, 1992. *Localisation des herbiers à P.o. (L.) Delile 1813 en Corse. Essai de caractérisation du golfe d'Ajaccio à travers l'étude de la vitalité de l'herbier et la structure du peuplement ichtyque associé*. DESS "Écosystèmes Méd". Univ. de Corse / DIREN : 1-54.
- Nieri M., Francour P., Sinnassamy J.M., Urscheler F., Fleury M.C.**, 1991. *Les fonds marins de l'anse du Rouet (Corry-le-Rouet, Bouches du Rhône). Étude du site*. GIS Posidonie publ., Marseille : 1-107 + 1 carte h.t.
- Panayotidis P., Boudouresque C.F., Marcot-Coquegniot J.**, 1981. Microstructure de l'herbier de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. *Botanica marina*, 24 (3) : 115-124.
- Péres J.M., Picard J.**, 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la Méditerranée. *Rec. Trav. Stn. mar. Endoume*, 31 (47) : 1-137.
- Pergent C.**, 1988. Variabilité de l'abondance des cellules à tanin dans les écailles de *Posidonia oceanica*. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, 31 (2) B-19 : p.7.
- Pergent G.**, 1987. *Recherches Lépidochronologiques chez Posidonia oceanica (Potamogetonaceae). Fluctuations des paramètres anatomiques et morphologiques des écailles des rhizomes*. Thèse Doct. Océanol., Univ. Aix-Marseille II : 1-853.
- Pergent G.**, 1990. Lepidochronological analysis in the seagrass *Posidonia oceanica* : a standardized approach. *Aquat. bot.*, 37 : 39-54.
- Pergent G.**, 1991a. La protection légale de la Posidonie en France : Un outil efficace. Nécessité de son extension à d'autres pays méditerranéens. In : *Rencontres scientifiques de la Côte Bleue "Les Espèces Marines à Protéger en Méditerranée"*, Boudouresque C.F., Avon M. & Gravez V. edit., GIS Posidonie publ., 2 : 29-34.
- Pergent G.**, 1991b. Les indicateurs écologiques de la qualité du milieu marin en Méditerranée. *Oceanis*, 17 (4) : 341-350.
- Pergent G., Pergent C.**, 1985. Une nouvelle application de la lépidochronologie : le cycle de formation des feuilles de *Posidonia oceanica*. *Sci. Rep. Port-Cros nation. Park*, 11 : 187-191.
- Pergent G., Pergent-Martini C.**, 1990. Some applications of lepidochronological analysis in the seagrass *Posidonia oceanica*. *Botanica marina*, 33 : 299-310.
- Pergent G., Pergent-Martini C.**, 1991. Leaf renewal cycle and primary production of *Posidonia oceanica* in the Bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis. *Aquat. Bot.*, 42 : 49-66.
- Pergent G., Pergent-Martini C., Rico-Raimondino V.**, 1992. Estimation of Past Primary Production of *Posidonia oceanica* using Lepidochronological Data. *Rapp. P.V. Réun. Commiss. internation. Explor. sci. Médit.*, 33 : p 47.
- Pergent-Martini C.**, 1992. *Contribution à l'étude des stocks et des flux d'éléments dans l'écosystème à Posidonia oceanica*. 1 - Étude expérimentale sur la croissance 2 - Mémorisation des teneurs en métaux-traces. DESS

- Pergent-Martini C.**, 1994. *Impact d'un rejet d'eaux usées urbaines sur l'herbier à Posidonia oceanica, avant et après la mise en service d'une station d'épuration*. Thèse Doct. Univ. Corse, Fr. : 1-190.
- Pergent-Martini C., Pergent G.**, 1991. *Évaluation de la production primaire de la baie d'Olbia (Sardaigne) par la méthode lépidochronologique*. Contrat Bioservice/GIS Posidonie N°9101, Gis Posidonie édit. : 1-67.
- Pergent-Martini C., Pergent G.**, 1993. Impact of the Marseille sewage treatment plant after four years' operation. *Symposium international protection du milieu marin contre les pollutions urbaines*, Marseille, 20-22 Octobre 1993, 3 : 3 p.
- Pergent-Martini C., Pergent G., Girard M.**, 1993a. *L'herbier à Posidonia oceanica du Plateau des Chèvres - Impact de la station d'épuration de la Ville de Marseille après quatre années de fonctionnement*. Contrat Ville de Marseille / GIS Posidonie N° 9211, CEVAREN & GIS Posidonie Centre de Corse Edit. : 1-48.
- Pergent-Martini C., Rico-Raimondino V., Pergent G., Arnoux A., Boudouresque C.F.**, 1992. Memorization of heavy metals by *Posidonia oceanica*, preliminary results. *Rapp. P.V. Réun. Comit. internat. Explor. sci. Médit.*, 33 : p48.
- Pergent-Martini C., Rico-Raimondino V., Pergent G., Boudouresque C.F., Bouquegneau J.M., Arnoux A.**, 1993b. Mémorisation des métaux-traces par *Posidonia oceanica*. In : Boudouresque C.F., Avon M. & Pergent-Martini C. (eds.) *Qualité du milieu marin - Indicateurs biologiques et physico-chimiques*, Rencontres scientifiques de la Côte Bleue, GIS Posidonie-publ., 3 : 105-120.
- Picard J.**, 1978. Impact sur le benthos marin de quelques grands types de nuisances liées à l'évolution des complexes urbains et industriels de la Provence occidentale. *Océanis*, 4 (3) : 214-251.
- Pire H.**, 1984. Depth-adaptation in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac et Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., 1 : 227-234.
- PNUE**, 1990. Livre rouge "Gérard Vuignier" des végétaux, peuplement et paysages marins menacés de Méditerranée. UNEP/IUCN/GIS Posidonie. *MAP Technical Report Series* N° 43. UNEP, Athens : 1-250.
- Ramade F.**, 1977. *Écotoxicologie*. Masson, Paris: Coll. Écologie, 9 : 1-205.
- Ramade F.**, 1990. La conservation des Écosystèmes littoraux méditerranéens. *Bull. soc. Zool. France*, 114(3) : 121-136.
- Ramade F.**, 1993. Discours d'ouverture. In : Rencontres scientifiques de la Côte Bleue "Qualité du milieu marin - Indicateurs biologiques et physico-chimiques", Boudouresque C.F., Avon M. & Pergent-Martini C. edit., GIS Posidonie publ., 3 : 19-30.
- Rico V., Pergent G.**, 1990. *Évaluation de la production primaire de l'herbier à Posidonia oceanica de la baie de Porto Conte (Sardaigne) par la méthode lépidochronologique*. Programme MEDSPA, Contrat GIS Posidonie & Marconsult, Marseille : 1-136.
- Roméo M.**, 1991. Toxicologie des métaux-traces dans l'environnement marin. *Océanis*, 17(4) : 383-402.
- Romero J., Pergent G., Pergent-Martini C., Mateo M.A., Regnier C.**, 1992. The detritic compartment in a *Posidonia oceanica* meadow : litter features, decomposition rates and mineral stocks. *Marine Ecology*, 13(1) : 73-83.
- Romero-Martinengo J.**, 1985. *Estudio ecologico de las Fanerogamas marinas de la costa Catalana : produccion primaria de Posidonia oceanica (L.) Delile en las islas Medes*. Tesis Doct. Facultad Biol. Univ. Barcelona, Spain : 1-261.
- Sanchez-Lizaso J.L.**, 1993. *Estudio de la pradera de Posidonia oceanica (L.) Delile de la Reserva Marina de Tabarca (Alicante) : Fenologia y produccion primaria*. Tesis doctoral, Universitat d'Alacant : 1-121.
- Serre F.**, 1976 : Les rapports de la croissance et du climat chez le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). I. Méthodes utilisées. L'activité cambiale et le climat. *Oecol. Plant.* 11 : 143-171.
- Valère R.**, 1984. *Contribution à l'étude de la pollution saturnique du littoral provençal et de ses conséquences sur la flore et la faune marine benthique*. Thèse Doct. 3^e cycle Océanologie, Univ. Aix-Marseille II : 1-153.
- Vicente N.**, 1983. Action des polluants sur les écosystèmes littoraux méditerranéens. *Oceanis*, 9(6) : 481-492.
- Vicente N., Chabert D.**, 1981. Pollution par les composés organochlorés dans les rades du Parc National marin de Port-Cros. 1. Étude préliminaire. *Trav. sci. Parc natl. Port-Cros*, 7 : 35-44.