

**PROPOSITION D'UNE STRATEGIE POUR LE CONTROLE DES
ESPECES ENVAHISSANTES MARINES DANS LE PARC NATIONAL
DE PORT-CROS**

ILLUSTREE PAR LE CAS DE DEUX ESPECES DE *CAULERPA*

OCTOBRE 2005



GRAVEZ Vincent, BOUDOURESQUE Charles-François, RUITTON Sandrine

PROPOSITION D'UNE STRATEGIE POUR LE CONTROLE DES ESPECES

ENVAHISSANTES MARINES DANS LE PARC NATIONAL DE PORT-CROS

ILLUSTREE PAR LE CAS DE DEUX ESPECES DE *CAULERPA*

Rapport final (Octobre 2005) du contrat n°PNPC 03-014 83400 PC

GRAVEZ Vincent, BOUDOURESQUE Charles-François, RUITTON Sandrine

Commande :

Parc national de Port-Cros
Castel Sainte Claire. 83418 Hyères Cedex
Tél : 04.94.12.82.30 Fax :04.94.12.82.31

Réalisation :

GIS Posidonie, Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'étude de l'environnement marin, Parc scientifique & technologique de Luminy, Case 901, 13288 Marseille Cedx 09.
Tél : 04.91.82.91.35 Fax :04.91.41.12.65. e-mail : gis@com.univ-mrs.fr
Correspondant pour cet étude : ruitton@com.univ-mrs.fr

Ce document doit être cité sous la forme suivante :

GRAVEZ V., BOUDOURESQUE C.F., RUITTON S., 2005. Proposition d'une stratégie de contrôle des espèces envahissantes marines dans les eaux du Parc national de Port-Cros, illustrée par le cas de deux espèces de *Caulerpa*. GIS Posidonie et Parc national de Port-Cros publ., Fr : 1-68.

SOMMAIRE

1. PREAMBULE	2
2. GENERALITES SUR LES ESPECES ENVAHISSANTES	3
2.1. CARACTERISTIQUES DES DEUX ESPECES DE <i>CAULERPA</i>	5
2.2. EXPANSION DE <i>CAULERPA TAXIFOLIA</i> EN MEDITERRANEE, CALIFORNIE ET AUSTRALIE	7
2.3. EXPANSION DE <i>C. RACEMOSA</i> EN MEDITERRANEE.....	11
3. LES ENJEUX DE L'EXPANSION DES ESPECES DE <i>CAULERPA</i> ENVAHISSANTES	12
3.1. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT	12
3.2. IMPACTS SOCIAUX, ECONOMIQUES ET CULTURELS.....	17
4. LES OUTILS DE MAITRISE DES <i>CAULERPA</i> ENVAHISSANTES	20
4.1. ASPECTS REGLEMENTAIRES.....	20
4.2. LES STRATEGIES NATIONALES, REGIONALES ET LOCALES DE CONTROLE DES ESPECES DE <i>CAULERPA</i> ENVAHISSANTES	28
4.3. LES RESEAUX D'EXPERTISE ET D'INFORMATION	32
4.4. LES METHODES DE CONTROLE	36
5. LA SITUATION PARTICULIERE DU PARC NATIONAL DE PORT-CROS	45
6. DEFINITION DE STRATEGIES POUR LE PARC NATIONAL DE PORT-CROS	46
6.1. SENSIBILISATION DU GRAND PUBLIC, APPEL A SIGNALISATION	48
6.2. ACTIONS CONCERTEES AVEC LES USAGERS	49
6.3. ORGANISATION DU MOUILLAGE FORAIN	50
6.4. PROSPECTIONS.....	51
6.5. MODELISATIONS.....	53
6.6. INTERVENTIONS	54
6.7. VEILLE BIOLOGIQUE ET TECHNOLOGIQUE	56
6.8. ROLE DU PARC NATIONAL DE PORT-CROS DANS SON ENVIRONNEMENT LOCAL ET INTERNATIONAL	57
7. DISCUSSION GENERALE SUR LE PHENOMENE ET LES STRATEGIES	58
9. GLOSSAIRE	61
10. BIBLIOGRAPHIE	62
11. ACRONYMES	67

1. Préambule

L'expansion d'espèces envahissantes, généralement introduites, est considérée, au niveau international, comme l'un des problèmes environnementaux majeur du XXI^{ème} siècle.

Au niveau mondial, ce phénomène a de fortes implications en terme de conservation de la nature et d'incidences économiques.

La mer Méditerranée est l'une des régions du monde les plus touchées par les introductions d'espèces. Les espèces introduites représentent entre 4 à 20% de la diversité spécifique, selon le groupe taxonomique considéré. En outre, la cinétique des introductions y est très rapide : depuis la fin du XIX^{ème} siècle, le nombre des espèces introduites y double tous les 20 ans. Parmi ces espèces, certaines deviennent envahissantes et génèrent des impacts préoccupants sur la biodiversité (en particulier la diversité spécifique et l'écodiversité) et les activités humaines.

Si la Société d'aujourd'hui se montrait incapable de contrôler les espèces déjà introduites et de limiter significativement le flux des nouvelles introductions, cet échec serait sanctionné, dans un avenir qui peut sembler encore lointain, par une homogénéisation planétaire des peuplements et des paysages. Sur le plan écologique et économique, cette sanction n'est plus une hypothèse lointaine : elle a en effet commencé depuis des siècles, avec une formidable accélération au XX^{ème} siècle. Sans parler des conséquences écologiques, les coûts économiques sont déjà colossaux et les perspectives pour le XXI^{ème} siècle donnent le vertige.

Pour le moment, l'externalisation des coûts, c'est à dire le fait que ce ne soient pas les responsables des introductions qui en paient les conséquences, mais l'ensemble de la Société, et une diffusion encore confidentielle des données économiques sur les introductions, n'ont pas favorisé la prise de conscience par le grand public, et donc par les élus et les administrations.

Quoi qu'il en soit, cela souligne l'importance d'une stratégie de lutte contre les espèces introduites, tout particulièrement dans le cadre de la gestion des Aires Marines Protégées (AMP) telle que le Parc national de Port-Cros.

Caulerpa taxifolia et *Caulerpa racemosa* sont deux espèces végétales particulièrement envahissantes en Méditerranée, en Californie et en Australie. Ces deux espèces y présentent des expansions rapides et des impacts sur la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes et certaines activités humaines.

Les travaux suscités par l'expansion de ces deux espèces de *Caulerpa* ont permis de définir des stratégies de contrôle du phénomène.

Le présent document vise à formaliser une telle stratégie dans le cadre du Parc national de Port-Cros (PNPC). Il est basé sur :

- La littérature scientifique et technique disponible sur les deux espèces ;
- Les travaux de deux programmes Life de la Commission européenne, spécifiques à *C. taxifolia* ;
- Les textes de certaines Conventions internationales et des recommandations des organismes internationaux sur les espèces envahissantes et notamment les « Recommandations d'Héraklion » issues de l'atelier du PNUE-PAM sur les espèces de *Caulerpa* en Méditerranée ;
- Des connaissances régionales et locales du phénomène, notamment issues de l'Observatoire sur l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée ;
- Les comptes rendus et articles scientifiques rédigés à la suite des interventions antérieures pour le contrôle de ces espèces dans les eaux du PNPC et du document d'objectifs réalisé dans le cadre de Natura 2000 ;
- Les travaux de l'IFREMER pour la caractérisation des fonds autour de Port-Cros, et notamment des habitats sensibles, face à l'expansion de ces espèces de *Caulerpa* ;
- Des stratégies de lutte mises en place contre les espèces envahissantes définies par certains pays (dont certaines sont spécifiques aux espèces de *Caulerpa* envahissantes) ;

2. Généralités sur les espèces envahissantes

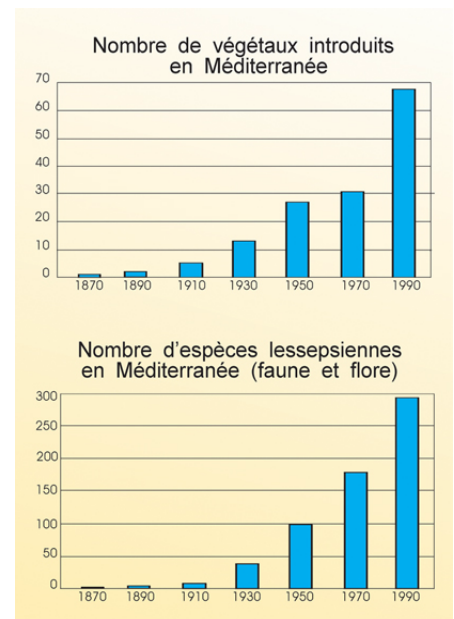
Une espèce introduite est une espèce qui a été transportée par l'homme (directement ou indirectement) de sa région d'origine vers une nouvelle région, avec laquelle il existe une discontinuité géographique. Dans sa nouvelle région, elle est naturalisée, c'est à dire qu'elle n'a pas (ou plus) besoin de l'homme pour se multiplier. Les espèces qui étendent marginalement leur aire de répartition (par exemple à la faveur d'un épisode climatique favorable) ne sont donc pas considérées comme introduites. Il en va de même des espèces cultivées (tomate, pomme de terre, blé, maïs, etc.) qui ne se maintiendraient pas sans l'aide de l'homme (Boudouresque, 1999).

Une espèce introduite est considérée comme envahissante (= invasive) quand elle a un impact écologique et/ou économique significatif (Boudouresque, 1999 ; Boudouresque & Verlaque, 2002).

L'expansion d'espèces introduites envahissantes est considérée, au niveau international, comme l'un des phénomènes environnementaux majeurs du XXI^{ème} siècle. En effet, (i) contrairement à d'autres problèmes environnementaux aujourd'hui maîtrisés, au moins partiellement, par exemple la pollution et les marées noires (certes insupportables), et dont l'intensité ou la fréquence n'augmentent plus ou déclinent, la cinétique des introductions se situe dans une phase d'accélération. (ii) Contrairement à certains impacts humains sur l'environnement et l'économie, par exemple certaines formes de pollution, qui sont rapidement (1 à 10 ans) réversibles, les introductions d'espèces sont irréversibles, à l'échelle humaine et même géologique. La plupart des conventions internationales, de même que la Directive Habitats de l'Union Européenne, accordent donc aujourd'hui une large place au problème des introductions (§ 3.1).

Les introductions d'espèces ne constituent pas un phénomène récent mais le flot des introductions s'est formidablement accéléré au cours du XX^{ème} siècle. En Méditerranée, pour les seules espèces marines, Boudouresque (1999, 2001) et Boudouresque & Verlaque (2002) considèrent que 85 espèces de plantes et environ 330 espèces animales sont introduites, représentant 4 à 20% de la biodiversité de cette mer selon les groupes taxonomiques considérés (Fig. 1). La cinétique des introductions, linéaire dans certaines parties du monde, est exponentielle en Méditerranée : le nombre des nouvelles introductions d'espèces marines tend à y doubler tous les 20 ans, faisant de cette mer l'une des régions du monde les plus touchées par les introductions (Ribera & Boudouresque, 1995 ; Boudouresque, 2001).

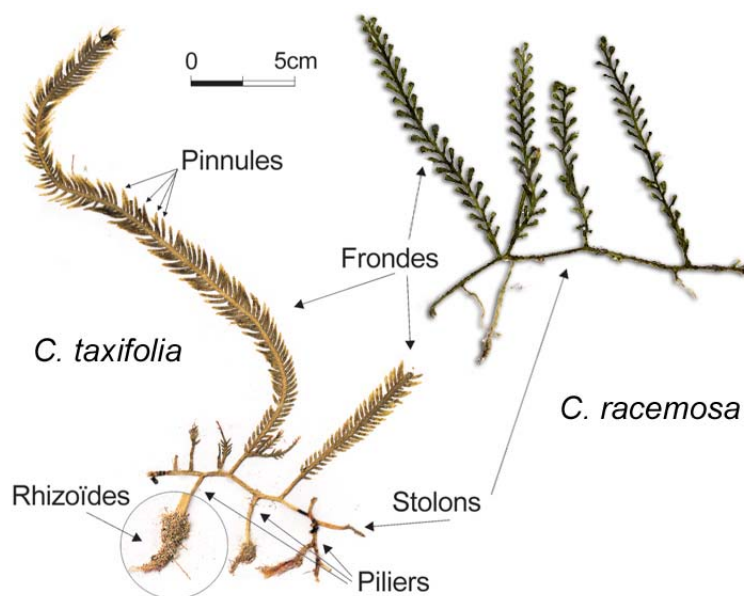
Figure 1. En haut, nombre de végétaux (lessepsiens, c'est à dire entrés via le canal de Suez, et non lessepsiens) introduits en Méditerranée, de 1870 à 1990. Les espèces introduites après 1990 ne sont pas prises en compte. Données cumulées. En bas, nombre d'espèces introduites (faune et flore) en Méditerranée entre 1870 et 1990. Les espèces introduites après 1990 ne sont pas prises en compte. Données cumulées. D'après Boudouresque (1999), redessiné.



Toutes les espèces introduites ne deviennent pas systématiquement envahissantes et donc nuisibles ; en moyenne, 1 espèce introduite sur 10 présente les caractéristiques d'une espèce envahissante (*Tens rule* de Williamson & Fitter, 1996 in Boudouresque, 1999), ce qui est en accord avec les données de Méditerranée où 15 espèces de macrophytes peuvent effectivement être considérées comme envahissantes (Verlaque *et al.*, 2005)¹. Sur ces bases théoriques, Boudouresque & Verlaque (2002) estiment que, d'ici 20 ans, 5 à 10 espèces de macrophytes nouvellement introduites en Méditerranée présenteront ce caractère avec comme conséquences des impacts graves sur la biodiversité et les activités humaines.

1. Ces espèces sont, outre *C. taxifolia* et *C. racemosa* : *Acrothamnion preissii* (Italie occidentale), *Asparagopsis armata* (Méditerranée Nord-occidentale), *A. taxiformis* (Italie occidentale), *Bonnemaisonia hamifera*, *Dasysiphonia* sp. (Étang de Thau, France), *Grateloupia turuturu* et *Polysiphonia morrowii* (Lagune de Venise et de Thau), *Womersleyella setacea* (Italie occidentale, Corse et Mer Egée), *Colpomenia peregrina*, *Sargassum muticum* (lagune de Thau, en France), *Styopodium schimperi* (Méditerranée orientale, spécialement côtes levantines), *Undaria pinnatifida* (Lagune de Thau), *Codium fragile* (Lagune de Thau).

Figure 2. Structure générale des espèces du genre *Caulerpa*. Ici *C. racemosa* et *C. taxifolia*, souches envahissantes en Méditerranée. D'après l'herbier de Marc Verlaque.



Les vecteurs d'introductions d'espèces sont nombreux ; pour la mer Méditerranée, Boudouresque (2001) recense : l'introduction via le Canal de Suez (67% des introductions), le fouling ou *clinging*, espèces transportées sur les coques de navires (13%), les espèces aquacoles échappées et leurs espèces accompagnatrices (1% et 8% respectivement), les eaux de ballasts (2%), les appâts pour la pêche (1%) et enfin les espèces échappées d'aquariums (<1%)².

Les eaux de ballasts, le fouling et le *clinging*, représentent à l'échelle mondiale le principal vecteur d'introduction. Le contrôle de ces sources fait l'objet de recommandations de l'**Organisation Maritime Internationale (OMI)** et a motivé la mise en place de plans spécifiques dans les pays anglo-saxons.

Le genre *Caulerpa* comporte près d'une centaine d'espèces et de variétés, répandues dans les mers tempérées et surtout les mers chaudes. En Méditerranée, deux espèces de *Caulerpa* sont indigènes de façon certaine : *Caulerpa prolifera* et *C. ollivieri*³.

D'autres espèces de *Caulerpa* sont arrivées de Mer Rouge en Méditerranée ; c'est le cas de deux **immigrants lessepsiens** (= entrés par le canal de Suez) probables : *Caulerpa scalpelliformis* (Turquie et côtes levantines) et *Caulerpa mexicana* (côtes levantines).

Caulerpa taxifolia (Vahl) C. Agardh est une Chlorobionte, que l'on peut trouver dans les mers tropicales ainsi que dans les régions tempérées d'Australie du Sud (Fig. 2, 3). Elle a été observée pour la première fois en Méditerranée en 1984 (Meinesz & Hesse, 1991). L'origine de son introduction, via le circuit aquariologique, est aujourd'hui clairement établie (§ 1.2). Cette souche⁴ envahissante affectait, fin 2001 plus de 13 000 ha de fonds marins, dans 6 pays de Méditerranée. Elle a également été découverte en Californie (en 2000) et en Australie (en 2000). Cette souche est considérée par le *IUCN Invasives Species Specialist Group* comme l'une des 100 espèces envahissantes les plus dommageables à l'environnement mondial (IUCN, 2000⁵).

Une dernière espèce, *Caulerpa racemosa* (Forsskål) J. Agardh est une espèce largement distribuée dans les mers tropicales et tempérées chaudes. *C. racemosa* est décrite dans la littérature avec de nombreuses variétés et formes différentes qui pourraient en fait masquer plusieurs espèces distinctes comme le soulignent certains travaux récents (Benzie *et al.*, 1997 ; Verlaque *et al.*, 2000). En Méditerranée, cette espèce, initialement signalée en Tunisie (à Sousse, 1926), est généralement considérée comme un **immigrant lessepsien**, mais la réalité est plus complexe et ses populations méditerranéennes sont en fait composées de trois variétés distinctes, *Caulerpa racemosa* var. *turbinata-uvifera* et *C. racemosa* var. *lamourouxii*, anciennement introduites, et d'une variété envahissante récemment introduite, *C. racemosa* var. *cylindracea* (Fig. 2-3). Cette dernière variété, dont la première mention en Méditerranée date de 1991, s'est dispersée rapidement à travers toute la Méditerranée, de la Libye aux îles Baléares, et est maintenant présente dans 11 pays (Piazzi *et al.*, 2005) où elle concernerait 700 à 750 km du linéaire côtier fin 2003.

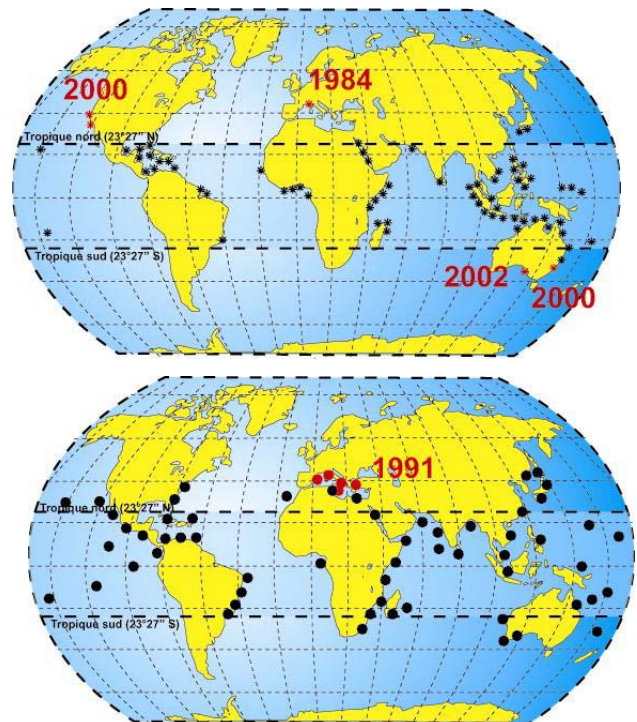
2. Les introductions via des sources inconnues représentent 7%.

3. Il s'agit peut-être d'une forme naine de *Caulerpa prolifera*.

4. Sauf mention contraire, nous nous référons dans ce document à la « souche méditerranéenne de *Caulerpa taxifolia* d'origine aquariologique et résistante au froid ».

5. <http://www.issg.org/booklet.pdf> - The IUCN Invasives Species Specialists Group, « 100 of the world worst invasives alien species » (pdf format).

Figure 3. En haut : distribution mondiale de *Caulerpa taxifolia*. En rouge, localisations et dates probables des introductions ou premières signalisations. D'après Meinesz *et al.*, 2001b (redessiné). En bas, distribution mondiale de *Caulerpa racemosa*. En rouge, localisation et date de première signalisation de la souche envahissante en Méditerranée (d'après Verlaque *et al.*, 2000 ; redessiné).



2.1. Caractéristiques des deux espèces de *Caulerpa*

Les Chlorobiontes (Plantae) du genre *Caulerpa* (Bryopsidales) présentent la particularité d'être coenocytiques, c'est à dire qu'elles ne sont pas composées de cellules différenciées, mais d'une "cellule" unique géante renfermant le **cytoplasme** et des millions de **noyaux**. On peut distinguer sur ces végétaux les rhizomes (= "stolons"), portant des feuilles (= "frondes") et des piliers terminés par des rhizoïdes, qui jouent le rôle fonctionnel de racines (Fig. 2).

La souche aquariologique méditerranéenne de *Caulerpa taxifolia* présente des caractéristiques morphologiques et physiologiques inhabituelles par rapport à la plupart des souches tropicales : longueur des feuilles supérieure (jusqu'à 80 cm au lieu de 25 cm dans les eaux tropicales), densité exceptionnelle (jusqu'à 14 000 feuilles.m⁻²), adaptation à un large spectre de températures, synthèse de substances toxiques, etc.

Cette souche peut survivre à des températures comprises entre +10°C et +31°C. Il est donc peu probable qu'elle disparaisse naturellement des sites où elle s'est nouvellement implantée dans le monde à la suite d'un hiver trop rigoureux ou d'un réchauffement des eaux, contrairement à ce que l'on a pu espérer initialement.

La croissance des rhizomes commence en mai-juin et les meilleures conditions de croissance sont observées en août-septembre (jusqu'à 1.5 cm.d⁻¹) lorsque la température de l'eau est comprise entre +20°C et +30°C (Komatsu *et al.*, 1997). Les rhizomes de *C. taxifolia* peuvent ainsi s'étendre sur près de 2 m en une année et tisser un réseau très dense : on a mesuré jusqu'à 350 m linéaires de stolons par m² de fond (Meinesz *et al.*, 1995a).

Tout comme *C. taxifolia*, *C. racemosa* var. *cylindracea* tolère les températures hivernales relativement basses du Nord de la Méditerranée ; elle montre toutefois un cycle saisonnier plus marqué que pour *C. taxifolia*, avec une régression nette de ses peuplements en hiver (Piazzi & Cinelli, 1999 ; Ruitton *et al.*, 2005b). Au printemps, avec le réchauffement des eaux, la croissance devient rapide (jusqu'à 1.3 cm.d⁻¹, Ruitton *et al.*, 2005b) permettant la colonisation de la plupart des substrats (excepté les herbiers de Posidonies denses et les substrats meubles instables), de 0 à 30 m de profondeur (jusqu'à -60 m dans le bassin oriental ; Tolay *et al.*, 2001). *Caulerpa racemosa* est plus petite que *C. taxifolia* et ses peuplements présentent des biomasses beaucoup plus faibles (Buia *et al.*, 2001), mais sa vitesse d'expansion est par contre plus rapide (Piazzi *et al.*, 2001a, Ruitton *et al.*, 2005a).

Les Caulerpes, comme de nombreux autres végétaux, synthétisent des substances toxiques qui les protègent des prédateurs (herbivores) et parfois des compétiteurs (autres espèces de végétaux qui s'installent sur les mêmes types de fond). Neuf substances toxiques ont été découvertes chez la souche méditerranéenne de *C. taxifolia* ; parmi celles-ci la caulerpényne (§ 2.1) est produite en grande quantité (0.1 à 13% du poids sec). Cette même caulerpényne est également retrouvée chez *C. racemosa*, mais à des concentrations 35 à 80 fois moindres (Dumay *et al.*, 2002b ; Jung *et al.*, 2002).

Dans le genre *Caulerpa*, lorsqu'une partie de l'appareil végétatif est sectionnée, la cicatrisation est rapide ; la partie séparée (bouture) peut alors se développer indépendamment. De manière générale, cette stratégie de dissémination est très importante dans le genre *Caulerpa* (Silva, 2003 ; Smith & Walters, 1999). Cette reproduction végétative semble être le seul mode de reproduction de la souche aquariologique de *C. taxifolia* en Méditerranée. L'ensemble des colonies de cette algue en Méditerranée semble donc être un clone, c'est à dire génétiquement un seul et même individu fragmenté en de nombreux individus identiques. Ceccherelli & Piazzì (2001) ont démontré que, pour *C. racemosa* également, cette stratégie très efficace se révélait être une des clés du succès de son expansion.

La dissémination de ces deux espèces de *Caulerpa* sur de courtes distances se fait principalement par le transport de boutures emportées par les courants. Un petit fragment suffit pour donner naissance à une nouvelle colonie ; la progression de cette nouvelle colonie peut alors être très rapide. Pour *C. taxifolia*, une multiplication annuelle de la surface par 2 à 10 de la tache initiale a pu être mesurée (Vaugelas *et al.*, 1996). Une seule colonie produit ainsi des centaines de boutures qui peuvent se disperser sur des distances de plusieurs dizaines à centaines de mètres. L'extension se poursuit de proche en proche ; l'aire de répartition atteint ainsi la profondeur de 40 à 50 m (parfois plus) au bout d'une dizaine d'années. La colonisation se poursuit alors préférentiellement latéralement, de part et d'autre de la zone atteinte, le côté situé sous le courant dominant progressant plus vite (Meinesz *et al.*, 1997).

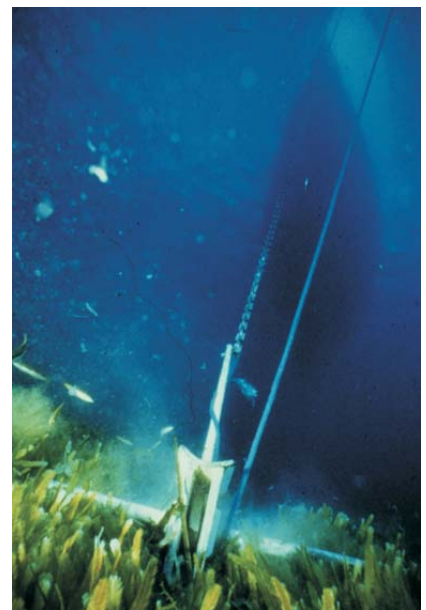


Figure 4. Un bateau de plaisance ancré dans une prairie de *Caulerpa taxifolia*. Photographie A. Meinesz©.

La dissémination de boutures dans les sites très éloignés des secteurs fortement contaminés ne se fait que par le biais d'activités humaines, comme la navigation de plaisance et la pêche artisanale (Sant *et al.*, 1996 ; Gambi & Terlizzi, 1998 ; Relini *et al.*, 2000). D'où l'importance de la réglementation dans les sites colonisés afin de réduire les risques de dissémination anthropique (§ 3.4). Pour *C. taxifolia*, les fragments de la plante, accrochés aux systèmes d'ancrages (Fig. 4), aux engins de pêche, voire au matériel de plongée, peuvent survivre 10 jours dans un endroit humide à l'abri du soleil (puits d'ancre, filets, sac de plongée), régénérer et former une nouvelle colonie une fois rejetés en mer (Sant *et al.*, 1996).

A l'inverse de ce qui se produit pour *C. taxifolia*, pour laquelle la reproduction sexuée n'est pas complète (production de **gamètes** mâles seulement) et n'aboutit donc pas à la production de nouveaux individus (Carvalho *et al.*, 1998), la reproduction sexuée, aboutissant à la production de **zygotes** (= œufs), a bien été observée pour *C. racemosa* (Panayotidis & Zuljevic, 2001). La dispersion de ces zygotes et leur transport dans la masse d'eau explique la vitesse à laquelle *C. racemosa* a pu être disséminée rapidement à travers l'ensemble de la Méditerranée (§ 2.3).

2.2. Expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée, Californie et Australie

Méditerranée

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'apparition soudaine de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée, mais c'est l'introduction à partir d'un aquarium qui est apparue comme la plus probable. En effet, *C. taxifolia* a été utilisée pour la décoration des aquariums en Europe, dès le début des années 1960s, puis en France et à Monaco au début des années 1980s. Ce sont les travaux d'une équipe suisse sur la génétique de *C. taxifolia* qui ont permis de confirmer cette hypothèse : la souche cultivée dans les aquariums et celle trouvée en Méditerranée sont parfaitement identiques, alors qu'elles se différencient des souches des mers tropicales (Jousson *et al.*, 1998). L'historique de l'espèce dans le circuit aquariophile européen a été reconstitué (sur la base d'une enquête dans ce milieu ; Meyer & Meinesz, 2001) et la première mention d'une souche vigoureuse et résistante au froid peut être datée à 1975. Il a été montré par de nouvelles études génétiques (Fama *et al.*, 2002, Wiedenmann *et al.*, 2001), que la souche aquariologique envahissante provient du sud-est de l'Australie, une région que l'on nomme la "Méditerranée australienne" (Phillips & Price, 2002).

Observée pour la première fois en Méditerranée en 1984, à Monaco, *Caulerpa taxifolia* a été trouvée en 1990 dans les Alpes-Maritimes, à Roquebrune-Cap Martin, puis dans le Var, à Toulon. Son expansion devient alors rapide. En 1991, elle est signalée dans plusieurs nouveaux sites des Alpes-Maritimes, du Var et des Pyrénées-Orientales, à la frontière espagnole. En 1992, alors que de nouvelles stations sont découvertes en France, elle est observée pour la première fois en Italie (Impéria en Ligurie et Livourne en Toscane), et en Espagne, aux Baléares (Majorque).

En 1993, *Caulerpa taxifolia* est signalée en Sicile (Messine), à l'île d'Elbe (Toscane), et de nouvelles stations sont découvertes en Ligurie italienne et sur la Côte d'Azur française. En janvier 1994, *C. taxifolia* est signalée pour la première fois en mer Adriatique, en Croatie. En mars 2000, *C. taxifolia* atteint les côtes méridionales de la Méditerranée : elle est signalée devant Sousse (Tunisie ; Meinesz *et al.*, 2001a).

Tableau I. Situation de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée (d'après Meinesz *et al.*, 2001a, valeurs arrondies). A = surface concernée en ha (cf. encadré) ; C = nombre de colonies (n) ; L = linéaire de côte concernée (km) ; - = donnée non disponible.

Année	Espagne			France & Monaco			Italie			Croatie			Tunisie			Total		
	A ha	C n	L km	A ha	C n	L km	A ha	C n	L km	A ha	C n	L km	A ha	C n	L Km	A ha	C n	L km
1989	-	-	-	1	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0
1991	-	-	-	30	9	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	9	4
1994	2	1	0	1 383	13	22	153	9	8.9	-	-	-	-	-	-	1 538	23	31
1997	30	2	3	1 882	52	34	2 704	17	44	13	8	2	-	-	-	4 629	79	82
2000	63	4	9	3 184	76	71	9 415	14	104	41	8	5	350	1	2	13 053	103	191

Le système de suivi de l'expansion spatiale, la cartographie et la standardisation de la représentation cartographique de *C. taxifolia*.

Depuis 1990, un suivi cartographique de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* est réalisé par le LEML. Ce système a été étendu à l'ensemble des pays concernés dans le cadre des programmes européens *Caulerpa* Life I et *Caulerpa* Life II. Il s'appuie sur le suivi de l'expansion, mesuré sur le terrain, en plongée, des colonies déjà connues et sur la validation des nouvelles colonies déclarées aux laboratoires (aujourd'hui, en France, dans le cadre de l'Observatoire sur l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée) par le biais des campagnes de sensibilisation (§ 4.3). Des campagnes de prospections actives ont également été réalisées dans les secteurs considérés comme sensibles (côtes de la région catalane, côtes de la région de Valencia, côte des Baléares, côtes de la Corse, sites remarquables de Tunisie, zones de mouillage du PNPC) et des prospections cartographiques en profondeur ont été réalisées en Ligurie française et Italienne (cf. pour une revue Boudouresque *et al.*, 2002 ; Gravez *et al.*, 1999b). L'importante dynamique créée pour le suivi cartographique de *Caulerpa taxifolia* a conduit à la

standardisation de la définition des différents stades de colonisation et de leur représentation cartographique (Vaugelas de *et al.*, 1999). Sont notamment différenciées pour plus de précision dans les comptes-rendus les « surfaces couvertes », les « surfaces atteintes », les « surfaces concernées » et les niveaux I, II et III de colonisation. L'ensemble de ces travaux est intégré à un SIG et donne lieu à la publication annuelle d'atlas de l'expansion (§ 4.3). Récemment, la souche envahissante de *C. racemosa* a été intégrée à cet effort de suivi cartographique. La fiabilité et la précision de cet outil sont discutées plus loin.



Figure 5. Situation de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée (situation fin 2000), d'après Meinesz *et al.*, 2001a. Pour une situation à jour voir le site Caulerpa On Line <http://www.caulerpa.org>

Six pays sont actuellement concernés par ce phénomène (Monaco, la France, l'Espagne, l'Italie la Croatie et la Tunisie ; Fig. 5) et il est possible que des colonies n'aient pas encore été découvertes. A ce jour, la Corse et l'Espagne continentale ne semblent pas encore atteintes par *C. taxifolia*, en revanche *C. racemosa* y est présente (cf encadré).

La surface concernée par la souche aquariologique de *Caulerpa taxifolia* était de l'ordre de 1m² en 1984. Fin 2001, elle est estimée, en Méditerranée, à 13 000 ha s'étendant sur 180 km de côtes (Meinesz *et al.*, 2001a ; Tabl. I). Dix-sept ans après son introduction en Méditerranée, plus de 90% des surfaces colonisées se trouvent toujours concentrées le long de 500 km de côte entre Toulon (France) et Gênes (Italie) autour de la zone de sa première observation. En France, dans les régions les plus anciennement colonisées (entre Villefranche-sur-Mer et Menton) l'espèce a atteint son expansion maximale en profondeur et ne semble guère pouvoir continuer à progresser. En revanche, sur tous les autres sites, les colonies de *C. taxifolia* continuent de s'étendre. Une exception toutefois ; la colonie de *C. taxifolia* de Porto Petro (environ 30 ha), aux Baléares, a soudainement disparu au cours de l'année 2000 (A. Grau et M. Garcia comm. Pers.)⁶ sans qu'il n'y ait encore d'explication claire à ce phénomène. Fin 2004, la surface concernée par *C. taxifolia* atteignait 8 687 ha sur les côtes méditerranéennes françaises (Javel *et al.*, 2005), soit une augmentation de 22 % par rapport à 2003.

6. L'événement est relaté sur le site de Masmar - (http://www.masmar.com/articulos/art/46_1162_1.html). Aucune repousse n'a été découverte dans ce site depuis cette date. Un suivi est réalisé par l'équipe du Dr E. Ballesteros (Centro de Estudio Avanzados de Blanes, Girona, Espagne) et une publication est en cours.

Californie

En juin 2000, *Caulerpa taxifolia* a été découverte lors d'une étude sur des herbiers de *Zostera marina*, dans une lagune côtière artificielle de 102 ha (Fig. 6-7), à Carlsbad dans le comté de San Diego (Californie, USA). La colonie s'y étendait alors sur une surface de 1 050 m².

Peu après, et grâce notamment à la couverture médiatique qui a suivi cette découverte, une autre station à *C. taxifolia* est découverte, fin juillet 2000, dans deux petites lagunes artificielles de 1,2 ha, dans le port de Huntington Harbour (comté d'Orange) à une centaine de kilomètres au nord de Carlsbad. L'espèce y était alors présente sous la forme de 3 taches principales de plusieurs mètres de diamètre et de quelques taches satellites implantées dans des herbiers de *Ruppia maritima* (Williams & Grosholz, 2002).

Ces introductions sont considérées comme étant issues de rejets d'aquariums probablement intervenus entre 1996 et 1998. De fait, 10% des 55 magasins d'aquariophilie échantillonnés en Californie du Sud proposent la souche aquariologique méditerranéenne de *C. taxifolia* à la vente, ainsi que 15 autres espèces de *Caulerpa*, dont *C. racemosa* (Frisch & Murray, 2002). Des études génétiques ont montré que les *C. taxifolia* rencontrées dans ces sites californiens correspondaient bien à la souche aquariologique présente en Méditerranée (Jousson *et al.*, 2000).

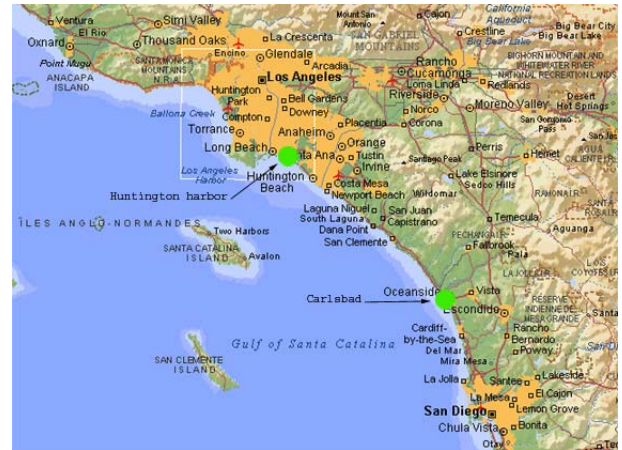


Figure 6. Localisation des colonies de *C. taxifolia* en Californie (flèches et points verts).

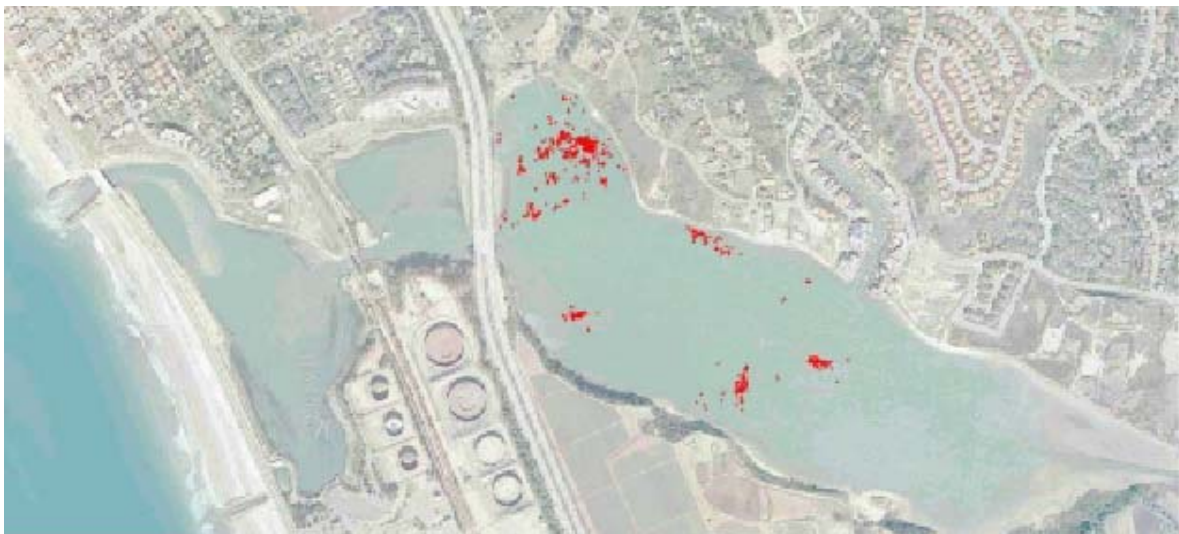


Figure 7. La lagune de Agua Hedoncia (Carlsbad, Californie, San Diego County). Photographie aérienne verticale sans échelle. En rouge, distribution cumulée de *C. taxifolia* entre juin 2000-septembre 2002. Source Henkel & Associates pour le SCCAT.

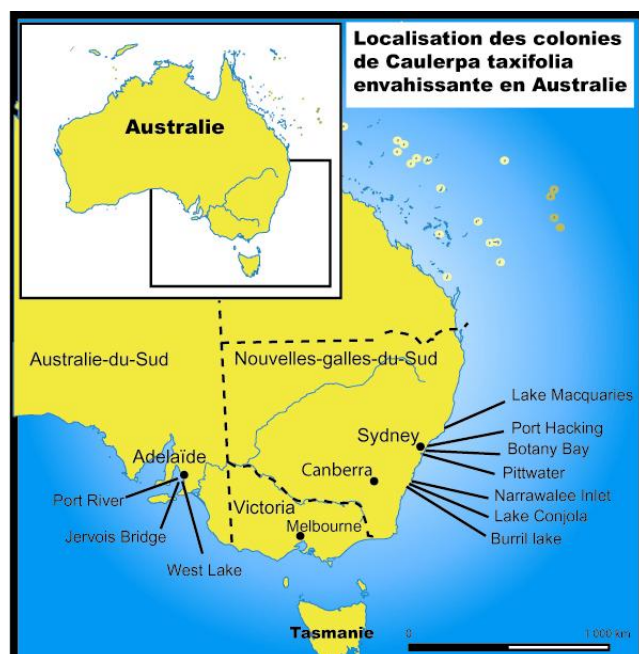
A la suite de ces découvertes, un groupement d'agences fédérales, locales et d'organismes privés mettent en place le *Southern California Caulerpa Action Team* (SCCAT) avec comme objectif le contrôle, l'éradication et la surveillance de *Caulerpa taxifolia*⁸. En avril 2003, après plusieurs opérations de contrôle, les dernières prospections sur le site de Carlsbad n'ont pas permis la découverte de nouvelle colonie de *C. taxifolia*, ce qui était considéré comme encourageant par le SCCAT⁹. Le second site colonisé, dans le comté d'Orange serait également en cours de contrôle (§ 3.2)

7. http://swr_nmfs.noaa.gov/hcd/caulerad.htm - Southwest Regional Office of the National Marine Fisheries Service.

8. http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb9/News/Caulerpa_taxifolia/Caulerpa_taxifolia.html

9. <http://www.calcoast.org/news/wetlands041803a.html> : California Coastal Coalition.

Australie



Caulerpa taxifolia est une espèce native dans les régions sub-tropicales d'Australie (Fig. 2). Toutefois, à partir d'avril 2000, une colonie de 2 ha a été signalée à Port Hacking (au sud de Sydney, Nouvelles galles du Sud) dans une zone relativement éloignée de la zone connue de répartition naturelle de l'espèce. De nouvelles implantations ont ensuite été signalées dans le lac Conjola, à Pittwater, dans le lac Macquaries, au lac Burrill, à Botany Bay puis Narrally Inlet (Fig. 8 ; Tabl. II)^{10,11}.

Figure 8. Localisation des peuplements de *C. taxifolia* envahissants en Australie.

Tableau II. Nouvelles implantations de *Caulerpa taxifolia* en Nouvelles-Galles-du-Sud (Australie), toponymie des sites, coordonnées géographiques, dates de première signalisation et surfaces approximatives couvertes.

Site	Lat (S)	Long (E)	1 ^{ère} signalisation	Surface couverte	Autres noms utilisés
Lake Macquaries	33.03	151.36	Feb 2001	9 ha	
Pittwater*/n1	33.36	151.19	Dec. 2000	<0.5 ha	Careel bay
Botany bay	34.00	151.11	March 2001	<0.5 ha	Quibray Bay
Port Hacking**/n1	34.03	151.08	April 2000	4 ha	
Lake Conjola/n2	35.17	150.28	April 2000	>10 ha	Jarvis bay
Narrawallee Inlet	35.17	150.29	May 2001	<0.5 ha	
Burrill lake	35.21	150.26	April 2001	<0.5 ha	

Données issues de Coastal Council of NSW 2001 annual report. Coordonnées géographiques (DD MM) issues de Geoscience Australia¹. * 400 m², ** 2 ha selon Millar & Talbot (2002). N1= probablement native (selon Schaffelke *et al.*, 2002), n2 = probablement native (selon Murphy & Schaffelke, 2003).

Dans toutes ces nouvelles stations, l'espèce pousse dans des estuaires, à faible profondeur (1,10 m de profondeur) dans les herbiers de *Posidonia australis* qu'elle recouvre (Millar & Talbot, 2002). Comme pour la souche aquariologique méditerranéenne, elle se montre vigoureuse et tolérante à de faibles températures (10°C). Cependant, bien que cela ne soit pas encore déterminé pour toutes ces nouvelles colonies, il apparaît que les individus présents à Port Hacking, Pittwater et Lake Conjola ne sont pas apparentés à la souche aquariophile méditerranéenne (Schaffelke *et al.*, 2002 ; Murphy & Schaffelke, 2003). Ils n'en sont pas moins considérés comme constituant une espèce envahissante.

En 2002, trois nouvelles signalisations ont été faites en Australie du Sud, près de la ville d'Adélaïde à Port River (3 ha), Jervois Bridge et dans le West Lakes (Murphy & Schaffelke, 2003 ; Fig. 8)¹². En juin 2002, l'espèce couvrait les ¾ de la surface du West Lake¹³.

10. <http://www.fisheries.nsw.gov.au/conservation/aquahab/Caulerpa.htm> - New South Wales Fisheries website.

11. http://www.coastalcouncil.nsw.gov.au/documents/annrep00-01/PartA_00-01_Low_Res.PDF - Coastal Council of NSW annual report - 2001

12. Le *Marine & Coastal Community Network* souligne le fait inquiétant que l'espèce, pourtant déjà identifiée en Australie comme espèce à risque (§ 0) avait en fait été collectée et identifiée dans ce site dès décembre 2000 par le *State Herbarium* sans que cela soit signalé à la communauté scientifique ou aux autorités (<http://www.mccn.org.au/sa/default.asp?page=projectitem&projectid=-3>).

13. <http://www.pir.sa.gov.au/dhtml/ss/section.php?sectID=1373&templD=3> - The Primary Industries & Resources of South Australia (PIRSA) showcase.

Les connaissances sur l'expansion spatiale sont-elles suffisamment précises ?

Les connaissances de l'expansion sont-elle suffisamment précises et peut-on considérer que la grande majorité des stations est connue ? En ce qui concerne *C. taxifolia*, les zones actuellement colonisées sont généralement des secteurs fortement fréquentés par la navigation de pêche ou de plaisance ou par les plongeurs et apnéistes qui assurent de fait un maillage serré d'observations. La faible surface des colonies, lors de leur première signalisation, témoigne de leur découverte précoce. On observe d'ailleurs que les missions de prospection systématiques de portions importantes de côte n'ont permis la découverte que d'un nombre insignifiant de nouvelles stations (Gravez *et al.*, 1999b). Enfin, il a été vérifié que la dissémination naturelle de *C. taxifolia* ne lui permettait qu'un faible rayon de dispersion et que les colonies issues de la fragmentation d'une colonie mère se trouvent donc dans un proche rayon. Les disséminations d'origines anthropiques sont, elles, retrouvées dans les zones de mouillages forains, les ports et autour des zones de pêche colonisées par cette algue. Au total, pour *C. taxifolia*, s'il est probable que des stations aient échappé aux observations des usagers de la mer et à la prospection active, leur découverte nécessiterait des moyens humains et financiers sans commune mesure avec les résultats prévisibles. En ce qui concerne *C. racemosa*, la situation est bien différente. Outre sa capacité à se disséminer par le biais de boutures, l'émission de zygotes issus de sa reproduction sexuée explique la vitesse de sa dissémination à travers la Méditerranée. L'absence, contrairement à *C. taxifolia*, de pattern simple de dissémination de ses propagules empêche, en grande partie, la systématisation de sa recherche. Il est certain que de nombreuses colonies de *C. racemosa* continueront à être signalées par les usagers et on peut s'attendre à ce que les moyens mis à disposition, pour valider les signalisations et réaliser la cartographie, atteignent rapidement un stade critique à l'échelle méditerranéenne, c'est à dire insuffisant.

Ces stations de Nouvelles-Galles-du-Sud et d'Australie du sud ne sont généralement pas considérées comme étant des extensions naturelles de la distribution de l'espèce native de *C. taxifolia* enregistrée à Moreton Bay au sud du Queensland et Lord Howe Island (Murphy & Schaffelke, 2003). L'espèce est mentionnée comme (« possible introduction to Australia ») dans la base de données du National Introduced Marine Pest Information System du CSIRO¹⁴. L'origine suspectée de l'introduction serait un rejet d'aquarium qui aurait eu lieu vers 1996¹⁵.

Dans la plupart de ces sites, des opérations de contrôle, parfois de grande envergure, sont réalisées ou planifiées (§ 3.2).

2.3. Expansion de *C. racemosa* en Méditerranée

La forme envahissante de *Caulerpa racemosa* a été signalée pour la première fois au début des années 1990, dans le sud de la Méditerranée orientale, en Libye (Nizamuddin, 1991).

Les travaux taxonomiques et génétiques réalisés par Verlaque *et al.* (2000) et Durand *et al.* (2002) ont démontré que cette souche de *C. racemosa* est bien différente des deux variétés (*Caulerpa racemosa* var. *turbinata-uvifera* et *C. racemosa* var. *lamourouxii*) qui étaient déjà connues du bassin oriental de Méditerranée (Tunisie, Moyen-Orient). Elle a par la suite été formellement identifiée, grâce à ses particularités morphologiques et génétiques, à une variété connue des mers tempérées du Sud-Ouest de l'Australie, *C. racemosa* var. *cylindracea* (Verlaque *et al.*, 2000).

Par ailleurs, les études génétiques de Durand *et al.* (2002) montrent que cette variété envahissante pourrait être un **hybride** "récent" (à l'échelle des temps géologiques) entre *Caulerpa racemosa* var. *turbinata-uvifera* et une autre souche encore non identifiée¹⁶. La « vigueur hybride » (ou hétérosis) parfois développée par les hybrides pourrait expliquer la remarquable vigueur de *C. racemosa* var. *cylindracea* en Méditerranée.

14. <http://crimp.marine.csiro.au/nimpis/Default.htm> - National Introduced Marine Pest Information System du CSIRO. Nb les bases de données de ce site ne semblent pas tenues à jour ; elles ne mentionnent toujours pas, mi-2003 les découvertes de *C. taxifolia* en Australie du Sud.

15. <http://www.pir.sa.gov.au>

16. Peut être issue d' Australie de l'Ouest.



Figure 9. Localisation des stations connues de la souche envahissante de *Caulerpa racemosa* en Méditerranée (situation fin 2000), d'après Verlaque *et al.*, 2000 (redessiné).

Dès le début des années 1990s, l'expansion de *C. racemosa* var. *cylindracea* est rapide ; elle est signalée en Italie, en Sicile et à l'île de Lampedusa, en Grèce, en Turquie, en Sardaigne aux îles Baléares et à Chypre (cf. Verlaque *et al.*, 2000 pour une revue ; Fig. 9).

En 1997, grâce aux brochures de sensibilisation sur *Caulerpa taxifolia* distribuées aux usagers de la mer, une première colonie est découverte devant le port de Marseille. Depuis, plusieurs autres colonies ont été découvertes et validées dans le golfe de Marseille et sur le littoral de la région PACA, dans les Alpes-Maritimes, le Var, les Bouches-du-Rhône et la Corse.

Actuellement, ce sont 103 sites qui sont recensés sur le site de *Caulerpa* On Line¹⁷ et 11 pays méditerranéens qui sont concernés par le phénomène (Chypre, Egypte, Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Liban, Syrie, Tunisie, Turquie ; Piazzini *et al.*, 2005 ; Fig. 9)

La fréquence des découvertes récentes, leur distance par rapport aux colonies anciennement connues de Méditerranée orientale et la taille de ces nouvelles colonies indiquent bien une phase d'expansion extrêmement rapide de l'aire de répartition de cette variété en Méditerranée. Cette vitesse d'expansion, beaucoup plus rapide que celle de *C. taxifolia*, s'explique sans doute par le fait que, contrairement à cette dernière, *C. racemosa* var. *cylindracea* se reproduit de façon sexuée en Méditerranée.

3. Les enjeux de l'expansion des espèces de *Caulerpa* envahissantes

3.1. Impact sur l'environnement

L'impact de la colonisation des fonds marins par *Caulerpa taxifolia* et *C. racemosa* var. *cylindracea* (dans la suite de l'exposé, sauf indication contraire, "*C. racemosa*" se référera toujours à cette variété) a essentiellement été étudié en Méditerranée où ce phénomène est plus ancien. Pour la Californie et l'Australie, les données scientifiques sont encore très fragmentaires.

17. <http://www.Caulerpa.org> - le site *Caulerpa* on Line, est développé par le Laboratoire Environnement Marin Littoral de l'Université de Nice (LEML-UNSA), dirigé par le Prof. A. Meinesz, dans le cadre de l'Observatoire sur l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée, du "Plan d'Action Interministériel sur *Caulerpa taxifolia*".

Lorsque *C. taxifolia* et *C. racemosa* s'implantent sur les fonds marins, leurs axes rampants et leurs rhizoïdes tissent rapidement une couverture compacte qui piège les sédiments et stoppe la lumière. Le substrat devient peu à peu inaccessible aux autres organismes fixés, et en particulier aux autres macrophytes (Verlaque & Fritayre, 1994 ; Piazzi *et al.*, 2001b). Une prairie monotone et pauci-spécifique (pauvre en espèces) peut ainsi remplacer la vingtaine de communautés et de faciès dominés par des macrophytes existant généralement dans les petits fonds méditerranéens.

Dans l'hypothèse où l'expansion de ces *Caulerpa* en Méditerranée se poursuit, il ne peut être exclu qu'un certain nombre d'espèces de macrophytes de l'étage infralittoral (étage qui s'étend généralement de la surface à 30-40 m de profondeur et qui héberge la majeure partie de la biodiversité végétale) soit menacées de disparition à long terme : c'est le cas en particulier de plusieurs espèces du genre *Cystoseira* (espèces protégées par les Conventions de Berne et de Barcelone ; Boudouresque *et al.*, 1996b).

Pour les invertébrés, il a été observé (Bellan-Santini, 1995) que la petite faune qui vit dans les peuplements infralittoraux dominés par des macrophytes est fortement modifiée par l'installation de *Caulerpa taxifolia* et la disparition du peuplement végétal originel ; les observations réalisées sur quelques groupes d'animaux en Méditerranée (les Mollusques, les Crustacés Amphipodes et les Vers Polychètes) montrent que leurs populations y sont en général plus ou moins fortement réduites, en nombre d'individus comme en nombre d'espèces, par rapport aux peuplements de référence (peuplements indigènes ; Fig. 11). Il en va de même pour l'oursin comestible *Paracentrotus lividus* qui peut disparaître presque totalement des prairies denses de *C. taxifolia* (Ruitton & Boudouresque, 1994).



Figure 10. Un front entre la Magnoliophyte *Posidonia oceanica* et *Caulerpa taxifolia*. Photographie P. Francour ©.

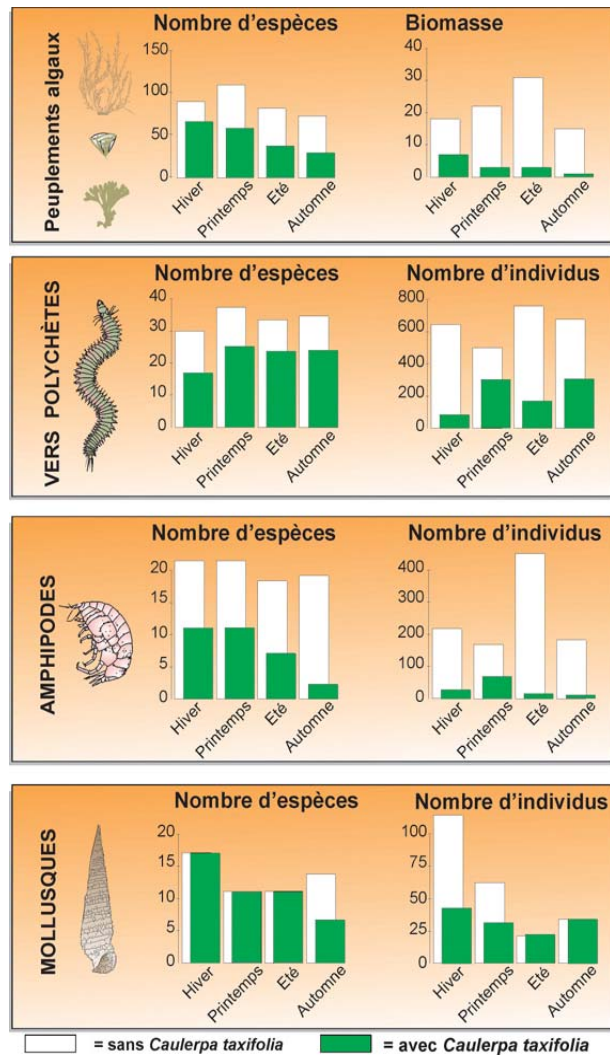
Ces deux espèces de *Caulerpa* envahissantes pénètrent également l'herbier à *Posidonia oceanica* (Magnoliophytes¹⁸ ; Fig. 10), l'un des écosystèmes les plus importants de Méditerranée¹⁹. Leur installation y est toutefois moins rapide que dans les peuplements dominés par d'autres macrophytes (Rhodobiontes et Chromobiontes). Elles ne semblent coloniser que les zones les plus clairsemées de l'herbier et ne s'implantent que sporadiquement au sein de l'herbier dense (Villèle & Verlaque, 1995 ; Meinesz *et al.*, 1993b ; Ceccherelli *et al.*, 2001b).

La compétition de ces deux espèces avec *P. oceanica* semble faire intervenir différents mécanismes, physiques, chimiques (**allélopathie**), et biologiques (*shifting* des espèces herbivores comme l'oursin *P. lividus* induisant un surpâturage). Dumay *et al.* (2002a) montrent que la colonisation des herbiers à *Posidonia oceanica* par les deux espèces envahissantes de *Caulerpa* induit une augmentation des paramètres biométriques de la Magnoliophyte qui présente ainsi une production primaire supérieure. La compétition entre *Posidonia oceanica* et *Caulerpa taxifolia* semble se traduire notamment, pour la première, par la production de composés phénoliques, traduisant le stress dû à la compétition (Villèle & Verlaque, 1995 ; Cuny *et al.*, 1995), et pour la seconde par une augmentation de la taille de ses frondes au détriment de la synthèse de Caulerpénine (§ 2.1) (Ceccherelli & Cinelli, 1999 ; Dumay *et al.*, 2002b).

18. Les Magnoliophytes étaient autrefois désignées sous le nom de "Phanérogames".

19. *P. oceanica* ou les herbiers qu'elle forme sont protégées à ce titre dans de nombreux pays Méditerranéens, par la directive « habitat », par des conventions internationales et par des textes législatifs nationaux.

Figure 11. Impact de la colonisation par *Caulerpa taxifolia* sur la biodiversité de différents groupes de la flore et de la faune (invertébrés) sous-marine, dans des zones de référence et des zones colonisées par *C. taxifolia*, au cours d'un cycle annuel. Les résultats sont présentés en nombre d'espèces et en nombre moyen d'individus (ou en biomasse), pour chaque groupe dans des relevés de 400 cm². On observe que la richesse en espèces, comme l'abondance (ou la biomasse pour les peuplements végétaux) de ces espèces sont, à l'exception des mollusques, beaucoup plus faibles dans les peuplements de *C. taxifolia* que dans les peuplements de référence (sans *C. taxifolia*). D'après les données de Verlaque & Fritayre (1994) et Bellan-Santini (1995), redessiné.



Si des exemples de régressions localisées d'herbiers à *P. oceanica* peuvent être, au moins partiellement, liés à la compétition avec *C. taxifolia* (Ruitton *et al.*, 2001), on ne connaît pas d'exemple d'herbier ayant totalement disparu en raison de la compétition avec l'une de ces *Caulerpa*.

La présence de peuplements de *C. taxifolia* ne semble pas constituer une gêne pour les peuplements d'une autre Magnoliophyte, *Cymodocea nodosa*; au contraire les deux espèces semblent profiter mutuellement l'une de l'autre (Ceccherelli & Sechi, 2002). Par contre, colonisée par *C. racemosa*, *Cymodocea nodosa* présente une diminution de la densité de ses rhizomes et une augmentation de sa floraison (Ceccherelli & Campo, 2002). Pour une autre Magnoliophyte méditerranéenne, *Zostera noltii*,

la colonisation par *C. racemosa* se traduit par l'accroissement de sa densité et du nombre de faisceaux fertiles (Ceccherelli & Campo, 2002). L'accroissement de l'effort de reproduction constitue, chez les Magnoliophytes, une réponse classique en situation de stress. Ainsi, les effets de chacune de ces *Caulerpa* envahissantes ne semblent pas se traduire par une réponse unique de la part des peuplements de la Magnoliophyte concernée.

En Californie, *C. taxifolia* entre en compétition avec deux espèces de Magnoliophytes (protégées aux USA par le *Clean Water Act*); *Zostera marina* à Agua Hedonidia (R. Woodfield comm. pers. In Williams & Grosholz, 2002) et *Ruppia maritima* dans la lagune de Huntington Harbor. Pour cette dernière, Williams & Grosholz (2002) mettent en évidence une chute de biomasse de ces herbiers d'un facteur 20 lorsqu'ils sont colonisée par *C. taxifolia*. Pour *Z. marina*, S. Williams considère que la faible diversité génétique de cette espèce dans ces sites la fragiliserait particulièrement face à cette compétition²⁰.

En Nouvelles-Galles-du-Sud (Australie), *C. taxifolia* pousse dans les herbiers de *Posidonia australis* (espèce protégée par le *Native Vegetation Act 1992*) et tend à les recouvrir (Millar & Talbot, 2002) sans que l'on connaisse encore l'issue de cette compétition.

Il est intéressant de noter que, en Méditerranée, des expérimentations sur la compétition entre les deux espèces envahissantes de *Caulerpa* soulignent les fortes interactions issues de telles compétitions (accroissement de la taille et de la densité des peuplements pour chacune des espèces). Bien que de plus petite taille, Piazzi & Ceccherelli (2002) estiment que *C. racemosa* est la meilleure compétitrice des deux.

20. S. Williams web page, <http://www.serg.sdsu.edu/CMI/swilliam/swilliam.htm#Williams1996b>

Pour les peuplements de poissons benthiques littoraux, l'impact de la colonisation des fonds par *C. taxifolia* et *C. racemosa* se traduit de deux manières différentes selon la structure initiale du substrat colonisé (Harmelin-Vivien *et al.*, 1999, 2001 ; Relini *et al.*, 1998, 2001b) :

- Une diminution générale de la richesse spécifique (-31 à -57%), de la densité et de la biomasse (-42 à -57%) dans les sites possédant une complexité structurale élevée. Si les populations de certaines espèces de ces milieux se montrent plus sensibles que d'autres aux modifications opérées par la colonisation (Fig. 12) ; l'ensemble ne se traduit toutefois pas par une altération totale de la composition spécifique du peuplement initial (Fig. 13).
- Une augmentation de la richesse spécifique et de la densité du peuplement dans les zones à faible complexité structurale initiale (telles que les fonds de sables ou d'herbiers clairsemés à *Cymodocea nodosa*). Cette modification se traduit par une altération profonde du peuplement initial avec la disparition d'espèces associées aux fonds meubles (dont de nombreuses espèces d'intérêt commercial ; Relini *et al.*, 2001a et b ; § 2.1) et l'installation d'espèces généralement associées aux herbiers de Magnoliophytes.

Figure 12. Variation de la densité du poisson *Serranus cabrilla* en réponse à la colonisation d'un site par *C. taxifolia*. On observe la chute de sa densité lorsque la couverture des fonds par *C. taxifolia* dépasse les 30-40% (d'après Harmelin-Vivien *et al.*, 2001, redessiné).

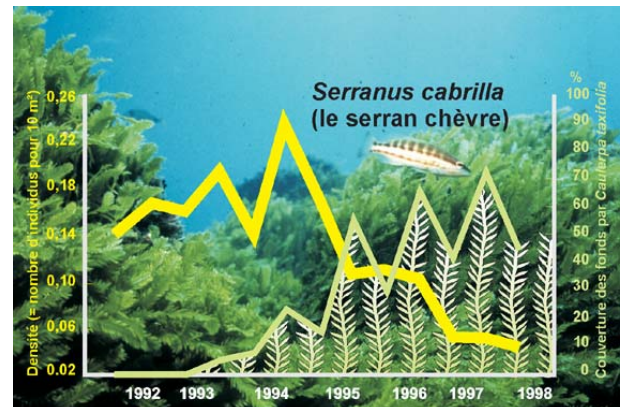
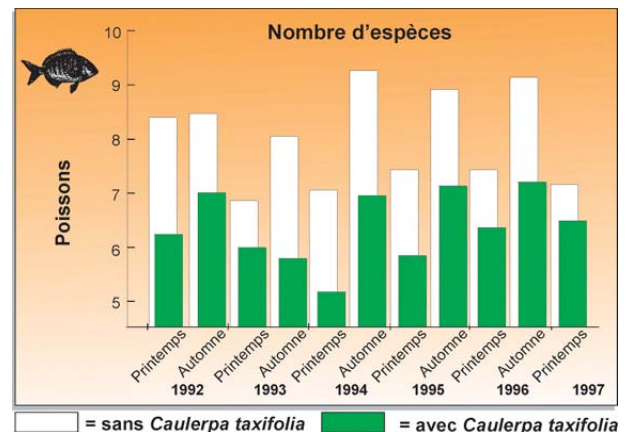


Figure 13. Comparaison du nombre moyen d'espèces de poissons par transect dans les sites colonisés par *C. taxifolia* (en vert) et les sites de référence (*i.e.* non colonisés) entre 1992 et 1997. Toutes les différences sont statistiquement significatives (d'après Harmelin-Vivien *et al.*, 1999, redessiné).



Ces observations montrent que la colonisation et l'homogénéisation de ces milieux (Fig. 14) induit une modification profonde des peuplements et le cas échéant une diminution globale de leur écodiversité. D'une manière générale, on observe une uniformisation des peuplements de poissons, et donc une diminution de la diversité spécifique gamma²¹.

Les fonds sédimentaires sans végétation sont également un milieu propice à la colonisation par *C. taxifolia* et *C. racemosa*. Leur implantation peut provoquer de profondes modifications des caractéristiques physico-chimiques et biotiques du substrat : envasement, enrichissement en matière organique, établissement de conditions anoxiques (pénurie en oxygène) avec comme conséquence une modification de la faune

21. La diversité spécifique est décrite par la point diversité (nombre d'espèce dans un échantillon représentatif d'un peuplement), la diversité alpha (nombre d'espèce dans un habitat d'une région donnée), la diversité bêta (renouvellement des espèces entre habitats d'une région donnée), la diversité gamma (nombre d'espèces dans une région donnée, tous habitats confondus) et la diversité gamma (nombre d'espèces dans une province biogéographique, par exemple la Méditerranée). Une espèce introduite telle que *Caulerpa taxifolia* peut diminuer la diversité alpha d'un habitat (par exemple dans les forêts à *Cystoseira*) ou l'augmenter (par exemple sur les fonds de sable). En revanche, l'homogénéisation des habitats provoque toujours une diminution drastique de la diversité gamma.

endogée (c'est à dire de la faune qui vit dans le substrat ; Poizat & Boudouresque, 1996 ; Argyrou *et al.*, 1999).

Plus en profondeur, les premières observations réalisées en Méditerranée sur les peuplements du coralligène (peuplements à Rhodobiontes calcaires, sur lesquels sont fixées les grandes formes d'invertébrés coloniaux telles que les gorgones et le corail rouge) semblent également indiquer qu'il puisse y avoir un impact, bien qu'aucune étude ne l'ait démontré pour le moment.

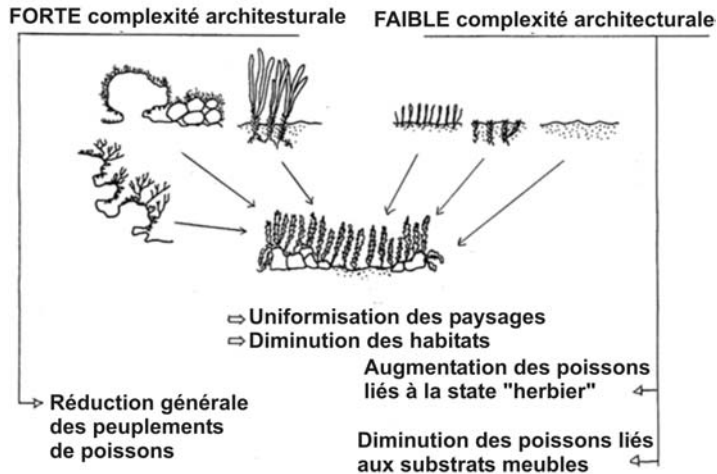


Figure 14. Schématisation des modifications structurales induites par la colonisation par *C. taxifolia* dans les principaux types d'habitats côtiers de Méditerranée. La colonisation des substrats par *C. taxifolia* aboutit à une homogénéisation de la diversité des macrohabitats, facteur déterminant pour les espèces benthiques (d'après Harmelin-Vivien *et al.*, 1999).

On peut prévoir que l'impact sur la faune sera amplifiée, à long terme, par la poursuite de la colonisation, avec des modifications telles que la réduction des ressources pour les espèces herbivores, et donc indirectement les espèces carnivores, ou encore la perte des habitats et des abris. Par ailleurs, les zones colonisées étant encore ponctuelles, à l'échelle de la Méditerranée, l'approvisionnement en recrues des zones colonisées peut se faire en partie à partir des zones adjacentes non encore colonisées. Si l'expansion de *C. taxifolia* se poursuit, il est possible que la diminution des sources de recrues accentue l'impact sur la diversité spécifique des zones colonisées.

Le succès compétitif de ces espèces de *Caulerpa* vis-à-vis des espèces indigènes est sans doute dû à la densité des peuplements qu'elles établissent, à leur vitesse de croissance, aux changements physico-chimiques et biotiques qu'elles induisent, mais également aux substances chimiques qu'elles synthétisent (§ 2.1). En effet, la caulerpényne, toxine majoritairement produite, présente des effets antiviraux, antifongiques, cytotoxiques, ichtyotoxiques et répulsifs ; elle inhibe en particulier le développement des oeufs d'oursins (Pedrotti *et al.*, 1996 ; Pesando *et al.*, 1996).

Les études menées *in vitro* ont permis de démontrer que la caulerpényne peut se diffuser en petites proportions dans l'eau de mer (la caulerpényne n'est pas hydrosoluble) et contaminer ainsi l'eau entourant les prairies denses de *C. taxifolia*. Elle est ensuite rapidement dégradée sous l'effet de la lumière, en présence d'oxygène et de chlorophylle, pour donner naissance à une famille de composés qui, toutefois, présentent encore une certaine toxicité (sur les oeufs d'oursins en particulier ; Amade *et al.*, 2001).

Les souches de bactéries marines présentent également des sensibilités différentes aux toxines synthétisées par *Caulerpa taxifolia*. En milieu naturel, en Méditerranée, une sélection en faveur des populations de bactéries gram-négatives a été montrée dans les zones fortement colonisées par *C. taxifolia*. Une modification des populations bactériennes, base de la chaîne alimentaire, dans ces milieux naturels pourrait avoir des répercussions indirectes importantes sur l'ensemble de la chaîne alimentaire.

Pour le moment, aucun risque potentiel de toxicité pour l'homme n'a été démontré. Aucune accumulation des toxines le long de la chaîne alimentaire n'a été mise en évidence dans les secteurs fortement colonisés par *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. Dans cette mer, les espèces herbivores sont rares et celles consommées par l'homme, essentiellement la saupe *Sarpa salpa* et l'oursin comestible *Paracentrotus lividus*, évitent *C. taxifolia* et ne la consomment, dans tous les cas, qu'à la saison où celle-ci présente une faible concentration en toxines. En ce qui concerne *C. racemosa*, des travaux récents montrent une consommation de *C. racemosa* par les Saupes et les oursins (Ruitton *et al.*, sous presse). Là encore, aucun risque de toxicité pour l'homme n'a été mis en évidence. Enfin, si certaines espèces de Caulerpes sont recherchées en Asie pour leur consommation comme condiments (*Caulerpa lentilifera*), ce n'est pas le cas

des espèces rencontrées en Méditerranée ce qui exclut, *a priori*, les risques d'intoxication directe par ingestion.

3.2. Impacts sociaux, économiques et culturels

Dans les zones fortement colonisées de Ligurie française et italienne et de la Toscane, certains pêcheurs attribuent aux peuplements de *C. taxifolia* et de *C. racemosa* une diminution de la ressource et donc de leur prises (jusqu'à -50% selon les déclarations ; Cottalorda *et al.*, 1997 ; Gravez *et al.*, 1999b ; Bec *et al.*, 2002 ; Boudouresque, 2002). Le colmatage des fonds rocheux par ces deux espèces envahissantes et donc la perte d'abris pour les poissons des petits fonds pourrait être à l'origine de cette baisse des prises (§ 3.1). Dans des zones de Ligurie italienne, dans des secteurs d'herbiers à *Cymodocea nodosa* colonisés par *C. taxifolia*, à l'inverse, le nombre et la taille des espèces prises augmentent, mais les types de poissons pris sont de nature différente et de moindre valeur marchande (Relini *et al.*, 2001b).

Les filets calés dans les secteurs densément colonisés par les deux *Caulerpa* se chargent de fragments de frondes et perdent ainsi de leur efficacité : les poissons les voient et peuvent ainsi les éviter (Relini *et al.*, 2001b ; Magri *et al.*, 2001 ; Bec *et al.*, 2002 ; Boudouresque, 2002). Ils sont, en outre, rendus plus lourds à manipuler et leur nettoyage manuel, avec parfois nécessité d'un trempage, est rendu plus long, plus difficile et réduit leur durée de vie (Fig. 15). Enfin, le temps nécessaire à ces manipulations réduit d'autant les temps effectifs de pêche.

Dans les zones concernées par ce phénomène, on assiste à une stratégie d'ajustement des moyens de production de la part des patrons pêcheurs. Ainsi, certains pêcheurs déclarent avoir été obligés d'investir dans l'achat de plusieurs jeux de filets, utilisés par rotation, afin d'augmenter leur temps de pêche ou d'adapter leurs techniques de pêche à des secteurs plus profonds ou plus éloignés des zones colonisées. Pour la prud'homie de Menton-Cap Martin (7 patrons pêcheur), Bec *et al.* (2002) évaluent un surcoût de travail et de fonctionnement équivalent à 1 430-3 890 €.an⁻¹ et un surcoût de 2 200-3 300 € en investissement en filets supplémentaires pour chaque patron pêcheur. Cette situation aggrave encore un contexte économique difficile pour cette profession.

Dans les secteurs les plus touchés, les professionnels semblent peu optimistes pour la pérennité de l'activité (au moins pour la petite pêche côtière ; Cottalorda *et al.*, 1997). En décembre 1998, l'un des patrons pêcheurs de la prud'homie de Menton est venu témoigner de l'inquiétude de la profession face à l'expansion de *C. taxifolia*, lors d'une réunion à l'Assemblée nationale française (Gravez *et al.*, 1999b). En Italie, la situation a conduit les pêcheurs professionnels de Ligurie (mieux représentés que dans les Alpes-Maritimes) à demander une déclaration de "catastrophe naturelle" pour leur zone d'activité²².

Dans les secteurs moins touchés, comme le Var, les pêcheurs professionnels disent toutefois ne pas ressentir l'impact de la présence de *Caulerpa taxifolia* sur leurs prises, la pêche ne se pratiquant que peu ou pas sur les secteurs fortement colonisés.



Figure 15. Un filet colmaté par *C. taxifolia*, port de Menton (Alpes-Maritimes, France). Photographie A. Meinesz©.

22. On note qu'en réponse à une question du Député européen italien Sebastiano Musumeci, la Commission Européenne considérait que le problème posé par *C. taxifolia* ne répondait pas au critères relatifs aux mesures de compensations prévues par le règlement (CE) n°2792/1999 (actions structurelles de la Communauté dans le secteurs de la pêche, JO L337 du 30.12.1999). – Réponse de M. Fischler au nom de la Commission à la Question écrite P-0371/00, JO C53E du 20/02/2001.

L'expansion de *Caulerpa taxifolia* constitue également une gêne pour la plongée sous-marine. La motivation des clients des clubs de plongée est principalement esthétique et c'est la beauté paysagère des sites, la diversité des organismes, la beauté des couleurs qui sont déterminantes (Boudouresque, 2002 ; Weill-Raynal, 1997 cité par Bec *et al.*, 2002). Or, les zones colonisées, les vastes prairies denses et monotones de *C. taxifolia* font perdre leurs attraits aux petits fonds rocheux habituellement recouverts d'une grande diversité de peuplements végétaux, ou aux tombants coralligènes lorsqu'ils sont dépouillés de leurs gorgones. Les clubs de plongée, fréquentant les sites les plus fortement colonisés des Alpes-Maritimes, qui sont généralement de petites structures de type associatif, évitent maintenant d'aller sur les fonds colonisés par *Caulerpa taxifolia* (Cottalorda *et al.*, 1997 ; Gravez *et al.*, 1999b ; Boudouresque, 2002) et adoptent des stratégies d'adaptation en proposant des visites sur des sites plus éloignés mais indemnes (Bec *et al.*, 2002). Certains plongeurs enfin changent de club de plongée et choisissent des clubs situés dans des zones non colonisées.

De manière générale, les secteurs concernés par ces invasions biologiques sont des zones hautement touristiques (pour idée, la seule région Provence-Alpes-Côte d'Azur attire 24 millions de touristes par an ; IRAP, 1999 cité par Boudouresque, 2002) ; l'impact de ces invasions sur cette industrie (e.g. hôtellerie, plongée sous-marine etc.) est probablement faible, bien qu'il n'y ait pas, pour le moment, d'éléments chiffrés (Bec *et al.*, 2002).

D'autres surcoûts directs pourraient apparaître. Certains ports colonisés par ces caulerpes envahissantes risquent, par exemple, d'être confrontés à des surcoûts pour certaines opérations d'entretien. En effet, l'envasement des bassins portuaires entraîne un exhaussement des fonds qui rend nécessaire leur dragage périodique. Les produits de dragage sont généralement, après expertise et autorisation (en France, les Affaires maritimes), rejetés au large. Le rejet en mer des vases de port, contenant des fragments de *C. taxifolia* ou de *C. racemosa*, représente un risque de dissémination important qu'il est nécessaire d'éviter. La solution alternative²³ du stockage à terre des produits de dragage dans des décharges, représente cependant un coût triple en comparaison avec celui du rejet en mer (Gravez *et al.*, 1999a, 1999b). En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Gravez *et al.* (1999a) recensent, sur la base des données de 1996, au moins 8 ports plus ou moins fortement contaminés par *C. taxifolia* et Relini *et al.* (2001a) recensent 12 ports ainsi contaminés en Ligurie italienne. Au Baléares, c'est la nécessité de réaliser des travaux dans le port qui a motivé les opérations de contrôle à Portocolom (A. Grau comm. pers. ; § 3.2).

Afin d'éviter la dissémination des espèces envahissantes ou de gêner les opérations de contrôle (§ 3.2), des secteurs fortement colonisés peuvent se voir interdits au mouillage, à la navigation ou aux arts de pêche. C'est déjà le cas de trois secteurs du Var (Porquerolles, Port d'Hyères à la Capte, Le Brusç ; Gravez *et al.*, 1999b) qui ont été réglementés par arrêtés préfectoraux. De même, en Californie, le Conseil municipal de Carlsbad a interdit le mouillage, la pêche et l'utilisation d'engins motorisés comme non motorisés dans 12 ha de la lagune contaminée par *C. taxifolia*, ce qui représente une gêne non seulement pour les usagers mais également pour les professionnels de la location de matériel nautique installés sur la lagune, comme pour une entreprise de conchyliculture²⁴. En Australie également, des interdictions similaires ont été mises en place à West Lake et certaines parties de Port River (Australie du Sud). En Nouvelles Galles du sud, les 7 zones concernées par *C. taxifolia* sont interdites à la pêche (§ 3.1). Pour toutes ces situations, cependant, il n'existe pas d'évaluation financière des manques à gagner ou des gênes occasionnées.

En dehors des effets directs sur le secteur marchand (pêche, plongée, tourisme, activités portuaires), Bec *et al.* (2002) se sont attachés à évaluer la valeur non marchande (d'usage et de non-usage) du phénomène. Ceci a été réalisé par le biais d'une évaluation contingente (*cf.* encadré), réalisée sur la population des trois départements côtiers des Bouches-du-Rhône, du Var et des Alpes-Maritimes, qui amène ces auteurs à chiffrer entre 21 et 169 M€²⁵ le consentement à payer des 1 280 000 ménages de la zone étudiée pour une éradication totale de *C. taxifolia*.

L'évaluation des coûts directs induits par l'expansion de ces deux espèces envahissantes ne doit pas omettre les sommes mobilisées pour l'étude, la définition, et parfois la mise en œuvre des stratégies de lutte. En Méditerranée, le financement majeur (5.4 M€) sur le phénomène a été réalisé dans le cadre des deux programmes européens (*Caulerpa* Life I et II) cofinancés par la Commission Européenne, les Etats, les

23. Gravez *et al.* (1999c) considèrent que des mesures spécifiques doivent être adoptées pour ces ports : le rejet à terre ; le stockage temporaire à terre (un temps suffisant permettant de s'assurer qu'il n'y a plus de risques de repousses) puis le rejet en mer ; ou l'éradication effective garantie par un suivi à t+1 an au minimum.

24. <http://www.nctimes.com/news/2001/20011108/60838.html> - North County Times.

25. Ce montant n'est pas un montant annuel (et récurant) ; il est assimilable au coût d'une opération d'éradication, en une seule fois, des peuplements existant dans le cadre hypothétique où les techniques le permettraient et non pas à des opérations répétées sur une longue période de temps.

Régions et autres organismes locaux. Les montants d'autres financements pour l'étude, la sensibilisation ou le contrôle du phénomène en Méditerranée et réalisés hors de ces programmes communautaires (notamment les opérations de contrôle aux Baléares et dans le Parc national de Port-Cros (PNPC), les études du Plan d'action français, etc.) sont également connus et totalisent, pour la période 1991-2003, un investissement supérieur à 6.8 M€²⁶. Ce montant est toutefois minoré dans la mesure où il ne prend pas en compte certaines opérations effectivement réalisées mais dont le volume financier n'est pas connu : opérations de contrôle en Croatie et quelques programmes de recherche en Espagne, France, Italie, Croatie, Tunisie et à Monaco. L'intégration des coûts de ces programmes ne modifierait toutefois pas fondamentalement l'ordre de grandeur de ce chiffre pour la Méditerranée.

Pour la Californie et l'Australie du Sud, les montants des programmes liés à *C. taxifolia* depuis sa découverte dans ces états sont également connus (§ 4.2) et totalisent respectivement 5.2 M€ et 2,5 M€ (ces chiffres intègrent le financement d'opérations à venir).

La Méthode d'Evaluation Contingente (MEC)

Pour l'économiste, la gestion rationnelle des actifs naturels non marchands suppose que leur soit attribuée une valeur monétaire. Cette « reconnaissance » d'une valeur facilite leur insertion dans un schéma d'analyse, qui permet notamment d'orienter les stratégies des politiques publiques et économiques comme de justifier, dans le cadre d'actions judiciaires par exemple, les montants des réparations aux victimes de dommages environnementaux*.

Mais comment évaluer monétairement la valeur de ces actifs ? L'un des fondements de l'évaluation économique de l'environnement est la référence aux préférences individuelles. Celles-ci s'expriment à travers le consentement à payer des individus pour obtenir, ou empêcher, une action modifiant la qualité de leur environnement. Cette mesure (le consentement à payer ; *willingness to pay*, WTP en anglais) est certainement imparfaite mais elle reconnaît la responsabilité des individus qui composent la collectivité à faire des choix et à ne pas transférer cette responsabilité entre les mains d'une « élite d'experts ». Si la qualité d'environnement, comme la vie humaine, n'a pas de prix intrinsèque, on suppose que les individus procèdent à des substitutions entre biens marchands et biens d'environnement et que diverses combinaisons de ces deux catégories de biens leur apportent un niveau équivalent d'utilité.

La MEC est basée sur le questionnement direct des individus (entretien personnel, téléphonique, correspondance) sur leur consentement à payer (ou à recevoir) dans le cadre d'un scénario explicite et plausible de modification de la qualité de l'environnement. La sensibilité des réponses obtenues dépend beaucoup de la qualité du questionnaire, de la précision des informations apportées et de la cohérence du scénario et du moyen de transaction proposé (facture d'eau, droits d'entrée, taxes, etc.). L'analyse des données est ici déterminante ; les erreurs potentielles et les biais possibles sont nombreux, tels que l'adoption par l'individu de comportements stratégiques ou l'absence de cohérence en raison d'un scénario fictif (Vallée, 2002). Cette méthode est aujourd'hui fortement développée, car elle permet l'approche des valeurs de non-usage (à l'inverse des autres méthodes de l'économie de l'environnement).

* Les principes directeurs de cette méthode ont été développés à la suite de controverses pour la réparation de l'accident pétrolier de l'EXXON VALDEZ en Alaska (1989). Cette méthode est aujourd'hui considérée comme pertinente aux USA pour l'attribution de dommages et intérêts. En France les premiers travaux sur ce sujet datent de 1990.

La superposition des montants annuels, alloués à la prise en compte du problème dans ces 3 zones géographiques ($\approx 566 \text{ k€} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'ensemble de la Méditerranée, $\approx 650 \text{ k€} \cdot \text{an}^{-1}$ pour l'Australie du Sud et $\approx 1 \text{ M€} \cdot \text{an}^{-1}$ pour la Californie) est révélatrice des différences des politiques dans ce domaine (§ 2.1). Les situations respectives, pour chacune de ces zones, ne sont pas comparables. Le phénomène bénéficiait, en effet, d'une expertise préexistante lors des découvertes de *Caulerpa taxifolia* en Californie et en Australie. On remarque toutefois (i) que les sommes investies annuellement ont été inversement proportionnelles à l'ampleur de la colonisation (et donc aux chances de succès de la maîtrise du phénomène), (ii) que les sommes investies en Méditerranée ont été essentiellement allouées à la recherche scientifique et à la recherche et développement, très au-delà de ce qui était nécessaire à la prise de décisions et à leur mise en œuvre (une sorte de "fuite en avant"), alors que (iii) les Etats-Unis et l'Australie,

26. Source GIS Posidonie.

qui ont certes bénéficié des recherches méditerranéennes, ont investi prioritairement dans le contrôle de l'expansion de *C. taxifolia*.

4. Les outils de maîtrise des *Caulerpa* envahissantes

4.1. Aspects réglementaires

Les instruments internationaux

Le risque que constituent les introductions d'espèces exotiques pour la **biodiversité**, les **habitats** et les activités humaines, comme c'est le cas des espèces de *Caulerpa* envahissantes, a été reconnu et formalisé par un certain nombre de conventions internationales. Ces conventions, une fois entrées en vigueur, lient les états parties et leurs organes internes (Parlement, Gouvernement, Juridiction), et leur violation engage la responsabilité de l'état sur le plan international.

De manière générale,

“Aucun état n'a le droit de faire usage ou de permettre qu'il soit fait usage de son territoire de manière à causer des dommages (...) sur le territoire d'un état voisin” (Sentence arbitrale « Fonderie Trail » de 1941 entre le Canada et les USA).

Sur ce fondement, un état qui aurait par erreur ou manque de diligence, laissé se développer une espèce envahissante dans ses eaux territoriales, entraînant une contamination ou un risque de contamination d'un autre état, serait théoriquement susceptible de se voir condamner par un **Tribunal Arbitral**²⁴ ou par la **Cour de justice internationale de la Haye**²⁵ (Knoepffler & Knoepffler, 1996).

De manière spécifique aux espèces introduites, la **Convention sur la Diversité Biologique** de Rio de Janeiro (juin 1992) prévoit la maîtrise des introductions d'espèces mais également leur contrôle ou leur éradication en mentionnant que chaque partie, dans la mesure du possible,

“empêche d'introduire, contrôle ou éradique les espèces exotiques qui menacent des écosystèmes, des habitats ou des espèces.” (art. 8h de la Convention).

La nécessité d'une maîtrise des introductions est également inscrite dans la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer de **Montego Bay**, 1982 (en vigueur depuis le 16 novembre 1994) qui stipule que :

“Les états prennent toutes les mesures nécessaires pour prévenir, réduire et maîtriser (...) l'introduction intentionnelle ou accidentelle en une partie du milieu marin d'espèces étrangères ou nouvelles pouvant provoquer des changements considérables et nuisibles.” (article 196.1).

De même, certains protocoles aux conventions sur les mers régionales, conclues sous les auspices du **Programme des Nations Unies pour l'Environnement** (PNUE), mentionnent spécifiquement la question des introductions (Klemm de, 1997).

Pour la Méditerranée, le **Protocole Relatif aux Aires Spécialement Protégées et à la diversité biologique en Méditerranée** de la **Convention de Barcelone** (juin 1995) prévoit que les Parties contractantes doivent prendre

“toutes les mesures appropriées pour réglementer l'introduction volontaire ou accidentelle dans la nature d'espèces non indigènes (...) et interdire celles qui pourraient entraîner des effets nuisibles sur les écosystèmes, habitats ou espèces ” (art. 13.1).

27. Le Règlement arbitral est un mode de règlement juridique consistant dans le recours des parties à des juges de leur choix chargés de régler le conflit par une décision obligatoire (Daloz, 1988).

28. Organe judiciaire principal des Nations Unies, fonctionnant conformément à un Statut annexé à la Charte, et dont la mission est de régler, par des arrêts, les différends d'ordre juridique entre Etats et de donner des avis consultatifs aux organes de l'ONU et aux institutions spécialisées. Cette cour est toutefois peu saisie, les Etats préférant l'arbitrage pour régler leurs conflits.

Ces mêmes parties doivent en outre s'efforcer

" de mettre en oeuvre toutes les mesures possibles pour éradiquer les espèces qui ont déjà été introduites lorsque après évaluation scientifique il apparaît que celles-ci causent ou sont susceptibles de causer des dommages aux écosystèmes, habitats ou espèces dans la zone d'application du (présent) protocole".

Ce protocole de la **Convention de Barcelone**, ratifié par 8 pays riverains de la Méditerranée et la Communauté européenne, est entré en vigueur le 12 décembre 1999²⁹.

En ce qui concerne les instruments issus du Conseil de l'Europe, les espèces introduites ont été également prises en compte, dès 1979, dans la **Convention de Berne**, puisqu'elle dispose que les parties contractantes s'engagent à

"contrôler strictement l'introduction des espèces non indigènes." (art. 11.2).

Ce sont là des obligations de base auxquelles les états européens qui sont parties à ces conventions ont souscrit.

Le cadre général de la conservation de la nature et de la prévention contre les introductions en Espagne

La loi du 27 mars 1989 sur la conservation des espaces naturels et de la flore et de la faune sauvage dispose que

" l'action des administrations publiques en matière de préservation de la diversité génétique et du patrimoine naturel doit se fonder, entre autres, sur la nécessité d'éviter l'introduction et la prolifération d'espèces, sous-espèces et races géographiques non indigènes dans la mesure où ces dernières pourraient concurrencer des formes indigènes ou altérer leur pureté génétique, ou les équilibres biologiques." (art. 27).

Le Décret du 8 septembre 1989, pris en application de cette disposition, précise

" que pour garantir la préservation de la diversité génétique et la conservation des espèces autochtones, l'introduction ou la réintroduction d'espèces dans le milieu naturel (...) nécessitent une autorisation de la Communauté autonome concernée" (art. 5) (in Klemm de, 1996).

De son côté, la **Convention de Lugano** (1993), qui définit les responsabilités civiles des dommages résultants des activités dangereuses pour l'environnement, ne traite que des dommages qui pourraient être causés par les micro-organismes ou des **organismes génétiquement modifiés**³⁰, mais pas par des espèces introduites.

En ce qui concerne les Directives européennes, qui lient les états membres quant aux résultats à atteindre tout en laissant aux instances nationales la compétence sur la forme et les moyens, elles ne considèrent que les introductions délibérées. La Directive du Conseil du 21/05/92 (92/43), dite "**Directive habitats**", stipule que les parties doivent veiller

" à ce que l'introduction intentionnelle dans la nature d'une espèce non indigène à leur territoire soit réglementée de manière à ne porter aucun préjudice aux habitats naturels dans leur aire de répartition naturelle ni à la faune et à la flore sauvages indigènes, et s'ils le jugent nécessaire, interdisent une telle introduction." (art. 22b).

Les parties doivent, le cas échéant, interdire les introductions d'organismes nuisibles énumérés dans une liste (Directive du conseil 77/93 du 20/12/76 modifiée par la Directive 91/683 du 19/12/91). Ce dernier texte vise principalement à la protection des cultures contre certains ravageurs ou parasites plutôt que de l'environnement *sensu lato*.

29. Source <http://www.unepmap.org> - le site du Plan d'Action pour la Méditerranée du Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

30. Ce qu'il serait très hasardeux d'affirmer pour les deux espèces envahissantes de *Caulerpa*.

Les instruments nationaux

Malgré l'existence des engagements internationaux cités ci-dessus, l'intégration dans les législations nationales d'articles concernant les espèces introduites est modeste en Europe du Nord et quasi-inexistante sur le pourtour méditerranéen. Quelques textes portant sur les introductions d'espèces, parfois spécifiques aux espèces de *Caulerpa* envahissantes existent toutefois pour certains pays. A l'inverse, dans certains pays anglo-saxons tels les Etats-Unis d'Amérique, l'Australie et la Nouvelle-Zélande, des législations très strictes ont été mises en place.

D'une manière générale, en Méditerranée, c'est l'**Espagne et ses communautés autonomes** qui possèdent les outils législatifs les plus avancés pour la lutte contre les espèces introduites (incluant *C. taxifolia* ou le genre *Caulerpa* dans son ensemble). Dans ce pays en effet, les compétences en matière de conservation de la nature ont été transférées à ses Communautés autonomes (cf. encadré).

C'est en raison de ce transfert de compétence en matière de conservation et également de commerce que les communautés autonomes littorales de Catalogne, de Valencia, des Baléares et des Canaries, ont adopté des textes considérant comme des infractions :

"la commercialisation, la distribution et la vente (...)" de l'algue Caulerpa taxifolia (respectivement Décrets 257/1992 du 26 octobre 1992 pour la Catalogne ; 89/1994 du 10 mai 1994 pour Valencia) et même du genre Caulerpa dans son ensemble dans la mesure où l'espèce est "exotique" (Décret 125/1995 du 24 octobre 1995 pour les Baléares).

A ce titre donc, la souche envahissante de *Caulerpa racemosa* découverte en 1998 aux Baléares est également directement concernée par ce texte.

Pour la Communauté autonome de Valencia, ces dispositions sont renforcées par l'interdiction

" d'introduire l'algue Caulerpa taxifolia en établissements ou dans les eaux littorales (...)" (Décret 89/1994).

Pour la Communauté autonome des Baléares, seule région actuellement touchée par *Caulerpa taxifolia* en Espagne, est également interdit l'arrachage sans autorisation administrative (Décret 125/1995).

Le gouvernement central de Madrid, considérant ces mesures et le risque potentiel d'une propagation de l'espèce à l'occasion de récoltes destinées au circuit aquariophile, interdit l'arrachage de tout ou partie d'individus de l'espèce *Caulerpa taxifolia* (Ordre du 20/03/1996) dans les eaux sous sa juridiction.

Ce n'est donc pas un hasard si l'Espagne, qui possède une législation générale sur les introductions d'espèces et a apporté une réponse globale, toutes compétences nationale et régionale confondues, à la prévention contre l'introduction ou l'expansion des espèces de *Caulerpa*, s'est trouvée en pointe pour la lutte contre l'expansion de cette espèce (§ 4.2).

Il est remarquable cependant que de son côté, **la Croatie**, dont la loi sur la conservation de la nature de 1976 ne contient pas de disposition nationale sur les introductions (en dehors des introductions dans les aires protégées), soit également l'un des "bons élèves", au niveau méditerranéen, en engageant à l'échelon régional une stratégie de lutte contre *C. taxifolia*. C'est donc ici plus une volonté réelle de conservation du milieu ou la mise en œuvre du "*principe de précaution*" qui semble s'exprimer plutôt qu'une obligation réglementairement encadrée.

Tout comme la Croatie, la **Principauté de Monaco** et l'**Italie** (dont les compétences en matière de protection de la nature sont dévolues aux régions), ne disposent pas de législation sur les introductions d'espèces non indigènes et ne possèdent pas non plus de textes nationaux spécifiques à *C. taxifolia*. On doit cependant noter que, pour Monaco, des règles sanitaires (dont la mise en quarantaine), sont théoriquement appliquées aux spécimens parvenant au Musée océanographique (Klemm de, 1996).

La situation de la **France** est beaucoup plus complexe. En effet, avant l'adoption par la loi 95-101 du 2 février 1995 (Loi Barnier), de l'article 411-3 du code de l'environnement (anciennement article 213.3 du code rural), ce pays ne disposait pas de texte général réglementant l'introduction d'espèces non indigènes dans le milieu naturel. Cette loi "relative au renforcement de la protection de l'environnement", établit maintenant des règles générales claires sur les introductions d'espèces (cf. encadré). L'article L415-4 de l'Ordonnance n°2000-916 (du 19 septembre 2000) prévoit une peine de 6 mois d'emprisonnement et 9000 € d'amende pour toute violation de cet article. Le Décret en Conseil d'Etat qui doit préciser les conditions d'application de ce nouvel article, et qui est prévu dans la loi Barnier, n'est cependant toujours pas publié.

France : La loi Barnier et les espèces introduites

Cette nouvelle loi française stipule (art. L.411.3 du nouveau Code de l'environnement), que
« afin de ne porter préjudice ni aux milieux naturels ni à la faune et à la flore sauvages, est interdite l'introduction dans le milieu naturel, volontaire, par négligence ou par imprudence :
« 1° de tout spécimen d'une espèce animale à la fois non indigène au territoire d'introduction et non domestique ;
« 2° de tout spécimen d'une espèce végétale à la fois non indigène ou territoire d'introduction et non cultivée ;
« 3° de tout spécimen de l'une des espèces animales ou végétales désignées par l'autorité administrative.»

L'un des alinéas suivants précise que

" dès qu'une infraction est constatée, l'autorité administrative peut procéder ou faire procéder (...) à la destruction des spécimens de l'espèce introduite."

... et que le tribunal peut mettre à la charge d'une personne, condamnée pour infraction à ces dispositions sur les introductions, les frais rendus nécessaires par cette destruction.

Par ailleurs, l'article 412-1 du nouveau Code de l'Environnement³¹, qui soumet à autorisation l'importation, la détention, le commerce et le transport d'animaux et de plantes appartenant à des espèces dont la liste est fixée par arrêté, a été utilisé pour la lutte contre l'espèce *Caulerpa taxifolia*, via l'arrêté du 4 mars 1993 qui interdisait

" la mise en vente, la vente, l'achat, l'utilisation et le rejet en mer de tout ou partie des spécimens de l'algue Caulerpa taxifolia (Vahl.) C. Agardh" (art. 1).

Cet article soumettait à autorisation du Préfet du département concerné le ramassage et le transport de ces derniers. Ce texte, initialement établi pour 5 années, puis prorogé jusqu'en 25 mars 2001, n'a pas fait l'objet de nouvelles prorogations ; l'espèce n'est donc actuellement plus régie par aucun texte³².

Paradoxalement, alors qu'aucun texte ne réglemente de manière spécifique, en France, les introductions d'espèces en milieu marin, quelques textes pourraient s'appliquer à la répression des introductions qui ont eu un effet nuisible (Boudouresque *et al.*, 1995). Le Décret-loi du 9 Janvier 1852 sur les pollutions marines punit d'une amende pouvant aller jusqu'à 24 k€ ceux qui auront

" jeté, déversé ou laissé écouler directement ou indirectement en mer (...) des substances ou organismes nuisibles pour la conservation ou la reproduction des mammifères marins, crustacés, coquillages, mollusques ou végétaux, ou de nature à les rendre impropres à la consommation" (article 6-13).

Ce Décret-loi n'a pas été abrogé par la Loi sur l'eau (Loi 92/3 du 3 Janvier 1992), puisque l'article 22 de la Loi sur l'eau fait explicitement référence à l'article 6 du Décret-loi de 1852 (Knoepffler & Knoepffler-Peguy, 1995).

Quoiqu'il en soit, la prise en compte effective du problème (*i.e.* opérations concrètes de contrôle) se heurte surtout au flou qui entoure la définition des prérogatives dans le milieu marin. En France, hormis quelques

31. Précédemment art. 5 de la loi du 10 juillet 1976 sur la protection de la nature.

32. Une "réglementation de la commercialisation et de la diffusion des espèces envahissantes", fondé sur les dispositions de la Loi Barnier, serait en cours de mise au point par le Ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD). Réponse du Ministre du MEDD à la question de M. le député J.P. Ridant. JO du 7.04.2003.

exceptions, ce milieu est sous l'autorité exclusive de l'état (Domaine Public Maritime) et de plusieurs ministères (Agriculture et pêche, Transport, Environnement, Défense). Or, la coordination entre ces ministères est mal définie³³. Les prérogatives des Préfets maritimes ont toutefois été utilisées pour la lutte contre *C. taxifolia* ; des arrêtés préfectoraux, interdisant la circulation et le mouillage dans des secteurs colonisés (Var), ont parfois été adoptés à la demande des communes concernées (Gravez *et al.*, 1999b).

La législation sur les espèces introduites et/ou envahissantes est particulièrement ferme dans les pays anglo-saxons. Aux **Etats-Unis d'Amérique** où les coûts direct et indirect des introductions sont évalués à 117 G€ annuellement, la politique de lutte contre les espèces introduites envahissantes est devenue, par le *Clinton Act* de 1999 (*Executive order* n°13112), une priorité présidentielle³⁴. La politique fédérale est réalisée par l'*Animal & Plant Health Inspection Service (APHIS)*³⁵ qui dépend du Ministère de l'Agriculture. Elle s'appuie notamment sur le *Plant Protection Act* (2000)³⁶ qui interdit ou soumet à autorisation la possession, l'importation, la vente ou le transport des espèces considérées comme dangereuses (*sensu lato*), les soumet le cas échéant à des mesures de quarantaine et prévoit des peines de prison (un an maximum) ou des amendes pour les contrevenants. Cette loi instaure un *Invasive Species Council*³⁷, prévoit la mise en place de plans de gestion des espèces introduites comprenant le contrôle des espèces introduites (§ 4.2) et fixe les relations entre les agences fédérales et les organes des autres états³⁸.

En 1999, à la suite de la demande de plus d'une centaine de scientifiques, l'**APHIS** a inscrit *Caulerpa taxifolia* dans la liste des espèces interdites de la *Federal Noxious Weed List*³⁹ (il s'agit de la première espèce végétale marine de cette liste).

Au niveau de l'Etat de Californie, en réponse à l'introduction de *C. taxifolia*, en septembre 2001, une loi, l'*Assembly bill 1334*⁴⁰, amende le *California Fish and Game Code*, formalise et étend l'interdiction de détention, de vente et de transport (excepté pour les scientifiques après autorisation) de *C. taxifolia*, *C. cupressoides*, *C. mexicana*, *C. sertulariodes*, *C. floridana*, *C. ashmeadii*, *C. racemosa*, *C. verticillata*, et *C. scalpelliformis*. La violation de cette loi est punie d'une amende 500 à 10 000 US\$. De même, le *California harbors and navigation code*⁴¹ est amendé et prévoit, jusqu'en 2004, la possibilité pour le *Director of Fish and Game* d'interdire ou de limiter la circulation dans les eaux de l'Etat - sous peine d'une amende de 250 US\$ - lorsque cela peut faciliter les opérations visant au contrôle de *C. taxifolia*. Ces interdictions sont renforcées au niveau local ; la ville de San Diego a émis le 23 juillet 2001 une ordonnance d'interdiction de possession et de vente des algues du genre *Caulerpa* sous peine d'amende (250 US\$)⁴² et la ville de Carlsbad a interdit les activités nautiques dans 12 ha de la lagune contaminée pour faciliter les opérations de contrôle et lutter contre la dissémination (§ 4.2).

Enfin, outre les mesures d'interdiction, des textes prévoient le financement des opérations liées au contrôle tel le *Water security, clean drinking water, coastal and beach protection act* (2002)⁴³ de l'Etat de Californie, auquel est associé un budget de 500 millions US\$ pour la protection des milieux naturels, et qui inclut dans ses objectifs le contrôle des espèces introduites (§ 4.2).

En **Australie**, la législation sur les espèces introduites est également très sévère ; elle envisage aussi bien les introductions accidentelles que délibérées. C'est l'*Australian National Parks & Wildlife Service* qui contrôle les importations de tout organisme marin vivant grâce au *Wildlife Protection Act* de 1982 (*Regulation of exports and Imports*)⁴⁴. Il est notamment mis en place un *National System for the Prevention*

33. « Juridiquement, qui est autorisé à procéder à l'arrachage [de *Caulerpa taxifolia*], notre ministère, celui de l'Agriculture et de la pêche ou celui des Transports ? Je l'ignore. » M. J.P. Raffin, à l'époque en charge du dossier « *Caulerpa* » au cabinet du Ministre français de l'Environnement, cité par le journal « La Recherche », mars 1999.

34. <http://www.doi.gov/news/archives/990203.html> – U.S. Department of interior – President Clinton expands federal effort to combat invasive species.

35. <http://www.aphis.usda.gov/> - Animal & Plant Health Inspection Service website.

36. Qui remplace le *Federal Noxious Weed Act* de 1974.

37. <http://www.invasivespecies.gov> - Invasive species council website.

38. Pour un résumé, voir sur le site du *Center for Wildlife Law* de l'Université de droit du Nouveau Mexique - <http://jpl.unm.edu/cwl/fedbook/fedweed.html>

39. www.aphis.usda.gov/ppq/permits/fnwsbycat-e.PDF - Federal Noxious Weed List (format pdf)

40. Assembly bill 1334 - http://www.leginfo.ca.gov/pub/01-02/bill/asm/ab_1301-1350/ab_1334_bill_20010925_chaptered.html

41. *California harbors and navigation code* - <http://www.leginfo.ca.gov/cgi-bin/waisgate?WAISdocID=47353926682+0+0+0&WAISaction=retrieve>

42. <http://swr.nmfs.noaa.gov/hcd/CAULERPA.htm>

43. *Water security, clean drinking water, coastal and beach protection act* (2002) – http://www.calfed.ca.gov/BDPAC/Subcommittees/DWS_water_bond_final.pdf (format pdf)

44. Incorporé en 2001 au *Environment Protection and Biodiversity Conservation Act* de 1999 qui réforme l'ensemble de la politique environnementale de l'Australie. Pour plus de détail : <http://www.affa.gov.au> - Department of Agriculture Fisheries & Forestry website.

and management of marine pest incursions qui comprend trois composantes : (i) la prévention - déléguée à l'*Australian Quarantine & Inspection Service* (AQIS) - ; (ii) l'intervention d'urgence en réponse aux nouvelles incursions, déléguée au *Product Integrity & Animal and Plant Health*, et (iii) la poursuite sur le long terme des opérations de contrôle déjà engagées.

En ce qui concerne l'intervention d'urgence, dans le cadre du *Australian Emergency Marine Pest Plan*, une liste d'espèces est établie (*Interim Trigger List of Introduced Marine Pests*), comprenant notamment la souche aquariologique de *C. taxifolia* ; la découverte de l'une de ces espèces dans les eaux d'un des Etats déclenche (au moins théoriquement) une action d'urgence dont les coûts sont pris en charge par le gouvernement fédéral⁴⁵.

Au niveau fédéral, sont créés l'*Australian Ballast Water Management Advisory Council* (ABWMAC) et le *Center for Research on Introduce Marine Pests* (CRIMP de la division des recherches marines du CSIRO) basé à Hobart. Le *National Introduced Marine Pest Information System* (**NIMPIS**)⁴⁶ y est notamment développé avec comme but de diffuser les informations pertinentes sur les introductions en Australie (information sur les espèces, signalisation d'une espèce introduite, méthodes de contrôle).

Dès 1997, en réponse à la situation en Méditerranée, l'AQIS a interdit l'importation de *Caulerpa taxifolia* dans l'ensemble des Etats de l'Australie (Gravez *et al.*, 1999b).

Dès octobre 2000, suite aux découvertes de colonies de *C. taxifolia*, l'Etat de Nouvelles-Galles-du-Sud a réglementé la possession et interdit la vente de la souche aquariologique de *C. taxifolia* par amendement du *Fisheries Management Act* (1994)⁴⁷. En juin 2001, la même loi a été de nouveau amendée, interdisant l'utilisation des filets de pêche dans les 7 zones contaminées pour une période de deux années en raison du risque de dissémination⁴⁸. Des opérations de contrôle ont été mises en place (§ 4.2).

De son côté, l'Etat d'Australie du Sud a interdit également la possession, l'importation et la vente de *C. taxifolia* (*Fisheries Act, Section 49*) sous peine d'amende de 4 000 AUD⁴⁹ (≈ 2 140 €). De même, des interdictions ont été établies pour la pêche dans le West Lake et dans certaines zones de Port River. Dans le West Lake, les interdictions ont été étendues à la nage et à la circulation de bateaux et de planches à voile. En avril 2003, des patrouilles ont été organisées afin de faire respecter ces interdictions, notamment en ce qui concerne la pêche⁵⁰. Des opérations de contrôle ont également été mises en place (§ 4.2).

La **Nouvelle-Zélande** possède l'une des législations les plus sévère au monde en ce qui concerne les introductions d'espèces. Toute importation d'organisme exotique est interdite, sauf s'il figure sur une « liste blanche » (*white list* ou *clean list*) d'espèces autorisées (*Animal Act* de 1967, modifié en 1990 ; *Biosecurity Act* de 1993). Les pénalités pour possession d'espèces non-autorisées ou de produits à risque peuvent être punies de 5 ans d'emprisonnement et/ou d'amendes (Boudouresque, 2001). Suite à la découverte des contaminations par *Caulerpa taxifolia* en Australie et par mesure de protection, le Ministère des pêches de Nouvelle-Zélande a lancé le « *Caulerpa taxifolia Action Plan* » dans le cadre de son *Marine Biosecurity Action Plan*. *C. taxifolia* est classifiée comme *Unwanted Organism*, comme défini par le *Biosecurity Act*, ce qui interdit la possession, la vente ou la dissémination. De plus l'espèce est considérée comme *Notifiable organism* ce qui signifie que sa découverte doit être signalée aux autorités. La notification de l'espèce dans le *Plant Pest Accord* contraint les autorités régionales à appliquer des mesures similaires⁵¹. De fait, cette campagne, essentiellement dirigée vers le secteur aquariophile (professionnel et amateur), couvre l'ensemble des espèces à l'intérieur du genre *Caulerpa*.

45. D'où l'importance qu'il y a à qualifier "génétiquement" l'espèce dans les sites où *C. taxifolia* était découverte en Australie, puisque c'est bien la souche aquariologique qui est intégrée dans la liste et qui permet le financement des opérations de contrôle (Murphy & Schaffelke, 2003).

46. <http://crimp.marine.csiro.au/nimpis> - *National Introduced Marine Pest Information System website*.

47. <http://legislation.lawnow.com/desklaw/nswreg/html/1995-11/doc047.htm> - *NSW Acts & statutory rules* et *NSW Fisheries site* - http://www.fisheries.nsw.gov.au/conservation/aquahab/noxious_fish.htm

48. [http://www.fisheries.nsw.gov.au/closures/general/Caulerpa%20\(15-6-01\).htm](http://www.fisheries.nsw.gov.au/closures/general/Caulerpa%20(15-6-01).htm) - *Fisheries Management Act 1994 - Notification of Fishing Closures : Caulerpa (15 June 2001)*

49. Toutes les conversions de dollars australien (AUD) en € ont été fait sur la base de 1AUD = 0.53486€ (taux au 01.01.03).

50. <http://www.pir.sa.gov.au/dhtml/ss/section.php?sectID=1373&templD=3> - *Primary Industries & resources of South Australia show case*.

51. <http://www.fish.govt.nz> - *Ministry of fisheries, Marine Biosecurity website*.

Les 5 niveaux de la législation en matière de prévention des introductions d'espèces

Niveau 0. Il n'existe aucun texte législatif. C'est le cas de beaucoup de pays du tiers-monde et, de façon plus surprenante, de la plupart des pays riverains de la Méditerranée.

Niveau 1. Bien qu'il n'existe pas de texte législatif spécifique, quelques textes destinés à la protection de l'agriculture (contre les pathogènes) ou de la chasse pourraient être détournés de leur objectif initial pour prévenir les introductions d'espèces. C'est le cas de la France et de l'Italie.

Niveau 2. Il existe des textes spécifiques destinés à prévenir les introductions d'espèces. Toutefois, ces textes sont "naïfs", en ce sens qu'ils traitent uniquement des introductions délibérées, alors que la quasi-totalité des introductions sont accidentelles. C'est le cas de l'Espagne. La France serait également dans ce cas, si les fonctionnaires du Ministère de l'Environnement avaient rédigé et publié les Décrets d'application d'un article de la Loi Barnier de Février 1995.

Niveau 3. Il existe, en plus de textes spécifiques sur les introductions d'espèces prenant en compte les introductions délibérées et accidentelles, une "liste noire" d'espèces dont l'importation est interdite. Cette liste regroupe toutes les espèces dont on sait qu'elles se sont introduites dans d'autres pays et y ont eu un comportement envahissant. C'est le cas de la Grande Bretagne, des Etats-Unis, du Canada et de l'Australie par exemple.

Niveau 4. Il existe, en plus de textes législatifs comparables à ceux du niveau 3, une "liste blanche". Pour qu'une espèce puisse être importée, elle doit figurer sur cette liste. Les espèces qui figurent sur cette liste sont celles dont l'introduction est peu probable et qui, si elles se naturalisaient, poseraient probablement peu de problèmes. C'est le cas de la Nouvelle Zélande et de certains Etats d'Australie.

D'après Boudouresque (2003)

Les recommandations

A côté des instruments réglementaires précités, des recommandations émanant d'organismes internationaux ont été émises pour la prévention et le contrôle des introductions d'espèces ; certaines concernent les espèces envahissantes de *Caulerpa* de manière spécifique.

Au niveau international, l'**IUCN** (Alliance Mondiale pour la Nature) a formalisé un guide très complet pour la préservation de la biodiversité en cas d'invasion d'espèces introduites « *IUCN guidelines for the prevention of Biodiversity loss caused by alien invasive species* » (IUCN-SSG, 2000). Ce document de portée générale, vise à présenter les éléments nécessaires à l'adoption par tous les pays de politiques préventives et curatives contre les espèces envahissantes, en accord avec l'article 8h de la **Convention sur la Diversité Biologique** (cf. ci-dessus).

L'**ICES** (Conseil International pour l'Exploration de la Mer) a édité un "Code de Conduite [...] pour les introductions et transferts d'organismes marins" (ICES, 1995 ; § 2.3). Bien qu'essentiellement établi pour les projets d'introductions volontaires dans le cadre des activités d'aquaculture et théoriquement limité géographiquement, ce code est reconnu au niveau mondial et souligne l'importance de la lutte contre les introductions accidentelles.

Au niveau européen, le **Conseil de l'Europe** demande aux Etats membres d'interdire toute introduction dans le milieu naturel d'espèces non indigènes (recommandation R14 du 21/06/94), même si "les risques et les répercussions de l'introduction d'une espèce non indigène sont dans la plupart des cas, incalculables et imprévisibles, même si l'on a effectué des recherches minutieuses".

Ce même texte demande aux Etats membres de mettre en place une collaboration dont l'objectif est la prévention et l'information sur les introductions d'espèces.

De manière spécifique à *Caulerpa taxifolia*, et dans le prolongement de la **Convention de Berne**, le Comité permanent de la Convention recommande aux parties contractantes de "procéder à un contrôle scientifique de l'apparition et de l'expansion de *Caulerpa taxifolia*" et à "l'éradication (...) lorsque cela est encore

possible, puis à un contrôle des repousses successives, en intervenant de façon prioritaire dans les espaces protégés". Le comité souligne également, la nécessité d'une action coordonnée entre les pays concernés, ou susceptibles de l'être, en vue de l'adoption d'une stratégie commune de lutte (recommandation 45 du 24.03.95).

En mars 1998, le **Programme des Nations Unies pour l'Environnement** (Plan d'Action pour la Méditerranée) a organisé, à Héraklion (Crète), un séminaire sur les espèces envahissantes de *Caulerpa* en Méditerranée. Les participants (personnels des ministères de l'environnement et scientifiques représentant officiellement 19 pays riverains de la Méditerranée), ont adopté des conclusions qui confirment l'appel lancé à Barcelone en 1994 (cf. encadré ; § 4.3) et proposent, à l'ensemble des pays, 11 recommandations pour une stratégie de contrôle effective de l'expansion de ces espèces envahissantes (cf. encadré ci-dessous).

Les recommandations d'Héraklion - Rapport de l'atelier sur les espèces de *Caulerpa* envahissantes en Méditerranée

Recommandations adoptées à l'unanimité par l'ensemble des représentants administratifs et scientifiques des pays méditerranéens à l'issue du séminaire. Le rapport final du séminaire UNEP(OCA)/MED WG. 139/4 du 20 mars 98 est diffusé par le bureau du PAM à Athènes : <http://195.97.105.164/sample/Final/MTSFull.htm>

I. Recommandations à tous les pays méditerranéens :

- 1. Que dans chaque pays soient adoptées les mesures nécessaires à l'application du Protocole [de Barcelone] et de la Convention [Convention sur la Diversité Biologique] cités ci-dessus.
- 2. De favoriser la coordination nationale et internationale de l'ensemble des partenaires pour empêcher ou ralentir l'expansion de *C. taxifolia* et *C. racemosa* en Méditerranée.
- 3. De soutenir des programmes internationaux pour l'échange d'informations, la formation et la recherche scientifique.
- 4. D'interdire la commercialisation et l'utilisation de *C. taxifolia* et *C. racemosa*, et d'éviter celles du genre *Caulerpa* en aquarium (excepté l'espèce méditerranéenne *C. prolifera*).
- 5. De soutenir la diffusion d'une information destinée à inciter les usagers de la mer à prévenir la dissémination et à signaler la présence de *C. taxifolia* et *C. racemosa*.
- 6. Que des instructions officielles incitent les usagers de la mer à signaler la présence de *C. taxifolia* et *C. racemosa* à des organismes désignés.

II. Recommandations aux pays où l'une de ces deux espèces est présente :

- 1. De donner des instructions officielles pour que les usagers de la mer soient incités à éviter les pratiques contribuant à la dissémination de ces espèces, en particulier par le nettoyage sur place des ancres, des engins de pêche et du matériel de plongée. Il faut éviter le rejet des fragments de ces algues à la mer. Les grandes zones colonisées mériteraient d'être signalées dans les capitaineries et dans les instructions nautiques.
- 2. De réaliser l'inventaire et le suivi cartographique des zones colonisées.
- 3. De suivre l'évolution des biocénoses des zones concernées.
- 4. De soutenir la recherche scientifique sur tous les aspects relatifs à ces espèces, à la compréhension du phénomène, à l'évolution de ses conséquences et au contrôle de sa dynamique.
- 5. De contrôler, dans la mesure du possible, l'expansion des deux espèces notamment par l'élimination des petites colonies dans les aires à haute valeur patrimoniale et les régions éloignées des zones fortement colonisées.

Cet ensemble de textes, s'ils ne sont pas forcément contraignants pour les états, formalise au moins une prise de conscience mondiale de l'incidence des introductions d'espèces sur le milieu naturel et les activités économiques.

4.2. Les stratégies nationales, régionales et locales de contrôle des espèces de *Caulerpa* envahissantes

En Méditerranée, les principaux moteurs de la prise en compte de l'expansion des espèces de *Caulerpa* envahissantes (initialement *C. taxifolia*, car *C. racemosa* n'a été reconnue comme telle que plus tard) ont été les deux programmes Life de la **Commission européenne** : "L'expansion de l'algue verte tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. Suivi de l'expansion ; risques liés à la toxicité ; base biologiques et technologiques de l'éradication" (1993-1994)⁵² et "Contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée" (1996-1999)⁵³. Ces deux programmes successifs, dotés respectivement 3.3 et 2.1 M€⁵⁴, ont permis notamment de (i) confirmer le risque écologique et économique du phénomène ; (ii) de réunir un pool d'expertise important en Méditerranée et en Europe, (iii) de mettre en place un réseau méditerranéen d'alerte et de suivi et d'atteindre ainsi un niveau de connaissance précis de l'expansion spatiale de chacune des deux espèces et de leur cinétique d'expansion, (iv) de réaliser des campagnes d'information et de sensibilisation du public et des décideurs, homogènes à l'échelle de la Méditerranée, (v) et enfin de dresser les bases d'une stratégie de contrôle et de validation des outils opérationnels de lutte.

Dans le cadre de ces programmes, 4 colloques internationaux ont été organisés, dont les Actes ont été publiés, et des ateliers de formation et des rencontres avec les décideurs locaux ont été organisés (cf. Gravez *et al.*, 1999b, pour une revue). Dans le prolongement de ces travaux, le **Plan d'Action pour la Méditerranée** du **PNUE** (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) a organisé un atelier sur le sujet afin d'établir des recommandations (§ 4.1).

Les financements de ces programmes étaient issus, outre la Commission Européenne, d'autres partenaires à divers niveaux d'intégration (Etats, Régions, Communes, entreprises privées). Ces programmes, qui ont permis de renforcer les initiatives locales, n'avaient toutefois pas comme objectif le contrôle opérationnel des colonies, prérogative des Etats, souverains sur leur domaine maritime.

Le Plan d'action interministériel français relatif à *Caulerpa taxifolia*

En France, un Plan d'action interministériel relatif à *Caulerpa taxifolia* a été mis en place en 1998. Ce plan d'action est composé d'un Comité de pilotage, qui regroupe les différents ministères compétents, les collectivités et les établissements publics techniques ou scientifiques ainsi que d'un Conseil scientifique spécifique.

Ce plan d'action, d'une durée de 5 ans, mis en œuvre en collaboration avec l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, est doté d'une enveloppe de 5 millions de francs (≈ 762 k€) et comprend 3 volets : la recherche (sur la nature et l'origine de l'algue, ses impacts socio-économiques et sur les écosystèmes), l'observation du phénomène et la prévention (veilles cartographique, écologique et économique et inventaires des sites sensibles). Un bilan des actions entreprises doit être réalisé en 2003 (Déclaration du Ministre du MEDD à l'Assemblée nationale, 2002).

La gestion du problème **en France** a été houleuse, chaotique et passionnelle (Meinesz, 1999). En 1992, le secrétariat d'Etat à la mer a créé un comité de coordination composé d'élus locaux de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, de représentants des métiers de la mer et d'administrations. Ce comité se réunira 5 fois entre 1992 et 1993 et formulera des conclusions qui ne seront jamais mises en œuvre, peut-être parce que ces conclusions ne convenaient pas aux administrations concernées. En 1997, le ministère français de l'environnement a organisé le colloque "*Dynamique d'espèces marines invasives : application à l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée*" sous l'égide de l'Académie des Sciences. Le Ministère y a affiché sa volonté d'organiser la "**fuite en avant dans la recherche**", afin de retarder *sine die* le contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia*⁵⁵. Sans surprise, en 1998, un Comité interministériel de la mer a établi un "Plan d'Action relatif à *Caulerpa taxifolia* en mer Méditerranée" (cf. encadré) dirigé par un comité de pilotage

52. Référé dans ce document comme *Caulerpa* Life I.

53. Référé dans ce document comme *Caulerpa* Life II.

54. Dont la moitié environ correspond à des investissements en terme de travail des chercheurs et techniciens des organismes de recherche.

55. Des scientifiques de valeur se sont fait complices de cette stratégie de fuite en avant dans la recherche. Il ne saurait leur en être fait reproche : dans la situation de pénurie de beaucoup de laboratoires universitaires, il est légitime d'accepter des financements (non négligeables) destinés à vérifier ce que des collègues de laboratoires concurrents ont établi et publié, même si ces publications ont été acceptées par de grandes revues internationales.

interministériel à caractère administratif. Depuis la fin des programmes européens sur *C. taxifolia*, le Plan d'Action français finance des études de recherche fondamentale (déjà largement abordées par les programmes européens Life I et Life II) et pérennise au niveau français le système de suivi cartographique du phénomène et la sensibilisation, par le cofinancement de l'Observatoire de l'expansion de *Caulerpa taxifolia*. En revanche, les mesures de contrôle des colonies ou de ralentissement de l'expansion, ne sont pas prises en compte dans ce Plan. Les sollicitations des communes aux ministères ou à ses services restent sans réponse⁵⁶.

Les seuls contrôles effectivement réalisés de manière systématique sont le fait d'une politique volontaire du Parc national de Port-Cros (PNPC) où un système de prospection active des sites sensibles (essentiellement 120 ha de zones de mouillage) et de contrôle des taches découvertes est réalisé chaque année par le personnel du parc en collaboration avec les clubs de plongées. La situation particulière du PNPC au regard de ces deux espèces envahissantes est développé § 5.

Au niveau local, les Conseils Généraux, notamment celui des Alpes-maritimes et les Conseils Régionaux des trois régions de la façade méditerranéenne française ont régulièrement été impliqués dans le financement ou le cofinancement des études, cartographies ou réalisation de documents sur le sujet. En mars 2003, considérant que les actions menées dans le cadre du Plan national ne sont pas satisfaisantes, le Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur a décidé d'adopter, une "Stratégie régionale pour contrôler l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Provence-Alpes-Côte d'Azur"⁵⁷ et proposé un partenariat avec les autres régions du bassin méditerranéen dans le but d'harmoniser les protocoles de suivi et de contrôle et de mutualiser les efforts de recherche. Une réflexion similaire est également initiée par l'Office de l'Environnement de la Corse⁵⁸.

En Espagne, c'est le Direcció di Pesca i Cultius Marins du gouvernement autonome des Baléares qui coordonne, depuis 1993, les opérations de surveillance et de contrôle pour une stratégie de ralentissement de l'expansion de *C. taxifolia*. Différentes méthodes ont été utilisées : arrachage manuel (parfois aidé de burin), suceuse hydraulique et, depuis 1999, utilisation de l'ion cuivrique par électrolyse (§ 2.2). Les secteurs concernés correspondaient à trois baies balisées où le mouillage est réglementé. Les colonies de *C. taxifolia* y sont présentes sur substrat dur, sur matre morte de *Posidonia oceanica* et dans l'herbier de *P. oceanica* entre 2 et 15 m de profondeur. Les opérations de contrôle, d'un coût annuel d'environ 53 k€ (chiffres 1998 et 1999) ont été réalisées chaque année jusqu'en 2000. A la suite de la disparition de la colonie principale, à Porto Petro (§ 2.2, note 6), les autorités ont décidé d'arrêter ces opérations de contrôle et n'effectuent la surveillance qu'au travers d'études portant sur d'autres peuplements (tels que les herbiers de Magnoliophytes ; A. Grau, comm. pers.). La réglementation des mouillages est maintenue mais il est probable que seules les contaminations de petite dimension et éloignées des zones déjà colonisées qui seraient découvertes dans le futur fassent l'objet d'opération de contrôle.

En Croatie, l'expansion des *Caulerpa* envahissantes ne fait pas l'objet de stratégie nationale proprement dite. Les régions et localités réalisent toutefois, au coup par coup, des opérations de contrôle et d'éradication. La suceuse hydraulique a été utilisée en 1996 dans le port de Malinska sur substrat meuble (vase portuaire), ce qui a permis le succès total de l'éradication (Zuljevic *et al.*, 1998 ; Zavodnik *et al.*, 2001). Il s'agit de la plus grosse opération d'éradication effective de *C. taxifolia* en Méditerranée (environ 300 m² de *C. taxifolia* répartis sur 600 m²). Dans la baie de Stari Grad (île de Hvar), où *C. taxifolia* pousse sur substrat dur, et au milieu des herbiers à *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa*, une stratégie de ralentissement de l'expansion a été réalisée, en 1997, par la pose de bâches opaques en PVC permettant la destruction de 512 m² de *C. taxifolia*. Les petites taches périphériques y ont été traitées manuellement, aidé de suceuses hydrauliques (Zuljevic & Antolic, 2001a). En dépit de ces opérations, la situation est actuellement considérée comme hors de contrôle en raison de la forte dissémination par les courants. Ces opérations ont été financées par la région de Split. Dans le canal de Barbat, les colonies représentant environ 20 m² sur une surface atteinte de 350 m² ont été arrachées manuellement. Cette opération, financée par le gouvernement local de la ville de Rab, semblait être un succès total en 1998 (Zuljevic & Antolic, 2001b). L'algue a été toutefois retrouvée en juin 2001 dans cette zone (Meinesz *et al.*, 2001b).

Il n'existe pas, en **Italie** de stratégie nationale pour le contrôle de ces espèces envahissantes. La SIBM (Società Italiana de Biologia Marina) a proposé au Ministère de l'Environnement un plan national mais celui-

56. Voir par exemple Procès Verbal de la commune de Ste Maxime (Var) du 6.10.2000 http://www.sainte-maxime.com/activitees-municipale/conseil_municipal/0610_0j.htm

57. Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, délibération n°03-22 du 21 mars 2003.

58. "Mise en place d'un dispositif de lutte contre l'invasion de *Caulerpa taxifolia* en Corse", document non daté de l'Office de l'Environnement de la Corse.

ci n'est pas encore approuvé en raison de problèmes financiers. La situation est la même en Sardaigne, qui a développé un plan régional et qui cherche à en assurer le financement (Prof. G. Relini, comm. pers). Ainsi, en Italie, les opérations de contrôle se sont limitées à des interventions ponctuelles, généralement de faible ampleur, telles que celles réalisées dans la région Ligure par le LBMEA.

Pour les autres pays méditerranéens, il n'existe pas de stratégie de contrôle des espèces de *Caulerpa* envahissantes, à part quelques opérations très isolées d'initiatives privées (i.e. clubs de plongée) ou locales et sur des colonies de très petite taille et des stolons isolés de *C. taxifolia*.

Aux Etats-Unis d'Amérique, dès août 1999, avant la découverte des colonies de *C. taxifolia* en Californie, un programme de prévention contre la souche aquariologique de *C. taxifolia* a été édité par l'*Aquatic Nuisance Species Task Force* (Keppner & Caplen, 1999) dans le cadre des législations fédérales (§ 4.1). Il n'est toutefois pas sûr que ce texte, par ailleurs très complet, ait été suivi d'actions concrètes.

C'est à la suite de la découverte des premières colonies que l'**Etat de Californie** a adopté une politique agressive pour l'éradication de *Caulerpa taxifolia*. Le *Southern California Caulerpa Action Team* (SCCAT⁵⁹) s'est chargé de l'éradication de *C. taxifolia*. Le SCCAT est sous la supervision d'un Comité de pilotage formé des représentants des agences fédérales et locales et d'un comité technique. Entre 2000 et juin 2003, la maîtrise d'ouvrage du SCCAT a été confiée à l'entreprise de *consulting* en environnement (Merkel & associates) qui avait découvert la première station de *C. taxifolia* à Agua Hedionda Lagoon (§ 2.2).

Les objectifs du SCCAT sont la mise en place effective d'un programme d'urgence de contrôle et de suivi des peuplements de *C. taxifolia*. Après sélection et tests, la méthode de contrôle retenue a été l'épandage de chlore sur les peuplements. Les premières opérations de contrôle ont été réalisées fin juin 2000. En mars 2001, environ 1/5 des fonds de la lagune Agua Hedionda était traité. Entre l'été 2000 et avril 2003, 8 campagnes d'éradication et de suivi des repousses ont été réalisées et les derniers suivis n'ont pas permis la découverte de nouvelles repousses. A Huntington harbor, des opérations similaires ont été menées mais rendues difficiles par la configuration du site⁶⁰.

Parallèlement aux opérations de contrôle et de surveillance, une campagne de mobilisation du public et d'appel à signalisation (diffusion de brochures auprès des magasins d'aquariophilie, plongeurs sous-marins et pêcheurs) a été réalisée. Des conseils ont été prodigués au public pour détruire par congélation les plants récoltés⁶¹. Une analyse du risque de nouvelle contamination a été réalisée par le *Department of Fish & Game* qui a identifié plusieurs sites comme potentiellement "à risque", notamment en raison du grand nombre de possesseurs d'aquariums sur leur pourtour⁶². La mobilisation des décideurs a permis l'adoption de textes d'interdiction de détention de l'espèce et de fermeture des plans d'eau contaminés pour faciliter le travail de contrôle, de prospection, et réduire les risques de dissémination⁶³ (§ 4.1).

Le 31 janvier 2002, l'*International Conference on marine bioinvasions* a été organisée à San Diego par le *San Diego Regional Quality Control Board* et le *California Sea Grant*. A l'issue du colloque, le 2 février 2002, un comité scientifique, le "*Caulerpa taxifolia* scientific review panel", a été réuni par le *California Department of Fish & Game*, avec comme objectif de bénéficier de l'expérience des chercheurs pouvant apporter une expertise sur *C. taxifolia* et les algues envahissantes. Plus particulièrement, la question posée par les organisateurs était de savoir si la réponse apportée par la Californie était appropriée, avait des chances de succès et pouvait être transposée en cas de découverte de nouvelles contaminations en Californie⁶⁴.

Les participants concluaient que l'objectif d'éradication totale et définitive des peuplements d'Agua Hedionda lagoon semblait réaliste (§ 4.4), notamment en raison de l'aspect relativement favorable de la situation en Californie (détection précoce, application rapide d'une stratégie de contrôle sur site, confinement de la zone contaminée). Il a été notamment soulignée la nécessité de poursuivre une politique très agressive pour l'éradication totale et non pas de simple ralentissement du phénomène :

"California response embodies lessons learned from other areas, most notably the importance of a rapid response and a focus on eradication, not management or containment, as the necessary program objective if ecological and economic harm is to be avoided."

59. <http://Caulerpa.cjb.net>

60. <http://www-csrg.ucsd.edu/STORIES/Caulerpa.html> Californie Sea Grant web page about *Caulerpa taxifolia*.

61. <http://swr.nmfs.noaa.gov/hcd/CAULERPA.htm>

62. Newport Bay, Dana Point, Marina Del Rey, Mission Bay and San Diego Harbor.

63. http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb9/programs/Caulerpa/Caulerpa_files/Interim%20Management%20Plan.pdf

64. <http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb9/programs/Caulerpa/Caulerpa.html> : Les comptes-rendus du *Caulerpa taxifolia* scientific review panel.

Entre juin 2000 et mars 2003, les opérations pour le contrôle de *C. taxifolia* sur les deux sites connus de Californie ont coûté 3 MUS\$⁶⁵. Ces fonds étaient issus de Cabrillo power (entreprise propriétaire de la lagune Agua Hedionda à Carlsbad et des agences fédérales et locales (*San Diego Regional Quality Control Board, US Fish & Wildlife* et le *National Marine Fisheries Service*).

D'autres institutions ont participé à l'effort de lutte, comme le *Sea Grant of California* qui a financé trois études sur le circuit aquariophile, la cartographie et la sensibilisation⁶⁶.

La poursuite des opérations a été programmée et un appel d'offre⁶⁷ a été lancé pour la poursuite de la maîtrise d'ouvrage avec comme objectifs la poursuite de l'éradication, la recherche et le développement des méthodes de contrôle, la surveillance, la cartographie, la sensibilisation et la coordination avec les instances officielles.

Fin février 2003, le *Coastal Conservancy* de l'Etat de Californie a débloqué 1,3 MUS\$ pour la *Agua Hedionda Lagoon Foundation* pour la détection et l'éradication à Carlsbad et Huntington Harbor dans le cadre du SCAAT.

En mars 2003, 1,1 MUS\$ ont été attribués au *State Water Resources Control Board*⁶⁸ pour les travaux du SCAAT, via le "*Water Security, Clean Drinking Water Act and Coastal and Beach Protection Act*" (§ 4.1).

En Nouvelles-Galles-du-Sud (Australie), dès 2000 et suite à la découverte de *C. taxifolia*, des interdictions ont été établies sur les zones contaminées, les mesures d'interdiction de *C. taxifolia* ont été renforcées (§ 4.1) et des appels à signalisation ont été diffusés. En 2001, un plan d'urgence pour le contrôle de *C. taxifolia* a été publié par le Département des pêches (Grey, 2001).

En mars 2002, des essais de contrôle par épandage de sel ont été réalisés à Careel bay (Pittwater), Lake Macquarie (20 t de sel) et Port Hacking (4 t de sel) par des plongeurs militaires et privés sous la coordination du *NSW Fisheries*⁶⁹. Des suivis ont été réalisés permettant de parfaire les cartographies et de réaliser de nouvelles opérations de contrôle (notamment à Pittwater). Dans le même temps, le *Reefwatch* et le *Conservation Council's community* mettaient en place un programme de surveillance des espèces introduites basé sur les plongeurs sportifs.

L'**Etat d'Australie du Sud** a montré également une grande préoccupation au sujet de la présence de *C. taxifolia*, considérée comme l'une des plus grandes menaces sur l'environnement de cet état⁷⁰. C'est le *Primary Industries and Resource of South Australia Government* (PIRSA) qui est responsable des opérations pour le contrôle de *C. taxifolia*.

En juin 2002, différentes méthodes ont été testées dans le West Lakes pour des essais de destruction des peuplements : couverture par des bâches PVC, épandage d'eau douce, de sel, de chlore ou d'autres algicides. Après avoir longtemps considéré l'utilisation d'épandage de sulfate de cuivre⁷¹ comme le meilleur recours pour traiter *C. taxifolia*, le Gouvernement d'Etat, via son Ministère de l'Agriculture et de la pêche, a établi un plan de dessalinisation du lac d'un montant de 3 MAU\$ (≈ 1.6 M€). A cette fin, les eaux d'une rivière proche seront pompées vers ce lac artificiel (d'une profondeur maximale de 8 m) alors que les eaux salées en seront évacuées. Les équipes techniques espèrent éradiquer l'algue en 2 semaines. Les installations mises en place seront laissées de manière à pouvoir les réutiliser en cas de besoin. Cette méthode a finalement été préférée en raison de l'impact, notamment social, moins important. L'utilisation du sulfate de cuivre aurait impliqué un impact important sur l'ensemble des organismes vivants avec un temps de restauration estimé à 1-2 années.

65. <http://nctimes.net/news/2003/20030301/54936.html> : North County Times.

66. <http://www-csgc.ucsd.edu/STORIES/Caulerpa.html> : Sea Grant California.

67. http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb9/programs/Caulerpa/Caulerpa_files/RFP%20final.PDF -

68. http://info.sen.ca.gov/pub/bill/asm/ab_0101-0150/ab_120_bill_20030114_introduced.html - Bill AB120 (2003-2004) about *C. taxifolia*.

69. <http://www.mccn.org.au/sa/default.asp?page=projectitem&projectid=-3> The Marine & Coastal community network, *Caulerpa taxifolia* outbreak, NSW Fisheries site <http://www.fisheries.nsw.gov.au/licence/newscast/mar-03.htm>

70. http://www.pir.sa.gov.au/pages/showcase/media/west_weed/1408premier.htm:sectID=1373&tempID=3 - En Août 2002, " le Gouvernement de Miike Rann déclare la guerre à *C. taxifolia* (« Operation mutant ») considérée comme l'une des plus grandes menaces à l'environnement en Australie du Sud"

71. Méthode déjà utilisée pour l'éradication de la moule zébrée (cf. <http://www.pir.sa.gov.au/dhtml/ss/section.php?sectID=1373&tempID=3>).

A Port River, où la zone affectée est de 30 000 m² et où se trouvent les zones les plus densément colonisées, un traitement par succion a été réalisé en mars 2003. 22 000 m² ont été traités, aboutissant à un arrachage de 414 t de sédiment et de *C. taxifolia*. D'autres opérations ponctuelles sont prévues afin de poursuivre l'opération sur les zones non traitées et sur des taches nouvellement signalées. Le financement de l'opération, évalué à 600 kAU\$ (≈ 357 k€), est assuré par le "Bio-Security Fund" du PIRSA. Le Ministère de l'Agriculture et de la pêche a attribué une enveloppe de 1 MAU\$ (≈ 535 k€) pour la poursuite de la lutte.

Parallèlement à ces opérations, des appels à signalisation et un protocole de destruction des individus détenus en aquariums ont été diffusés auprès du public et des aquariophiles professionnels et amateurs.

Tableau III. Documents sur *Caulerpa taxifolia* et *C. racemosa* classés par thèmes et par types de publication. N.B. Les livres, actes de colloques et documents de sensibilisation ne sont pas pris en compte. D'après la revue bibliographique de Boudouresque *et al.* (2002), mise à jour pour juin 2003, et dont la nomenclature est reprise.

	Impact Compétition	Toxicologie Chimie	Expansion Modélisation Cartographie	Synthèse	Lutte Control Législation	Taxonomie Génétique Physiologie	Stratégie de communication	Total
Articles dans des revues scientifiques internationales	25	29	12	11	10	27	0	114
Articles dans d'autres revues scientifiques	12	5	12	22	5	2	2	60
Chapitres de livre à plusieurs auteurs	1	0	10	4	2	0	2	19
Articles dans des actes de colloques scientifiques	57	51	60	15	37	23	7	250
Résumés dans des colloques scientifiques	13	5	5	7	0	3	0	33
Thèses et diplômes similaires	4	4	0	0	3	0	0	11
Mémoires de stages	17	12	1	7	6	6	3	52
Rapports scientifiques	8	0	19	22	16	0	0	65
Total	137	106	118	88	79	61	14	604

4.3. Les réseaux d'expertise et d'information

La production scientifique

Inconnue de Méditerranée il y a encore 15 ans, la souche aquariologique de *Caulerpa taxifolia* a suscité une forte mobilisation des chercheurs de nombreuses disciplines (Gravez *et al.*, 1999b ; Boudouresque *et al.*, 2002⁷² ; Silva, 2003). Les connaissances acquises sur cette espèce ont naturellement bénéficié aux recherches ultérieures sur la souche envahissante de *C. racemosa*.

Cette mobilisation s'est fait dans le cadre de programmes régionaux, nationaux et de deux programmes européens (§ 4.2) ; elle a notamment permis la collaboration, aux côtés des universités, de l'ensemble des grands organismes de recherche en France, en Espagne, en Italie, en Croatie, en Tunisie, en Californie et en Australie. Boudouresque *et al.* (2002) recensent ainsi plus de 520 personnes et 130 organismes de recherche impliqués dans des recherches sur la question.

Les résultats de ces différents travaux ont été présentés dans de nombreuses publications scientifiques (dont 114 dans des revues internationales à comités de lecture très sélectifs) ou lors de colloques internationaux (Tabl. III). Des rapports de synthèse ou des documents d'information ont en outre été réalisés à l'attention des décideurs. Les connaissances les plus utiles ou les plus importantes ont, enfin, été diffusées sous la forme de documents grand-public. En juin 2003, au total, plus de 737 documents grand-public et travaux scientifiques qui ont été réalisés sur le sujet.

72. Un moteur de recherche issu des mises à jour de ce travail bibliographique (Basecaul) est accessible sur le site du GIS Posidonie : <http://www.com.univ-mrs.fr/gisposi.htm>

De nombreuses réponses ont été apportées par l'ensemble de ces travaux sur la biologie et l'écologie de ces espèces, l'origine du phénomène, la cinétique de l'expansion, les risques pour l'homme, les activités humaines ou l'environnement et les stratégies du contrôle.

Il reste bien sûr des aspects encore inconnus et à préciser sur ces deux espèces de *Caulerpa*, sur l'évolution à long terme des milieux qu'elles colonisent et sur les moyens de contrôle. On peut toutefois considérer que les travaux futurs ne modifieront pas de manière fondamentale les grands traits de la connaissance actuelle du phénomène.

Les campagnes de sensibilisation sont elles efficaces ?

Le renouvellement régulier des campagnes d'information et de sensibilisation, sur des supports spécifiques, l'homogénéité des messages délivrés et le contact régulier avec les usagers concernés dans le cadre du programme *Caulerpa* Life II, sont des éléments qui ont augmenté la réceptivité du public aux messages délivrés. Pour le littoral de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, une interview des responsables des 86 ports de la région indiquait, en 1999, que la quasi-totalité d'entre-eux avait reçu de la documentation sur *Caulerpa taxifolia*, qu'ils étaient capable de reconnaître l'espèce (67-88% selon les départements) et avaient bien intégré (ainsi que les plaisanciers) les pratiques visant à limiter les risques d'expansions (Gravez *et al.*, 1999b).

Gravez *et al.*, (1999c) ont montré, sur la base des suivis cartographiques, que la plus grande partie des colonies (99%) de *Caulerpa taxifolia* avaient été découvertes puis signalées par des usagers sensibilisés au cours des campagnes d'information. Or, dans plus de 70% des cas, ces nouvelles colonies signalées présentaient des surfaces inférieures à 20 m², c'est à dire à un stade précoce de colonisation permettant, le cas échéant, des opérations de contrôle.

Les documents de sensibilisation du public

Parallèlement à cette importante production scientifique, les connaissances les plus utiles ou les plus importantes ont été diffusées sous la forme de documents grand-public. Boudouresque *et al.* (2002) recensent 115 documents différents pour la période 1991-2002. Ces documents sont généralement spécifiques à *C. taxifolia* et comportent plus récemment une partie consacrée à *C. racemosa*.

L'information et la sensibilisation des usagers de la mer et du grand public sont en effet apparues comme des outils primordiaux dans une stratégie de suivi et de ralentissement de l'expansion d'une espèce introduite (Cottalorda *et al.*, 1998 ; PNUE, 1998 ; IUCN-SSG, 2000 ; *cf.* encadré).

Pour *Caulerpa taxifolia*, ces actions de sensibilisation sont plus particulièrement ciblées vers les plaisanciers (petite navigation côtière de proximité, croisières de longue distance), les métiers de la pêche, les clubs de plongée et le tourisme estival.

Ainsi, entre 1991 et 2000, d'importantes campagnes de sensibilisation ont été réalisées dans le cadre des programmes européens et nationaux ; plus de 200 000 dépliants, affiches et vidéogrammes, en 8 langues, ont été diffusés auprès de la population littorale de 7 pays méditerranéens (Gravez *et al.*, 1999b). Ces opérations d'information et de sensibilisation sont actuellement pérennisées, en France, dans le cadre de l'Observatoire de suivi de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* où 50 000 dépliants sont diffusés annuellement (Meinesz *et al.*, 2001a). En Californie, comme en Australie, des dépliants similaires sont diffusés (Fig. 16).

Les objectifs de cette sensibilisation sont, d'une part, l'adoption de nouvelles pratiques en mer qui limitent les risques de dissémination par l'homme et, d'autre part, l'appel à la signalisation de nouvelles colonies lorsqu'elles sont découvertes. Ainsi, outre la présentation des *Caulerpa*, de la cinétique et des conséquences de leur expansion, et l'indication de l'absence de danger pour la santé humaine, deux messages principaux sont systématiquement délivrés : (i) "si vous la rencontrez, signalez-la !" et (ii) "évittez de la disséminer !" (Cottalorda *et al.*, 1998).

L'appel de Barcelone

Caulerpa taxifolia : Confirmation d'un risque majeur pour les écosystèmes littoraux de la Méditerranée

(...) Même si on ne peut encore prévoir toutes les conséquences de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* sur les milieux littoraux de Méditerranée, et même si certaines hypothèses venaient à ne pas être vérifiées, les données recueillies à ce jour confirment qu'il y a un risque majeur pour la biodiversité, les équilibres écologiques et les ressources exploitées. Les scientifiques font leur travail de recherche et prennent la responsabilité d'alerter les autorités. Il appartient maintenant aux gouvernements des pays concernés, ainsi qu'aux organismes internationaux en charge de l'Environnement (PNUE, Convention de Barcelone, UICN, etc.), de mettre en oeuvre le principe de précaution (dont fait état la Convention de Rio de Janeiro) et de définir une stratégie internationale cohérente adaptée au problème posé.

Appel des scientifiques du 1^{ère} programme international sur *C. taxifolia*, Barcelone le 16 Décembre 1994. (Ribera et al., 1996)



Figure 16. Exemples d'affiche et de dépliants distribués dans le cadre du programme Caulerpa Life II, de l'observatoire de suivi de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée et localisation des peuplements de *C. taxifolia* envahissants en Australie et du SCCAT en Californie.

Les documents adressés aux décideurs

Depuis l'origine de la mise en évidence du phénomène, un ensemble d'atlas sur l'expansion géographique de *C. taxifolia* ont été réalisés et diffusés entre 1991 et 2005. Ces documents, issus d'un système d'alerte, de validation puis de cartographie des colonies (probablement sans précédent en milieu marin), qui incrémentent le Système d'information Géographique du LEML-UNSA (Université de Nice-Sophia Antipolis), constituent des informations spatiales de première importance pour les décideurs et les élus locaux (Meinesz et al., 1991 ; Meinesz et al., 1993a ; Meinesz et al., 1994 ; Meinesz et al., 1995b ; Meinesz et al., 1997 ; Meinesz et al., 1998 ; Meinesz et al., 2001a ; Meinesz et al., 2002 ; Javel et al., 2005). Ces éléments sont aujourd'hui présentés sur le site internet C.O.L. (*Caulerpa OnLine*⁷³).

En **Californie**, où seuls deux sites sont concernés par le phénomène, les informations spatiales sont rares et seulement disponibles au sein des rapports du SCCAT (§ 4.2). En **Australie**, les seules informations spatiales disponibles sont celles de **Nouvelles-Galles-du-Sud** où les zones réglementées en raison de la présence de *C. taxifolia* sont présentées sur le site du *Primary Industries & Resources* (§ 4.1).

Dans la mesure où l'expansion des deux espèces de *Caulerpa* envahissantes a été considérée comme préjudiciables à l'environnement et aux activités humaines (cf. encadré "Appel de Barcelone"), des documents de synthèse avec des recommandations ont été réalisés à destination des décideurs. Dans ces documents, l'objectif était de dépasser le contenu des documents de sensibilisation grand-public, d'apporter les éléments sur la connaissance objective du phénomène, et de formuler des propositions pour la gestion

73. <http://www.Caulerpa.org>

du phénomène (généralement dérivées des recommandations d'Héraklion (§ 4.1). On peut notamment citer :

- "*Caulerpa taxifolia* : l'expansion d'une algue tropicale en Méditerranée – Conséquences pour l'environnement et les activités humaines" (Gravez *et al.*, 2001) ;
- "*Caulerpa taxifolia* – éléments de synthèse" (Gravez *et al.*, 2000 ; Fig. 17) ;
- "Eléments pour une stratégie de contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en région Provence-Alpes-Côte d'Azur" (Gravez *et al.*, 1998) ;
- "*Caulerpa taxifolia* : l'expansion d'une algue en Méditerranée... éléments de gestion de l'expansion des espèces envahissantes dans les aires marines protégées" (Bernard & Gravez, 2000).



Figure 17. La couverture du document « *Caulerpa taxifolia* – éléments de synthèse » (Gravez *et al.*, 2000), largement diffusé en région Provence-Alpes-Côte d'Azur auprès des élus et des administrations.

Le rôle joué par les médias

Outre les documents diffusés au grand public et aux décideurs, les médias ont joué un rôle crucial dans le transfert de l'information sur l'expansion de ces espèces envahissantes⁷⁴. Cette médiatisation a fortement renforcé le message des campagnes de sensibilisation précitées dans l'ensemble des pays concernés par le phénomène (Fig. 18). Toutefois, l'information a parfois été simplifiée, déformée, exagérée, voire transformée en polémique⁷⁵ par certains journalistes, ce qui a influencé négativement la perception du phénomène par les décideurs (Meinesz, 1997a, 1999 ; Matricardi *et al.*, 2001).

Pour la population du littoral français concernée par *C. taxifolia*, c'est la télévision (68%) et la presse écrite (41%) qui sont les sources principales d'information sur le phénomène (Bec *et al.*, 2002). Pour la seule presse écrite française, entre 1990 à 1999, on recensait plus de 700 articles parus sur le sujet (Fig. 18). En octobre 2005, le moteur de recherche Google⁷⁶ recensait 83 300 pages contenant le terme "*Caulerpa taxifolia*" et 26 100 pages contenant le terme "*Caulerpa racemosa*".

Pour cette population, Bec *et al.* (2002) ont mesuré un taux de "connaissance" important de l'espèce. Ainsi 84% des personnes interrogées avaient déjà entendu parler de "*Caulerpa taxifolia*" ou de "l'algue tueuse"⁷⁷ et parmi celles-ci 72% considéraient le phénomène comme "grave". Dans une analyse sur la représentation sociale du phénomène de l'expansion de *C. taxifolia*, les auteurs soulignent que la représentation est toutefois relativement peu structurée. Les attributs les plus évoqués et significatifs dans leur échantillonnage⁷⁸ étaient "expansion", "nuisible", "algue" et "algue tueuse" (Fig. 19).

74. Plus particulièrement de *Caulerpa taxifolia*, l'existence de *C. racemosa* n'a été signalée dans les médias que plus tard (vers 1997).

75. Des polémiques ont en effet été déclenchées sur le phénomène de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée mettant en doute l'origine de son introduction, son identité, l'expansion de ses peuplements ou son impact sur l'environnement. Cette polémique a culminé avec la publication dans le magazine de vulgarisation Science & Vie (déc. 1997) d'un article intitulé « Algues tueuses, le scandale écologique et financier ». On consultera le site du Centre de Sociologie de l'Innovation de l'École des Mines de Paris (Etude d'une controverse scientifique : *C. taxifolia*, 2000) (http://sistem.ensmp.fr/system1/controverse/elevés/Caulerpa_taxifolia/textes/acteurs/medias.html) et celui de l'association Méditerranée Vivante (<http://www.aquanaute.com/Caulerpa/news.html>) pour un développement.

76. <http://www.google.com>

77. Le terme d'algue tueuse, créé par un journaliste varois, puis largement repris par une grande partie de la presse, fait partie des exagérations malheureuses qui ont caractérisé l'information du public par les médias.

78. Etude réalisée sur un échantillon représentatif des Bouches-du-Rhône, du Var et des Alpes-Maritimes.

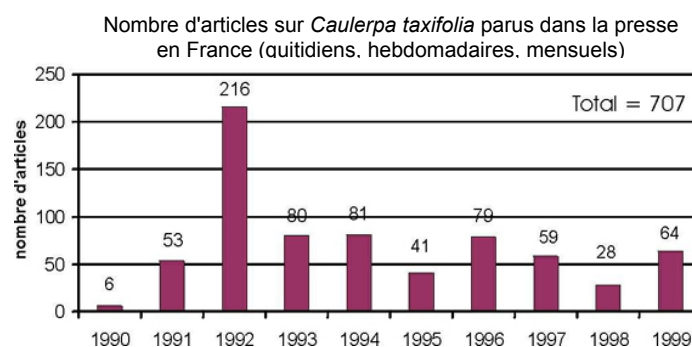
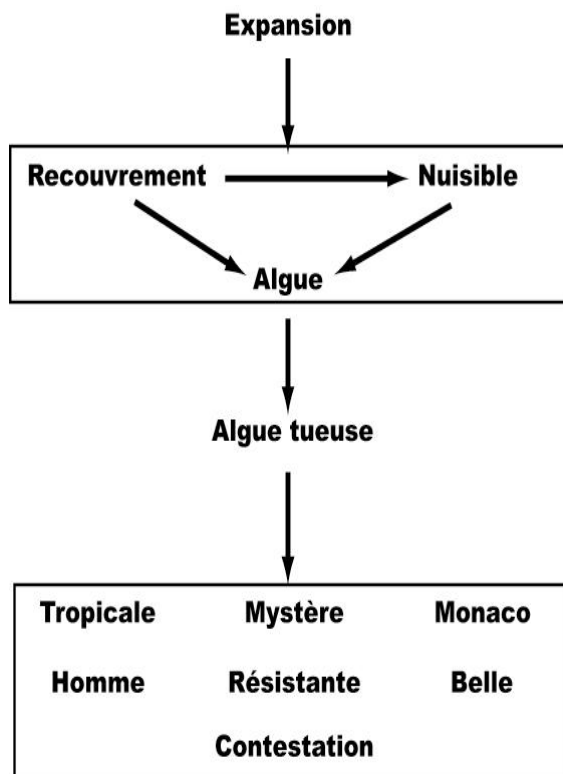


Figure 18. (Ci-dessus). Nombre d'articles de la presse écrite en France, entre 1990 et 1999, au sujet de *C. taxifolia*.

Figure 19. (A gauche). Structure de la représentation sociale du phénomène "*Caulerpa taxifolia*" pour la population des Bouches-du-Rhône, du Var et des Alpes-Maritimes (France), d'après Bec *et al.* (2002), redessiné.

4.4. Les méthodes de contrôle

L'éradication d'une espèce introduite consiste à éliminer totalement les individus et leurs propagules (graines, larves, oeufs, etc.) présents dans un site donné. Après une éradication réussie, l'espèce ne réapparaît que s'il y a nouvelle contamination (à partir d'un site non éradiqué) ou nouvelle introduction (à partir de la région d'où l'espèce est originaire). L'éradication d'une espèce introduite est toujours difficile, surtout en milieu marin, sauf si elle est réalisée à un stade très précoce de la colonisation (IUCN, 2000). C'est pour cette raison que la **prévention** (via l'information du public et les outils législatifs) revêt une importance capitale.

Le contrôle d'une espèce introduite consiste à limiter l'importance de ses populations à un niveau tel que ses effets négatifs sur l'environnement, la santé humaine et/ou l'économie soient ramenés à un niveau acceptable. Le contrôle est une opération récurrente. Il peut être **continu** dans le temps, ce qui maintient la population introduite à un niveau théoriquement stable. Le plus souvent, le contrôle est **discontinu** : une nouvelle opération de contrôle est réalisée quand la population de l'espèce introduite, qui se reconstitue naturellement, a dépassé le niveau acceptable.

Sans en être toujours conscientes, nos sociétés pratiquent le contrôle des espèces introduites depuis des siècles, parfois des décennies. Les rats, les cafards et cancrelats, beaucoup de "pestes" agricoles, etc. sont en effet des espèces introduites que l'on ne sait pas éradiquer, mais que l'on maintient en dessous du niveau acceptable, c'est à dire pour lequel le coût de la lutte n'est pas exagéré par rapport à la nuisance résiduelle.

Pour ce qui concerne les espèces envahissantes du genre *Caulerpa*, différentes méthodes ont été imaginées et testées dans le cadre des deux programmes de la Commission Européenne (*Caulerpa* Life I et *Caulerpa* Life II), avec comme objectif de déterminer la faisabilité de l'éradication, et le cas échéant du contrôle, des peuplements de *Caulerpa taxifolia*. D'autres méthodes ont été mises en œuvre de manière ponctuelle, dans le cadre d'opérations limitées en Méditerranée, Californie et Australie. L'ensemble de ces méthodes pourrait être applicable au contrôle des colonies de *C. racemosa*.

Comme pour toutes les tentatives de contrôle des espèces envahissantes, les interventions doivent être réalisées de manière extrêmement précoce. L'élimination partielle d'une colonie est inefficace en raison de la rapidité des repousses latérales. Ce facteur temps, entre le moment de la découverte de nouvelles colonies de *Caulerpa taxifolia* et celui de l'intervention pour leur contrôle, est un élément fondamental. Dans la plupart des cas, les nouvelles colonies signalées représentent une surface de quelques mètres carrés seulement (§ 4.3); l'investissement nécessaire à leur élimination croît ensuite proportionnellement à l'extension de la colonie. Sans intervention, l'expansion d'une nouvelle colonie devient critique après 2.5 ans de colonisation (Thibaut, 2001 ; Gravez *et al.*, 1999c ; *cf.* plus loin "modélisation") puis rapidement hors de contrôle.

De manière générale, pour toutes les méthodes physiques ou chimiques présentées ci-dessous, le succès d'une intervention dépend fortement de la nature du substrat. Les substrats meubles (sables, vases) et présentant peu d'anfractuosités sont ceux pour lesquels les meilleurs résultats ont été observés alors que les substrats durs ou les herbiers de Magnoliophytes ne permettent pas de garantir un succès total des interventions. Pour cette raison, les interventions requièrent des suivis systématiques⁷⁹.

Les périodes hivernales semblent être les périodes d'intervention optimale, au moins pour les méthodes mécaniques, dans la mesure où les chances de régénération des boutures de *Caulerpa* arrachées qui échappent aux intervenants y sont beaucoup plus faibles qu'en période de croissance (période estivale ; Ceccherelli *et al.*, 2001a ; Piazzini *et al.*, 2003).

La profondeur du site à traiter est également l'un des facteurs importants à prendre en compte car le temps d'intervention des plongeurs sous-marins diminue fortement avec la profondeur. Les interventions en milieu hyperbare sont strictement réglementées dans la plupart des pays (*cf.* encadré). Dans de nombreuses situations, ce poste représente une importante partie du coût de mise en œuvre des techniques.

Il n'existe pas encore de protocoles opératoires strictement définis et validés (contrainte des techniques utilisées, méthodes de cartographie, maîtrise du risque de dissémination, mise en œuvre des suivis) pour la mise en œuvre des opérations de contrôle. Quelques équipes possèdent toutefois l'expérience pour l'application de l'une ou l'autre de ces méthodes.

Arrachage manuel

L'arrachage manuel est également appelé "**micro-arrachage contrôlé**".

La facilité avec laquelle *Caulerpa taxifolia* se régénère à partir de fragments isolés rend délicat son arrachage manuel. L'éradication d'une colonie ne peut être effective que lorsque la totalité de la plante et de ses fragments (y compris les stolons et rhizoïdes dans le sédiment) a été effectivement enlevée de la zone traitée. Il s'agit donc, sur le terrain, d'effectuer une opération très méticuleuse d'extraction de la plante et de son substrat tout en veillant à ne disséminer aucun fragment.

Le succès de cette méthode dépend fortement de la nature du substrat : sur un substrat meuble (sable, vase, matelote morte de Posidonie), c'est la totalité du substrat de *Caulerpa* qui doit être découpée autour de la colonie sur une dizaine de centimètres d'épaisseur, afin de garantir que l'ensemble des parties enfouies dans le sédiment soit enlevé (Fig. 20). Sur un substrat qui présente de nombreuses anfractuosités (comme l'herbier de Posidonie ou la roche), le succès des opérations est, en revanche, incertain. Sur substrat dur, l'opération est parfois facilitée par l'utilisation d'un marteau et d'un burin (Riera *et al.*, 1994). Dans tous les cas, des retours sur sites sont nécessaires ; ils permettent d'enlever les repousses qui apparaissent de manière assez systématique.

Le rendement moyen de l'arrachage manuel est d'1 à 3 m² de *Caulerpa taxifolia* par heure et par plongeur (Avon *et al.*, 1994 ; Riera *et al.*, 1994 ; Cottalorda *et al.*, 1996 ; Robert & Gravez, 1998 ; Grau *et al.*, 1998 ; Zuljevic & Antolic, 2001a, 2001b ; Relini *et al.*, 2001a).

L'arrachage manuel n'est pas une technique susceptible d'être utilisée sur de grandes surfaces ; il a été mis en œuvre aux Baléares, en Croatie, en Italie et en France pour le contrôle de taches de *C. taxifolia* de petite taille ou en complément à d'autres techniques. Il a également été utilisé sur certains sites de plongée sous-marine où l'enlèvement minutieux des stolons isolés, identifiés par les clubs de plongée, a certainement

79. Il est à noter que cet aspect récurrent caractérise toutefois toutes les interventions de l'homme, en milieu continental comme en milieu marin : lutte contre les incendies de forêts, élimination de la Jussie dans les eaux douces, lutte contre les marées noires, etc.

permis de ralentir l'implantation et l'expansion de *C. taxifolia* (Meinesz *et al.*, 1997). Il existe, en France, un protocole opératoire recommandé par le Parc national de Port-Cros.

L'incidence des contraintes de la plongée sous-marine dans la mise en œuvre des techniques de lutte

Les techniques de lutte que nous passons en revue, à l'exception de la lutte biologique, font appel à la plongée sous-marine. Ce travail en immersion (hyperbare) est encadré, pour la sécurité des intervenants, par des procédures strictes d'intervention qui limitent le travail en fonction notamment, de la profondeur du chantier et de la durée d'immersion*.

De manière générale, la durée d'intervention d'un plongeur sous-marin, sur un chantier, ne doit pas excéder trois heures par jour (6 heures le cas échéant, sous certaines conditions, pour les activités scientifiques). En raison de la saturation des tissus en gaz dissous lors des activités hyperbares, susceptible de provoquer des accidents, la durée des immersions doit être modulée en fonction des profondeurs d'intervention. A chacune des profondeurs correspondent ainsi des durées maximales d'intervention qui grèvent le temps de l'intervention et celui de l'éventuelle plongée suivante dans la journée (deux plongées successives au maximum par jour). A titre d'exemple, l'intervention sur des fonds inférieurs à 9 m de profondeur ne sera pas limité dans le temps (dans la limite des 3 heures journalières légales). Pour le même travail effectué à 20 m de profondeur**, le plongeur sera obligé, au bout d'une heure, de gréver son temps d'intervention par 15 minutes de palier de décompression à -3 m. Il ne lui sera ensuite possible, après 3 heures de repos, d'effectuer qu'une intervention n'excédant pas 50 minutes (après laquelle il devra respecter 30 minutes de palier). Il aura ainsi réalisé 1 h 50 min de travail effectif dans la journée.

L'incidence de ce qui précède sur le coût final de la mise en œuvre des méthodes est loin d'être marginal pour une main d'œuvre coûteuse ($\approx 300-600 \text{ €} \cdot \text{d}^{-1}$ pour un plongeur et sa logistique de base) et qui ne peut intervenir qu'en équipe (trois personnes au minimum). Ainsi donc, outre les rendements et contraintes logistiques associés aux techniques elles-mêmes, la dimension financière d'un chantier sous-marin sera fortement dépendant de ces paramètres (profondeur, organisation du travail, temps d'intervention).

*en France, ces procédures sont encadrées par le décret n°90-277 du 28.03.1990 relatif à la protection des travailleurs intervenant en milieu hyperbare.

** Les exemples sont donnés pour des plongées à l'air comprimé. L'utilisation d'autres mélanges gazeux par les plongeurs professionnels leur permet d'optimiser, dans une certaine mesure, le temps d'intervention et leur sécurité



Figure 20. Un arrachage manuel de *Caulerpa taxifolia* dans la baie de Port-Man (Parc national de Port-Cros, Var, France). Au premier plan, en jaune, une balise matérialise le site d'intervention pour les suivis ultérieurs. Photographie A. Rosenfeld, Photocéan©.

Suceuses hydrauliques

Les suceuses hydrauliques sous-marines ont été utilisées en Espagne, en Croatie, à Monaco et en Australie du Sud. Elles permettent d'opérer sur des surfaces plus importantes que l'arrachage manuel, par l'aspiration et le stockage dans un conteneur de la plante et son substrat. Cette opération présente un rendement bien supérieur à l'arrachage manuel (14 à 37 m² par heure ; Gravez *et al.*, 1999b), mais nécessite une logistique lourde (notamment une pompe, un groupe électrogène en surface et des conteneurs de récupération) et apparaît, en outre, comme beaucoup moins efficace : de nombreux fragments sont laissés sur place et parfois même disséminés autour du site traité (Zuljevic & Antolic, 2001a, 2001b ; T. Belsher, comm. pers. *In* Gravez *et al.*, 1999b). Cette méthode n'est donc vraiment efficace que sur substrats meubles (vase, comme

dans le port de Malinska, Croatie, Zuljevic & Antolic, 1999). Cette technique entre plutôt dans le cadre d'une stratégie de ralentissement de l'expansion, comme c'est le cas aux Baléares, où les campagnes de contrôle à l'intérieur des baies contaminées sont annuelles (Grau *et al.*, 1996, 1998). A Port River, en Australie du Sud, où la zone affectée est de 3 ha, un traitement par succion a été réalisé en mars 2003. 22 000 m² ont été traités, résultant en une extraction de 414 t de sédiment et de *C. taxifolia*⁸⁰. Le succès éventuel de cette opération devra être confirmé par des suivis ultérieurs.

Les suceuses hydrauliques ont également été utilisées en Croatie, en soutien de l'arrachage manuel ; les peuplements ne sont pas extraits par la suceuse elle-même mais permettent d'évacuer les parties de *Caulerpa* arrachées manuellement (Zuljevic & Antolic, 2001a).

Couverture des peuplements par bâches opaques

Une troisième méthode a également été utilisée en Croatie : les colonies de *Caulerpa taxifolia* sont recouvertes de films PVC opaques maintenus du fond (Fig. 21). Installés au début de l'hiver, ils sont laissés en place durant trois mois, jusqu'à la mort des colonies recouvertes. Cette méthode ne peut toutefois être utilisée que dans des sites faiblement agités où les films, lestés et fixés au niveau du fond, ne peuvent pas être arrachés par les tempêtes hivernales. L'installation des films est aisée en plongée sous-marine (de l'ordre de 15 m²/heure) ; c'est leur fixation sur le fond qui représente la tâche la plus importante. Il est à noter qu'il n'a pas été observé d'impact négatif sur les herbiers à *Posidonia oceanica* ainsi recouverts lors des opérations réalisées en Croatie (A. Zuljevic, comm. pers, *in* Gravez *et al.*, 1999b). Cette méthode, qui s'inscrit dans le cadre de la stratégie de ralentissement de l'expansion et de contrôle des taches de grandes envergure, a été considérée comme particulièrement efficace, en raison de l'absence de repousses, en Croatie, dans la baie de Stari Grad (Zuljevic & Antolic, 2001a).



Figure 21. Mise en place d'une bâche opaque sur une colonie de *Caulerpa taxifolia*. Photographie V. Gravez®.

Epannage de chlore

La Californie a adopté une politique agressive pour l'éradication des colonies de *C. taxifolia* découvertes. La méthode initialement retenue était le confinement des colonies sous des bâches de PVC sous lesquelles était injectée une solution de chlore (5%). La méthode a ensuite été modifiée et c'est sous forme solide que le chlore est maintenant déposé sous les bâches, sur les colonies traitées (tablettes de chlore de 2.5 cm de diamètre avec une densité de 108 tablettes par m²). Cette méthode ne peut être utilisée que dans des sites où la faible agitation des eaux garantit la bonne tenue des bâches sur le fond.

Entre juin 2000 et avril 2003, 8 campagnes de suivis et/ou de contrôle des repousses avec cette méthode ont été réalisées. Les derniers suivis ne permettent pas de détecter de nouvelles repousses (Fig. 22). La principale station de *C. taxifolia* de Californie serait donc effectivement éradiquée^{81, 82}.

A Huntington harbor, le second site colonisé en Californie, des opérations similaires ont été menées dès 2002. On note que l'impact de la méthode sur les peuplements indigènes n'a pas été documenté. Les retours sur site ont permis de détecter de nouvelles repousses en septembre et novembre 2002. Un nouveau traitement a alors eu lieu et en septembre 2004 les recherches n'ont pas permis de trouver de nouveaux individus de *C. taxifolia*. En 2005, l'opération d'éradication a été jugée comme un succès, mais la surveillance continue. Au total, les opérations d'éradication auront coûté 5 MUS\$.

80. <http://www.pir.sa.gov.au/dhtml/ss/section.php?sectID=1373&templD=3> - Primary Industries & resources of South Australia show case.

81. http://www.swrcb.ca.gov/rwqcb9/programs/Caulerpa/Caulerpa_files/Fall%202002%20Report.pdf - SCCAT autumn 2002 control report.

82. <http://www.calcoast.org/news/wetlands041803a.html> - Site web du California Coastal Coalition. - Scientists say second survey finds no sign of « killer algae ».

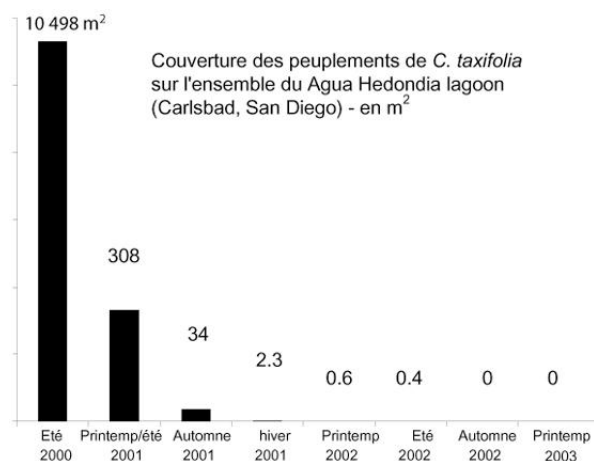


Figure 22. Résultats des campagnes pour l'éradication de *C. taxifolia* à Agua Hedondia (Carlsbad, San Diego county) entre l'été 2000 et avril 2003. Surface des peuplements en m². (données Merkel & Associates pour le SCCAT, mises à jour avec les données de California Coastal Coalition, avril 2003).

Usage de l'ion cuivrique

Certaines techniques utilisent les propriétés **algicides** de l'ion cuivrique (Cu^{++}), déjà utilisé depuis longtemps en agriculture (la "bouillie bordelaise"). Ces propriétés s'expriment, au niveau des peuplements, par une action rapide à faible concentration sur la photosynthèse et une action plus faible sur la respiration. En raison de la toxicité de cet élément pour l'environnement, les chercheurs du **LMPM** de Montpellier⁸³ ont pu mesurer expérimentalement, dans le cadre du programme *Caulerpa* Life II, le haut degré de sensibilité de *Caulerpa taxifolia* au cuivre⁸⁴ (un seul gramme suffit pour tuer 10 kg de *C. taxifolia*, en masse humide), en comparaison avec d'autres espèces végétales méditerranéennes (Uchimura *et al.*, 1998 ; Uchimura, 1999 ; Bonnal *et al.*, 2001).

Les opérations de contrôle en situations réelles, réalisées dans le cadre de tests de validation des méthodes (programme *Caulerpa* Life II) ou d'opérations locales de contrôle sur des surfaces réduites n'impliquent, de fait, qu'un enrichissement très localisé du milieu en cuivre. En effet, la spéciation chimique du cuivre montre qu'au pH de l'eau de mer (8.1), moins de 1% de la quantité totale de cuivre se trouve sous la forme libre Cu^{++} qui est la seule responsable de la toxicité de cet élément. Par ailleurs, de nombreux ligands, d'origine organique, sont également présents dans le milieu marin qui forment avec le cuivre des complexes stables diminuant ainsi la biodisponibilité et, par conséquent, la toxicité de cet élément dans le milieu (Gavach *et al.*, 2001). A ce sujet, saisi par le comité de pilotage du plan français relatif à *Caulerpa taxifolia*, la commission d'évaluation de l'écotoxicité des substances chimiques du Ministère français chargé de l'environnement a émis un avis sur les procédés libérant des ions cuivriques pour lutter contre *C. taxifolia*. Cette commission estime ainsi que deux des procédés peuvent être utilisés provisoirement (lorsque l'arrachage manuel n'est pas possible), à condition : (i) de rester en deçà des 37 mg de cuivre total par kg de sédiment, en poids sec, au terme d'une année et, (ii) que soient réalisés des suivis de la contamination en cuivre du milieu et de l'impact à long terme sur la faune et la flore⁸⁵.

Plusieurs équipes travaillent au développement des méthodes qui permettent le contrôle des peuplements de *Caulerpa* tout en maîtrisant l'apport en ion cuivrique au niveau des colonies traitées. La sélectivité de ces méthodes est généralement vérifiée et les enrichissements en cuivre, mesurés dans les sédiments, sont généralement de faible ampleur. L'utilisation des méthodes cuivriques en situations réelles a permis des éradications effectives, démontrant leur efficacité. Aucune de ces méthodes ne garantit un succès total et définitif lors de leur première mise en œuvre et des retours sur site sont indispensables.

La méthode **des Couvertures au cuivre** utilise des couvertures de polymère lestées dont l'une des faces, couverte d'un textile diffuseur, est saturée d'une solution de sulfate de cuivre qui diffuse au contact des colonies à traiter (Gavach *et al.*, 1998 ; Bonnal, 1999 ; Bonnal *et al.*, 2001). Les couvertures (2 m² qui peuvent facilement être découpés en « patch » plus petits pour le traitement de stolons isolés) sont

83. Laboratoire Matériaux et Procédés Membranaires, Université de Montpellier II/CNRS..

84. Plus récemment, Thake *et al.*, (2003) ont mis en évidence la grande sensibilité de *Caulerpa taxifolia* à l'ion aluminium également.

85. Commission d'évaluation de l'écotoxicité des substances chimiques. - Avis relatif aux risques pour l'environnement marin liés à la libération d'ions cuivriques destinés à détruire l'algue *Caulerpa taxifolia*, 14 novembre 2002. <http://www.environnement.gouv.fr/actua/cominfos/dosdir/DIRPPR/prodchimiques/14112002-avis-ionscuivriques-vs-Caulerpa.htm>. Cet avis porte sur l'électrolyse au cuivre et l'application de couvertures membranaires.



simplement posées au niveau des colonies à traiter en début d'après-midi et laissées en place jusqu'au lendemain matin (Fig. 23).

Figure 23. Mise en place d'une couverture au cuivre le long de la côte de Porquerolles. Photographie A. Rosenfeld, Photocéan©.

Cette méthode, développée par le LPM de Montpellier et commercialisée par la société Médintec⁸⁶, est actuellement utilisée en routine par le Parc national de Port-Cros (§ 4.2) et des opérations

punctuelles ont été réalisées pour la ville de Ste Maxime (Var, France ; M. Combes, Médintec, comm. pers.). Ces couvertures au cuivre ne sont applicables qu'une seule fois sur les peuplements à traiter et doivent être ensuite rechargées avant toute nouvelle application. Un système de recharge autonome, permettant aux intervenants l'utilisation des couvertures en roulement, a été développé. Ce système a été mis au point pour une utilisation en routine dans le Parc national de la Maddalena en Sardaigne (J.C. Combes, Médintec, comm. pers.).

L'avantage de ces couvertures de polymère réside dans leur facilité de transport par des plongeurs autonomes et la possibilité de les appliquer sur des substrats très variés (parois rocheuses à forte déclivité notamment). Elles sont cependant relativement peu adaptées à des traitements dans les herbiers de phanérogames (Gravez *et al.*, 1999b).

Les Cuves Electrolytiques Virtuelles

Il s'agit d'enceintes composées d'électrodes (anode et cathode en cuivre) qui, une fois mises sous tension, réalisent un bain électrolytique traversé par les ions cuivre (Jaffrenou & Oudon, 1994, 1996, 1998). Le bain électrolytique lui-même est réalisé *in situ* au sein d'une enceinte (le CEV, Cuve Electrolytique Virtuelle) qui permet de confiner les colonies traitées. Le CEV permet de traiter une surface de 0.4 m² en 2 minutes (pour la version CEV 50EP). Les CEV sont déclinés en deux versions : le CEV50EP, qui nécessite une logistique de surface (ombilicaux reliés aux générateurs électriques) et qui permet un traitement en continu, et le CEV multi 20 (Fig. 24) qui est autonome et autopropulsé, plus adapté à des petites colonies isolées. Ces engins nécessitent généralement des substrats relativement plans et permettent une utilisation au sein d'herbiers de phanérogames. Cette méthode, développée par la Sarl BiotechnEau⁸⁷, a été utilisée en France dans le Parc national de Port Cros pour le contrôle de *C. racemosa* (Robert, 2001), à Cavalaire dans le cadre du SIVOM du littoral des Maures (LHMA – SORIS/SIVOM du Littoral des Maures, 1999), au Pradet ainsi qu'aux Baléares, à Cala d'Or, Portocolom et Portopetro pour le contrôle de *C. taxifolia* (MM. Jaffrenou et Grau, comm. pers.).

La diffusion de sulfate de cuivre en solution. Il s'agit de diffuser une solution de sulfate de cuivre suffisamment saturée en chlorure de sodium pour que l'augmentation de sa densité permette le confinement sur le fond au niveau de la colonie traitée (Charrin *et al.*, 2001). La solution est également colorée afin de suivre la diffusion de l'algicide dans les peuplements traités. Cette solution est réalisée à bord de l'embarcation de surface et injectée sur les peuplements traités par les plongeurs, grâce à un système de flexibles. Il a été estimé que le temps nécessaire à l'action de la solution était de l'ordre de 30 min à 1 heure. La sensibilité de la méthode aux conditions hydrodynamiques a également conduit à développer des systèmes de cloches de confinement. Cette méthode développée par M. J.P. Charrin⁸⁸ a été testée en différents sites dans le Var. En régime établi, on peut estimer qu'une équipe de 2 plongeurs (plus une personne sur l'embarcation de surface) peut traiter de l'ordre de 40 m² par heure (Gravez *et al.*, 1999b). Cette méthode est essentiellement destinée à être utilisée sur fonds plans, subhorizontaux et dans une zone peu agitée. Elle permet un traitement au sein d'herbiers de phanérogames.

86. Société Médintec, 8 rue du tilleul, 34290 Leurian-les-Béziers, France. Contact, M. J.C. Combes. combes.darolles@wanadoo.fr,

87. Société BiotechnEau, 255 allée des Acacias-Port d'Alon, 83270 St Cyr sur Mer. caulerpexit@hotmail.com - <http://www.biotechnEau.fr.st>

88. Distribué par les Etablissement Perret SA, ch. Deslimites, quartier l'étang nord, 30330 Tresques. <http://perso.club-internet.fr/lebel/index.htm>



Figure 24. Le CEV multi 20, Cuve Electrolytiques Virtuelles, modèle autopulsé. Document B. Jaffrenou, TechnEau®

Épandage de sel



Parmi les techniques susceptibles d'aider au contrôle des peuplements de *Caulerpa taxifolia*, l'épandage de sel de mer a été imaginé par la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est⁸⁹ (Fig. 25). Des tests en laboratoire et *in situ* ont été réalisés (Escoubet *et al.*, 1998 ; Gravez *et al.*, 1999b).

L'hypothèse la plus probable sur l'action de l'épandage de sel sur les peuplements de *C. taxifolia* est que l'importante augmentation de la concentration en sel de l'eau environnant le peuplement, et les phénomènes d'osmose qui en résultent, induisent une **plamoslyse** vidant l'algue coenocytique de son eau et provoquent ainsi sa mort.

Figure 25. Le produit Algolimit® conditionné en sac plastique de 20 kg. Photographie V. Gravez©.

La plupart des tests réalisés *in situ* avec des concentrations ≥ 20 kg.m² ont montré lors des suivis une disparition, au moins partielle, de *C. taxifolia*, sur les zones traitées ainsi que le lessivage de la couche de sédiment meuble piégé par les frondes et stolons. Les conditions d'épandage jouent cependant un rôle important sur le succès de la méthode (Meinesz *et al.*, 1997). Les épandages réalisés sous bâches ou cloches de confinement se sont avérés sans effet. De plus, la méthode n'est pas dénuée de risque de dissémination de l'algue lorsque seule la base des peuplements est impactée (Gravez *et al.*, 1999b).

En **Nouvelles-Galles-du-Sud** (Australie), cette méthode a été utilisée en conditions réelles (§ 4.2). Les résultats de ces opérations ne sont pas connus, même s'ils sont jugés satisfaisants par les maîtres d'œuvre.

Autres méthodes développées

Afin d'être exhaustif sur les méthodes de contrôle, il convient de citer d'autres méthodes physico-chimiques imaginées et testées en laboratoire ou *in situ* pour la lutte contre *Caulerpa taxifolia* comme le faucardage, le chalumeau, la carboglace, la dénaturation par eau chaude ou l'utilisation d'ultrasons. Ces méthodes, généralement testées dans le cadre du programme européen *Caulerpa* Life I, ont finalement été abandonnées (Avon *et al.*, 1994, Avon *et al.*, 1996, Gravez *et al.*, 1999b).

89. Un brevet a été déposé pour la France par la Compagnie des Salins (BP 84, 30220 Aigues-Mortes, France ; <http://www.salins.com>) et un produit, conditionné par sac plastique, a été sélectionné : Algolimit®.

La lutte biologique

A côté des méthodes physiques ou chimiques, une autre voie de recherche est la lutte biologique, c'est-à-dire la limitation des peuplements de l'espèce envahissante par un organisme vivant (un agent de lutte), par exemple un consommateur (Meinesz, 1997b ; IUCN-SSG, 2000 ; Anonyme, 1997). Il faut souligner que la lutte biologique ne vise pas à la destruction définitive des peuplements ciblés, les consommateurs abandonnant la ressource avant son épuisement total, mais à leur réduction. Cette méthode de lutte est utilisée, avec des succès divers, dans le milieu continental, pour la protection des cultures ou des espaces naturels face à des espèces considérées comme nuisibles.

Il n'existe actuellement (Meinesz & Thibaut, 1998 ; Meinesz, 1997b) que 4 projets de lutte biologique en mer (contre le cténophore *Mnemiopsis leidyi* en Mer Noire et Mer d'Azov, contre le crabe européen *Carcinus maenas* en Australie, Tasmanie et Amérique du nord, contre l'étoile de mer *Asterias amurensis* en Tasmanie, et contre *C. taxifolia* et *C. racemosa*).

Les risques liés à la lutte biologique existent. Le bilan des luttes biologiques réalisées entre 1890 et 1985 en milieu continental (Simberloff & Stiling, 1996 cités par Thibaut, 2001) montre que les échecs enregistrés tiennent essentiellement à l'introduction d'agents généralistes dont la spécificité à la cible n'avait pas été suffisamment évaluée. Sur un total de 679 espèces exotiques utilisées pour la lutte biologique, 243 ont établi des populations (sont donc devenues introduites) et 20 ont été reconnues comme s'attaquant à des espèces non ciblées, causant ainsi un nouveau problème environnemental ou économique.

Un protocole visant à encadrer les projets de lutte biologique contre les espèces envahissantes en milieu marin a été mis en place par l'ICES (ICES, 1995) ; il est recommandé par la FAO et l'IUCN (FAO, 1996 ; IUCN-SSG, 2000). La spécificité de l'espèce que l'on envisage d'utiliser vis-à-vis de l'espèce envahissante cible est un préalable indispensable à sa sélection comme possible agent de lutte. Les risques potentiels engendrés par un lâcher de l'agent doivent être évalués au préalable (ICES, 1995 ; Carlton, 1997 ; Thibaut, 2001 ; Boudouresque, 2001) :

- Les risques de modification des stratégies alimentaires vers d'autres espèces que l'espèce cible.
- Les risques d'introduction de pathogènes ou de parasites associés à l'espèce utilisée.
- Les risques de compétition avec les espèces indigènes.
- La dispersion de l'espèce utilisée pour la lutte biologique hors de l'aire d'introduction d'origine.

L'étude des potentialités de l'agent de contrôle doit ensuite s'articuler autour de l'évaluation de sa capacité à s'acclimater aux conditions de son aire d'introduction et de son efficacité comme agent de contrôle.

En Méditerranée, les espèces de *Caulerpa* envahissantes sont peu consommées par la faune indigène et, parmi les organismes qui les broutent occasionnellement, aucun n'a pour l'instant établi de populations suffisamment importantes pour en limiter l'expansion ; ils peuvent même en augmenter la dissémination (Boudouresque *et al.*, 1996a ; Thibaut & Meinesz, 2000 ; Thibaut, 2001 ; Zuljevic *et al.*, 2001c ; Ruitton *et al.*, sous presse). C'est dans les mers tropicales que deux Mollusques Ascoglosses, *Elysia subornata* et *Oxynoe azuropunctata*, consommateurs habituels et exclusifs d'espèces du genre *Caulerpa*, ont été découverts et étudiés dans le cadre de la lutte biologique depuis 1994 par le **LEML-UNSA**. Les études sur la biologie, l'écologie, la stratégie de reproduction et le développement des populations de ces espèces ainsi que la modélisation d'opérations de contrôle ont montré qu'elles pourraient constituer un agent de lutte efficace pour le contrôle biologique (Burtaire, 1997 ; Thibaut, 2001 ; Thibaut *et al.*, 2001a, 2001b).

Plus particulièrement, *Elysia subornata* (Fig. 26) semble être le meilleur candidat pour de telles opérations de contrôle. Cette espèce a un développement benthique qui permet l'établissement rapide de populations denses localement et présente le plus important taux de consommation de *C. taxifolia* de tous les Ascoglosses étudiés. Cette espèce montre toutefois une forte dépendance à la température de l'eau. Elle arrête notamment de se reproduire en dessous de 21°C et meurt en dessous de 15°C. En Méditerranée nord-occidentale, cette espèce ne pourrait donc pas établir, *a priori*, des populations denses et pourrait être utilisée comme agent de lutte uniquement durant la période estivale.

90. Le Conseil International pour l'Exploration de la Mer (CIEM ou ICES en anglais), est une organisation intergouvernementale, créé en 1902, traitant des sciences marines couvrant l'Océan Atlantique et ses mers adjacentes. Le CIEM est basé au Danemark. Malgré la restriction géographique inscrite dans ses statuts, ses travaux sont reconnus internationalement.



Figure 26. Le mollusque Ascoglosse *Elysia subornata*, possible agent de lutte contre *Caulerpa taxifolia*. Photographie A. Meinesz®.

Les analyses et expérimentations sur les risques d'une introduction de cet agent de lutte montrent (Thibaut, 2001) que : (i) La seule espèce qui pourrait être consommée en dehors de *C. taxifolia* et *C. racemosa* serait *C. prolifera* (l'espèce indigène en Méditerranée). Les populations des autres *Caulerpa* de Méditerranée sont situées dans le bassin oriental, et sont par ailleurs introduites. (ii) Le risque de compétition pour la ressource avec les autres espèces d'Ascoglosses consommatrices de *Caulerpa* peut être écarté dans la mesure où la lutte biologique n'aboutit pas à la destruction des peuplements ciblés, mais à leur limitation. (iii) Le risque d'introduction de pathogènes éventuels avec l'agent de contrôle peut être réduit par la culture en milieu **axénique** des agents à partir de pontes

(ce qui est le cas pour les individus actuellement étudiés). (iv) Les risques de dispersion des larves issues des agents de lutte biologique vers d'autres régions de Méditerranée, ou d'autres mers, sont faibles dans la mesure où les larves présentent une vie benthique avec un déplacement localisé. Toutefois, ce risque ne peut pas être écarté.

Outre les risques sur le milieu naturel liés à l'introduction de cet agent de lutte, les études doivent garantir que le broutage des espèces de *Caulerpa* envahissantes⁹¹ serait suffisant pour permettre un ralentissement de leur expansion ou même une réduction de leurs populations (Meinesz & Thibaut, 1998). Ceci a été réalisé au moyen de la modélisation (cf. ci-dessous) mais devrait être confirmé en mésocosme.

Malgré les avancées réalisées sur la possibilité de la lutte biologique contre les espèces de *Caulerpa* envahissantes en Méditerranée, avec des données expérimentales qui semblent satisfaire au protocole de l'ICES (ICES, 1995), les expertises ultérieures (en mésocosme) et autorisations préalables à l'introduction de tels agents de lutte constitueront probablement les écueils les plus importants à la mise en œuvre de la méthode. Une expertise internationale à ce sujet, demandée en 1995 au Ministère français chargé de l'environnement, avec comme objectif de comparer les risques et les avantages d'une éventuelle utilisation d'agents biologiques pour lutter contre *Caulerpa taxifolia*, est restée sans suite et n'a pas été considérée comme nécessaire (Meinesz, 1999).

Les modèles informatiques comme outils du contrôle

Modèle d'expansion. Un modèle prédictif de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* (SimCt) a été développé dans le cadre du Programme *Caulerpa* Life II par une équipe pluridisciplinaire de biologistes, biologistes marins, modélisateurs et informaticiens. Ce modèle est basé sur le couplage d'un Système d'Information Géographique (SIG) et d'une simulation aléatoire à événements discrets (SAED) qui permet la gestion de l'espace, du temps et des phénomènes de compétition avec les espèces autochtones, ce qui est fondamental dans le cadre de l'expansion des espèces envahissantes. Les paramètres principaux considérés par le modèle sont physiques (bathymétrie, types de substrats), physico-chimiques (force et direction des courants, température des eaux) et biologiques (types de peuplements autochtones, vitesse de croissance de *C. taxifolia*, importance du fractionnement et degré de succès du bouturage, dispersion des fragments, variation de biomasse) (Hill, 1997). Le calage et la validation de ce modèle ont été réalisés par rapport à des stations de référence suivies depuis le début de l'invasion (Vaugelas de *et al.*, 1998 ; Thibaut, 2001).

Les répliques de modélisation permettent de réaliser des cartes présentant les probabilités les plus importantes, pour chacune des positions étudiées, pour un jeu de paramètres défini (scénario). Ce modèle a montré son efficacité et permet de simuler l'expansion de *C. taxifolia* avec un certain degré de réalisme dès

91. En effet, l'espèce consomme également *C. racemosa*, ce qui est connu de ses régions d'origine et a été vérifié expérimentalement (Thibaut, 2001). L'espèce pourrait donc également constituer un agent de contrôle contre *C. racemosa*.

l'instant où la bathymétrie et les différents types de substrats sont connus. Ce modèle présente toutefois des limites spatiales et temporelles. Des simulations de sites de taille supérieure à 10 km nécessiteraient la prise en compte des facteurs anthropiques de dissémination et, au-delà de 5-6 ans de simulation, le modèle commence à montrer des divergences avec les observations de terrain (Vaugelas *et al.*, 1998 ; Hill *et al.*, 1998 ; Thibaut, 2001).

Ce modèle a été utilisé pour des simulations des colonies de *C. taxifolia* dans la baie de Port Man, à Port-Cros, afin d'évaluer les risques d'expansion en cas d'arrêt des opérations d'arrachage des colonies dans cette baie (Thibaut *et al.*, 1999). Les jeux de simulations soulignent l'importance qu'il y a à poursuivre l'effort du contrôle sous peine d'aboutir à une situation incontrôlable à court-terme.

Modélisation de la lutte biologique. Afin de tester les potentialités de l'introduction d'un agent biologique de lutte contre *Caulerpa taxifolia*, le mollusque d'origine tropicale *Elysia subornata*, un modèle de simulation a été développé (Coquillard *et al.*, 2000 ; Thibaut, 2001 ; Thibaut *et al.*, 2001b). Ce modèle, nommé ELYSIA, prend en compte la distribution spatiale et la croissance de *C. taxifolia*, la distribution spatiale, la taille de la population, la croissance, la reproduction, l'alimentation et le déplacement pour la recherche de nourriture de *E. subornata* ainsi que les conditions de température de l'eau.

Les simulations réalisées sur la base des données disponibles sur la lagune du Brusç (Var, France), choisie comme atelier virtuel, donnent des résultats encourageants sur les potentialités d'*E. subornata* comme agent de lutte. Elles confirment que les résultats obtenus dépendent fortement des conditions de température, puisqu'elles influent directement sur la survie (réduite à la période estivale), la reproduction et la consommation de l'agent de lutte biologique. Dans l'état actuel des connaissances, cette méthode consisterait donc en un traitement récurrent nécessitant une introduction annuelle des agents de lutte biologique et visant à maintenir un niveau de prédation suffisant sur les colonies ciblées. L'une des pistes d'amélioration de la méthode viserait à la découverte d'une souche d'*E. subornata* plus résistante aux minima de températures de Méditerranée. Si ces simulations permettent de définir et d'ajuster un grand nombre de paramètres pour d'éventuelles opérations de lutte biologique (*e.g.* taille des inoculas, la période et les techniques de dispersion, etc.), des expérimentations en situation réelle, en mésocosme, s'avèreraient maintenant indispensables.

5. La situation particulière du Parc national de Port-Cros

En France, les seuls contrôles effectivement réalisés de manière systématique sont le fait d'une politique volontaire du Parc national de Port-Cros (PNPC), où un système de prospection active des sites sensibles (essentiellement 120 ha de zones de mouillage) et de contrôle des taches découvertes est réalisé chaque année par le personnel du Parc en collaboration avec les clubs de plongées et les scientifiques (Robert & Gravez, 1998).

A la suite des opérations de surveillance systématique organisées, avec le concours des clubs de plongée signataires de la "Charte de plongée", plusieurs taches de *Caulerpa taxifolia* ont été découvertes chaque année, de 1994 à 2005, dans le site de mouillage de la baie de Port-Man, au large de la pointe du Tuf et à la Calanque longue. En 2001, *C. racemosa* a été également découverte à la Pointe du Vaisseau (Robert, 2001), en 2002 sur l'îlot de la Gabinière et à l'ouest de la Rade de Port-Cros, en 2004 dans la baie de Port Man, et en 2005 à la pointe du Tuf. Depuis l'origine des découvertes, la Direction du Parc national de Port-Cros, en accord avec le Président du comité scientifique, puis l'ensemble du comité scientifique, a décidé de procéder à l'élimination systématique de ces nouvelles colonies de *Caulerpa taxifolia* (§ 4.2). En raison du statut particulier de cette espèce (en France, arrêté d'interdiction du 4 mars 1993, § 4.2), une demande d'autorisation d'arrachage est adressée au Préfet du Var avant chaque campagne d'arrachage. A la demande expresse de la Direction Départementale des Affaires Maritimes, et pour des raisons de sécurité, les plongeurs impliqués dans l'opération sont titulaires du certificat de travail en milieu hyperbare, en conformité avec les normes du Ministère du travail.

Les opérations de contrôle de *Caulerpa taxifolia* ont été réalisées, après balisage et cartographie, par arrachage manuel, application de couvertures au cuivre ou par électrolyse au cuivre (§ 4.4). Au total, en 13 années, ce sont plus de 2 000 ha qui ont été prospectés entre -12 et -39 m de profondeur (nécessitant un total de 9 100 plongées), et environ 60 m² de *C. taxifolia* qui ont été découverts et détruits. Les prospections et contrôles ont représenté un coût moyen de 12.4 k€.an⁻¹ (ou 120 k€.an⁻¹ en incluant une évaluation du coût de l'aide bénévole des clubs de plongée) ; les financements ont été assurés par le PNPC et le programme Natura 2000 (Robert, 2002a).

L'expérience a montré que la seule prospection des zones de mouillage forain ne suffit plus. Les boutures de *C. taxifolia* découvertes au large du Tuf ont en effet probablement été apportées involontairement par les filets de pêche, et ce malgré les précautions dont font preuve les professionnels signataires de la Charte de la pêche professionnelle du Parc (Robert, 2002b). On peut donc penser que *C. taxifolia* et *C. racemosa* peuvent être présentes dans de nombreux autres sites profonds où la pêche est pratiquée, c'est à dire dans toutes les eaux du Parc national, à l'exception des sites de plongée aménagés et des récifs artificiels. Ces derniers secteurs sont en effet souvent visités en plongée et la présence de ces espèces y serait *a priori* rapidement décelée. Comme le souligne Belsher (2001), de manière générale, l'ensemble des fonds du Parc est susceptible d'être colonisé, avec des degrés divers de réussite par ces espèces envahissantes.

L'augmentation du nombre et de la surface des nouvelles colonies découvertes met ainsi en évidence la nécessité pour le PNPC de renforcer sa stratégie de prospection et de contrôle de ces espèces de *Caulerpa* (prospections plus fréquentes avec l'utilisation, pour les zones les plus profondes, de petits sous-marins, et utilisation systématique des couvertures au cuivre en profondeur ; Robert, 2002b). Depuis 2001, la présence de *C. racemosa* dans les eaux du Parc national, et son expansion rapide depuis cette date malgré une tentative de contrôle en 2001 (Robert, 2001 ; surface atteinte : 300 m² en 2001 et plus de 2,5 ha en 2005) montre qu'une stratégie de contrôle telle qu'elle est pratiquée pour *C. taxifolia* n'est pas efficace vis à vis de cette espèce. Les surfaces déjà atteintes, la difficulté à cartographier les peuplements diffus formés par cette espèce et l'existence d'une dissémination par reproduction sexuée rendent illusoire l'efficacité des moyens de contrôle cités précédemment sur *C. racemosa*, à part la lutte biologique. D'ailleurs, depuis 1991, l'expansion de *C. racemosa* en Méditerranée d'une manière générale (Piazzi *et al.*, 2005) et en France en particulier (Ruitton *et al.*, 2005a) est beaucoup plus rapide que celle de *C. taxifolia*. Seule une stratégie de prévention et d'information peuvent, dans l'état actuel de nos connaissances, limiter l'expansion de *C. racemosa*. Notamment, une connaissance des zones atteintes permettrait par exemple d'y limiter les mouillages ou la pratique de la pêche avec arts-traînants favorisant la dispersion des boutures.

Il est intéressant de souligner que, en raison de l'expérience acquise, le PNPC a également apporté un support ponctuel en terme de formation dans le cadre d'opérations isolées et ponctuelles supportées par des communes ou des groupements de communes du Var (Six-Four, Cavalaire, La Croix-Valmer, Le Rayol, Le Pradet, SIVOM du littoral des Maures). Il existe donc une demande à ce niveau.

6. Définition de stratégies pour le Parc national de Port-Cros

A partir de ce qui précède, nous pouvons souligner certains points majeurs :

- (i) Les deux taxons (*Caulerpa taxifolia* et *C. racemosa* var. *cylindracea*) constituent un risque pour l'écodiversité (diversité des habitats), le fonctionnement des écosystèmes, la diversité spécifique (alpha ou gamma) et peuvent perturber certaines activités humaines.
- (ii) La nécessité de prévenir et/ou lutter contre l'introduction et l'expansion de ces espèces est encadrée par plusieurs engagements internationaux dûment entrés en vigueur en France.
- (iii) La vitesse d'expansion est importante pour les deux espèces. Les vecteurs de leur dissémination sont connus : dispersion naturelle des boutures à courte distance, dispersion anthropique à longue distance et émission des zygotes issus de la reproduction sexuée dans le cas de *C. racemosa*.
- (iv) La nature des menaces a conduit à la publication de plusieurs recommandations visant à renforcer les stratégies pour le contrôle de ces espèces dans les Aires Marines Protégées.
- (v) Le corpus de connaissances scientifiques est considérable pour les deux espèces. Le grand public semble relativement bien sensibilisé au problème et plusieurs ouvrages ont présenté aux décideurs les stratégies de gestion du problème.
- (vi) Différentes méthodes ont été utilisées pour le contrôle effectif des colonies de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée, Californie et Australie, mais jamais pour *C. racemosa*.
- (vii) Aucune des méthodes ne permet l'éradication définitive, à coup sûr, et des retours sur sites sont nécessaires. Parmi les méthodes adoptées, les méthodes cuivriques et le micro-arrachage contrôlé semblent les plus adaptées aux objectifs du PNPC. A ce titre les actions menées depuis 1994 par le PNPC doivent être soulignées.
- (viii) La précocité des interventions est un facteur déterminant pour le succès d'une intervention. Seules les tentatives d'éradication de colonies de petite taille se sont révélées fructueuses.

Les propositions que nous formulons pour la formalisation d'une stratégie de contrôle des espèces marines envahissantes dans le Parc national de Port-Cros interviennent après de longues années d'étude et de

procrastination en termes de contrôle et de ralentissement du phénomène. Au-delà du cas particulier du PNPC, le contexte local, national et international est aujourd'hui favorable à l'adoption d'une stratégie plus large :

- (i) Une évaluation de la situation devrait être faite par le gouvernement français à l'issue du Plan d'action français et, en raison de la mobilisation mondiale contre le phénomène, il peut être attendu de sa part une plus grande fermeté pour la gestion effective du problème sur son domaine public maritime.
- (ii) Le Conseil régional PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur) s'est, de son côté, fortement engagé à devenir un acteur de premier plan, non seulement le long de ses côtes mais également au niveau méditerranéen.
- (iii) Le PNPC est perçu comme un acteur de premier plan dans les domaines qui touchent à la gestion des milieux naturels et de l'expansion de *Caulerpa taxifolia*.
- (iv) La nécessité de contrôler la souche envahissante de *C. taxifolia* dans les eaux du Parc est clairement mentionnée dans le document d'objectif Natura 2000, ce qui permet notamment le cofinancement par cet outil communautaire.
- (v) L'ensemble est renforcé par l'existence d'une longue expérience dans le suivi cartographique par l'Observatoire sur l'expansion de *C. taxifolia* en Méditerranée et par une expérience régionale dans la mise en œuvre des méthodes du contrôle.
- (vi) Enfin, la population locale apparaît comme relativement bien sensibilisée au problème, et donc plus à même d'accepter des actions éventuellement contraignantes pour les usages.

Les propositions pour une stratégie de lutte contre les deux espèces envahissantes de *Caulerpa* sont déclinées ci-dessous de la manière suivante :

- Sensibilisation du grand public, appel à signalisation (Fiche stratégie n°1) ;
- Actions concertées avec les usagers (Fiche stratégie n°2) ;
- Organisation du mouillage forain (Fiche stratégie n°3) ;
- Prospection (Fiche stratégie n°4) ;
- Modélisation (Fiche stratégie n°5) ;
- Intervention (Fiche stratégie n°6) ;
- Veille biologique et technologique (Fiche stratégie n°7) ;
- Rôle du Parc national de Port-Cros dans son environnement local et international (Fiche stratégie n°8).

D'une manière générale, ces actions peuvent être appliquées pour le contrôle de toute autre espèce marine envahissante (particulièrement benthique) qui pourrait être détectée sur notre littoral et plus spécifiquement dans les eaux du Parc national de Port-Cros.

6.1. Sensibilisation du grand public, appel à signalisation

(Fiche stratégie n°1)

Objectif(s)

Réduire les risques de nouvelle contamination par les usagers (plaisanciers, pêcheurs, plongeurs, aquariophiles) et susciter éventuellement de nouvelles signalisations de *Caulerpa taxifolia* et *C. racemosa*. Cette sensibilisation doit dépasser le cas particulier des espèces de *Caulerpa* (aussi préoccupant soit-il) et le replacer dans le contexte général des introductions d'espèces, aussi bien marines que continentales.

Argumentaire

L'information et la sensibilisation des usagers de la mer et du grand public sont apparues comme des outils primordiaux dans une stratégie de suivi et de ralentissement de l'expansion d'une espèce introduite. Il s'agit là d'outils peu coûteux, pouvant non seulement servir à ralentir l'expansion des espèces déjà introduites de *Caulerpa*, mais à prévenir de nouvelles introductions d'espèces. Pour les espèces de *Caulerpa*, ces actions de sensibilisation doivent être plus particulièrement ciblées vers les plaisanciers (petite navigation côtière de proximité, croisières de longue distance), les métiers de la pêche, les clubs de plongée et le tourisme estival. Les objectifs de cette sensibilisation sont, d'une part, l'adoption de nouvelles pratiques en mer qui limitent les risques de dissémination par l'homme et, d'autre part, l'appel à la signalisation de nouvelles colonies lorsqu'elles sont découvertes. Ainsi, outre la présentation des espèces, de l'absence de danger pour la santé humaine, de la cinétique et des conséquences de leur expansion, deux messages principaux doivent être systématiquement délivrés : (i) "si vous la rencontrez, signalez-la !" et (ii) "évitons de la disséminer !". Enfin, un troisième message doit être : "Les *Caulerpa* sont maintenant chez nous, comme les rats et les cafards, et il faudra apprendre à coexister. Evitons d'introduire de nouvelles espèces aux conséquences imprévisibles".

Besoins

L'information de sensibilisation concernant les *Caulerpa* est issue des travaux du LEML (Université de Nice-Sophia Antipolis) dans le cadre de l'Observatoire de suivi de l'expansion de *C. taxifolia*. Les opérations d'information et de sensibilisation de l'Observatoire ont été poursuivies jusqu'en 2005. Actuellement, environ 50 000 dépliants sont diffusés annuellement dans la région PACA. Il est déterminant que ces opérations soient pérennisées, que les usagers au sein du PNPC soient des destinataires privilégiés de ces documents et enfin que des documents plus généraux sur la prévention des introductions d'espèces soient réalisés et diffusés.

Action(s)

- Quantifier les besoins en terme de matériel de sensibilisation sur les *Caulerpa* envahissantes (dépliants et affichettes le cas échéant) et s'assurer de leur mise à disposition du personnel du Parc national de Port-Cros.
- S'assurer que l'information pertinente est systématiquement affichée dans les lieux publics au sein du Parc national de Port-Cros.
- Distribuer systématiquement ce matériel aux plaisanciers lors de l'arrivée au port ou lors des visites sur site de mouillage.
- Etablir un dialogue avec les plaisanciers afin de (i) identifier le lieu du dernier mouillage et les zones contaminées signalées par l'Observatoire sur les dépliants ; (ii) faire un rappel des mesures de nettoyage des systèmes d'ancrage et (iii) signaler la découverte de nouvelles colonies.
- Promouvoir, en collaboration avec les municipalités riveraines, clubs nautiques et clubs de plongée, la distribution systématique de cette information.
- Elaborer et diffuser un document de sensibilisation au problème général des introductions d'espèces insistant sur les risques écologiques, économiques et de santé humaine et insistant sur l'externalisation des coûts : "Vous ne le savez peut-être pas, mais c'est vous qui payez".

6.2. Actions concertées avec les usagers

(Fiche stratégie n°2)

Objectif(s)

Réduire les risques de contamination (*Caulerpa taxifolia* et *C. racemosa*) par les usagers du site (plaisanciers et pêcheurs).

Argumentaire

Si la dissémination de ces deux espèces de *Caulerpa* sur de courtes distances se fait principalement par le transport de boutures emportées par les courants, la dissémination de boutures dans les sites très éloignés des secteurs fortement contaminés se fait notamment par le biais d'activités humaines, comme la navigation de plaisance et la pêche artisanale. D'où l'importance de la réglementation dans les sites colonisés afin de réduire les risques de dissémination anthropique vers l'extérieur (cf. fiche n° 8).

Pour *C. taxifolia*, ce sont la Ligurie française et italienne qui sont les zones les plus fortement colonisées. Dans ces zones, la dissémination (par bouturage) autour des colonies existantes va très probablement s'accroître en raison (i) de la présence de vastes colonies mères, sources de nombreuses propagules, et (ii) d'activités humaines qui favorisent la dispersion des boutures autour des colonies (pêche aux arts traïnants) ou la contamination de sites de mouillages ou de ports (petite navigation côtière). Dans les secteurs non colonisés, les zones de mouillage et les ports, notamment autour des secteurs ciblés par la navigation de plaisance, présentent la plus forte probabilité de contamination.

En ce qui concerne *C. racemosa*, les modalités de sa dissémination et particulièrement l'émission des propagules issues de sa reproduction sexuée en a fait rapidement une espèce très largement représentée, à l'échelle de l'ensemble de la Méditerranéenne, avec notamment des peuplements pérennes dans les secteurs les plus chauds de la Méditerranée.

Action(s)

- S'assurer, en relation avec les ports des communes voisines, que l'information pertinente citée dans la fiche n° 1 est systématiquement diffusée auprès du public concerné.
- Pérenniser les actions dans ce sens au niveau de la Charte de la pêche professionnelle dans les eaux du PNPC et de la Charte de la plongée sous-marine dans les eaux du PNPC.
- En ce qui concerne la pêche professionnelle, afin d'éviter que des filets contaminés par *Caulerpa*, lors de calées à Porquerolles ou sur le continent, soient utilisés dans les eaux du Parc, il faut soit imposer la décontamination à terre des filets, soit obliger les pêcheurs à utiliser à Port-Cros des filets spécifique (= non utilisés ailleurs), obligation bien sûr accompagnée d'une aide financière pour leur acquisition.

6.3. Organisation du mouillage forain

(Fiche stratégie n°3)

Objectif(s)

Organiser le mouillage forain dans les zones autorisées du Parc national de Port-Cros en vue de limiter ou de supprimer les ancrages.

Argumentaire

Dans les limites du PNPC, aussi bien que dans de nombreux sites de Méditerranée, les mouillages des navires, notamment de plaisance, apparaissent comme l'un des vecteurs principaux de l'implantation de nouvelles colonies des deux espèces envahissantes de *Caulerpa*. Ce n'est sans doute pas un hasard si les zones les plus fréquemment contaminées dans le PNPC se trouvent être des zones de mouillage utilisées par les navires de plaisance.

La nécessité d'organiser le mouillage forain dans ces secteurs, notamment par la mise en place de dispositif d'amarrage évitant l'ancrage, est renforcée par la colonisation de nombreuses zones de mouillage par les espèces de *Caulerpa* le long du littoral de la région PACA.

Action(s)

- Développer un plan de mise en place de structure d'amarrage dans les secteurs de mouillage forain du Parc national de Port-Cros.

6.4. Prospections

(Fiche stratégie n°4)

Objectif(s)

Pérenniser les recherches systématiques de *Caulerpa taxifolia* dans les secteurs à risques. Mobiliser de nouveaux moyens pour des prospections élargies. Dans le cas de *C. racemosa*, on ne la recherchera qu'en complément de la recherche de *C. taxifolia* et non pour elle-même.

Argumentaire

L'objectif de ces recherches systématiques est la découverte précoce des colonies de *C. taxifolia*, en complément des signalisations fortuites par les usagers (plongeurs, pêcheurs) et par les scientifiques qui travaillent dans le Parc national de Port-Cros. Ces prospections permettent la localisation précise, le dimensionnement et la planification des opérations de contrôle ultérieures.

Ce type de recherche systématique est organisé chaque année, depuis 1992, dans les eaux du PNPC, sur les 120 ha de zones de mouillage autorisé. Ces prospections ont permis la découverte et le contrôle de colonies de *C. taxifolia*. Il est aujourd'hui certain que, sans ces opérations, il existerait actuellement plusieurs hectares de *C. taxifolia* dans au moins trois sites distincts du Parc national.

En raison de la poursuite de l'expansion des espèces de *Caulerpa* le long des côtes du Var et des Alpes-Maritimes, la prospection systématique annuelle des zones de mouillage demeure, plus que jamais, impérative. La découverte plus récente, grâce à ces prospections, de nombreuses boutures dans de nouveaux secteurs, assez vastes, montre que cette stratégie doit être renforcée. Ce renforcement devrait passer par : (i) la mobilisation régulière et quasi-systématique des plongeurs du Parc national de Port-Cros, (ii) la poursuite des opérations de prospection systématique telles qu'elles sont réalisées actuellement par les plongeurs autonomes et apnéistes et (iii) la mobilisation de nouveaux moyens à la mer, notamment des caméras sous-marines (ROV), pour la prospection dans des zones profondes ciblées où existent des indices de la présence de *C. taxifolia* (information issue de plongeurs amateurs, de pêcheurs, d'agents du Parc national de Port-Cros, etc.), zones qui ne peuvent pas être couvertes par les moyens humains (plongeurs et apnéistes) utilisés actuellement.

La prospection intensive "en aveugle", c'est à dire non ciblée, des zones profondes, qui ne peut se faire qu'avec des engins de type ROV, ne peut pas être retenue, en raison de son coût disproportionné par rapport aux résultats.

La recherche systématique de *C. racemosa*, dans des zones où n'existent pas d'indices de la présence de *C. taxifolia*, est pour le moment à exclure. En effet, (i) la progression de *C. racemosa* est très rapide, en raison de sa probable reproduction sexuée ; elle devrait donc être rapidement présente tout autour de Port-Cros, (ii) il n'existe actuellement pas de méthodes pour en contrôler l'expansion, de telle sorte que sa localisation ne présente qu'un intérêt scientifique.

Action(s)

- Mobiliser régulièrement les plongeurs et moyens à la mer du Parc national de Port-Cros pour la recherche de *C. taxifolia*.
- Mobiliser les Clubs signataires de la Charte de plongée du Parc national afin qu'ils poursuivent leur collaboration aux opérations de prospection systématique de *C. taxifolia* (et accessoirement de *C. racemosa*) dans les sites à risque (les 120 ha de zones de mouillage autorisé), le secteur du Tuf et tout autre secteur accessible à la plongée autonome ou à l'apnée où existerait un indice de la présence de *C. taxifolia*.
- Organiser des prospections au moyen d'une caméra sous-marine de type ROV dans les secteurs profonds où existent des indices de la présence de *C. taxifolia*.

Protocole

Le personnel du Parc national de Port-Cros possède actuellement une bonne expérience de ce type d'opération. Celles-ci mobilisent, le troisième week-end d'octobre, environ 50 plongeurs de niveau III minimum. Les ressources utilisées actuellement (humaines mais également matérielles et logistiques) correspondent, outre celles propre au PNPC, aux clubs de plongée signataires de la Charte de plongée dans les eaux du PNPC.

La période choisie correspond à la période où les *Caulerpa* sont bien visibles et où les feuilles de l'herbier à *Posidonia oceanica* sont plus courtes, ce qui en facilite le repérage. L'installation estivale d'une bouture de *C. taxifolia* atteint alors à cette période une surface maximale de $\frac{1}{4}$ de m². Il s'agit également de la période où les plongeurs locaux sont davantage disponibles. Par ailleurs, cette période précède la période optimale pour les opérations de contrôle.

La prospection des zones de mouillage est réalisée le long de radiales perpendiculaires à la côte, du fond vers la surface, c'est à dire du large vers le littoral, suivant un cap déterminé au début de la plongée. Les plongeurs sont espacés tous les 5 mètres le long d'une ou deux cordelette(s) de 50 m de longueur à laquelle ils se tiennent.

Aux extrémités et au milieu de cette structure, 3 plongeurs avancent selon le cap défini en surface, guidant ainsi l'ensemble de la palanquée. Les plongeurs évoluent à 3 ou 4 mètres au-dessus du fond, en fonction de la visibilité du moment. Le champ de vision, environ 5 m de largeur, permet à chaque plongeur une bonne concentration sur la radiale dont il a la charge. Dès qu'un plongeur décèle la présence de l'espèce cible (*i.e.* *C. taxifolia* ou *C. racemosa*), il la signale à l'aide de la bouée grenade dont il est équipé, puis continue sa progression sans toucher à la *Caulerpa* découverte.

Le bateau chargé d'assurer la sécurité en surface note alors le point au GPS différentiel, ce qui permet un retour sur le point précis signalé, pour les opérations ultérieures de validation, puis de contrôle.

6.5. Modélisations

(Fiche stratégie n°5)

Objectif(s)

L'objectif est d'utiliser les outils de modélisation existant (modélisation de l'expansion de *Caulerpa taxifolia*) dans le cadre de nouvelles situations de contamination et d'explorer les possibilités d'adaptation de ces outils à d'autres espèce-cibles, comme *C. racemosa*.

Argumentaire

Le modèle informatique SimCt a montré qu'il permettait de réaliser des scénarios réalistes de l'expansion de *C. taxifolia* ou de simuler les évolutions de sites soumis à des opérations de contrôle.

Si les simulations déjà fournies par ce modèle pour les sites du PNPC où *C. taxifolia* a été découverte apparaissent comme suffisante en terme de stratégie, il peut sembler nécessaire :

- de faire procéder à de nouvelles simulations en cas de colonisation d'un autres sites (par exemple des sites profonds) ou pour des colonisations plus dispersées (comme celles générées par les arts-traînants) par exemple ;
- d'adapter le modèle à d'autres espèces et notamment à *C. racemosa*.

Action(s)

- Contacter les équipes en charge du modèle dans le cadre de nouvelles situations.
- Explorer avec elles les possibilités d'adaptation à *C. racemosa*.

6.6. Interventions

(Fiche stratégie n°6)

Objectif(s)

Contrôler les colonies des espèces envahissantes découvertes dans les eaux du PNPC.

Argumentaire

En Méditerranée, l'absence de méthode pour le contrôle immédiat des peuplements de *C. taxifolia* a certainement favorisé l'absence d'actions concrètes de réduction des peuplements sur le terrain. Il existe maintenant plusieurs méthodes opérationnelles (§ 4.4) qui peuvent être proposées à la collectivité pour des opérations raisonnables concernant *Caulerpa taxifolia*. Par contre, aucune de ces méthodes ne semble efficace vis à vis de *C. racemosa*, à part la lutte biologique mais qui n'est pas encore au point. En effet, les surfaces déjà atteintes, la difficulté à cartographier les peuplements diffus formés par cette espèce et l'existence d'une dissémination par reproduction sexuée rendent illusoire l'efficacité des méthodes mécaniques ou physico-chimiques. Aucune de ces méthodes n'est parfaite mais chacune présente ses spécificités et ses propres conditions de mise en oeuvre. On remarque que, outre les exceptions citées § 4.2, la rareté des chantiers et donc des débouchés financiers, n'a pas permis aux équipes qui se sont impliquées dans la mise au point de ces systèmes de se développer. Une expérience a néanmoins été acquise. Enfin, certaines de ces techniques pourraient être exportées dans d'autres zones géographiques et notamment en Australie.

En ce qui concerne le cas du PNPC, il est maintenant avéré que la politique de destruction systématique des colonies de *Caulerpa taxifolia* découverte dans les limites du Parc a permis de maîtriser, pour le moment, l'expansion de cette algue. Les techniques utilisées se sont avérées efficaces dans leur champ d'application. Les protocoles d'utilisation de ces techniques doivent être publiés et diffusés auprès des organismes qui en feraient la demande. Ces protocoles sont rappelés ci-dessous pour mémoire.

En ce qui concerne *Caulerpa racemosa*, il est difficile de recommander la destruction systématique des nouvelles colonies qui seraient découvertes dans le futur. En effet, l'apparition soudaine de très nombreuses colonies, sur de vastes surfaces au sein du PNPC, est rendue possible grâce à l'efficacité de sa reproduction sexuée. Une évaluation au cas par cas, par la Direction du PNPC, assistée de son conseil scientifique, est recommandée.

D'autres espèces marines peuvent apparaître et se montrer envahissantes (§ 2). Si les techniques précitées peuvent le cas échéant se montrer efficaces pour certaines d'entre-elles, il est nécessaire d'intervenir pour empêcher de nouvelles colonisations (cf. Fiche n°7).

Deux techniques sont actuellement utilisées en routine par le personnel du Parc et semblent donner satisfaction : l'arrachage manuel et les couvertures au cuivre. Parmi les autres méthodes développées, seules celles utilisant l'action de l'ion cuivrique semblent adaptées. Il faut cependant insister sur l'importance de valider de manière scientifique, et le cas échéant de publier, les résultats de la mise en pratique de leurs méthodes. En l'état actuel, ces techniques ne sont applicables qu'aux profondeurs permettant un temps suffisant d'évolution des plongeurs sous-marins.

Enfin, il faut souligner qu'il est important qu'un balisage et une cartographie de la zone traitée soient réalisés. Ces informations permettent le retour systématique sur site pour le contrôle des repousses. Ces informations doivent impérativement être transmises à l'Observatoire pour l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée.

Action(s)

- Poursuivre l'intervention systématique sur les colonies isolées et de petites tailles à faible profondeur ;
- Statuer au cas par cas pour des contaminations plus vastes ou pour des profondeurs non compatibles avec le travail hyperbare ;

- Suivre l'état de la validation des autres méthodes avec leurs promoteurs (notamment des Cuves Electrolytiques Virtuelles) en insistant sur la quantification de l'impact sur les peuplements cibles.

Protocoles

Localisation, balisage et cartographie des zones traitées :

Lorsqu'une zone colonisée par l'une des espèces envahissantes est repérée, soit à la suite d'une signalisation d'un usager soit lors d'opérations de prospection, celle-ci doit être localisée précisément (GPS). Des plongées doivent permettre un balisage de l'enveloppe des colonies et une cartographie doit préciser la typologie des fonds (profondeur, déclivité, relief) et les types de peuplements concernés. Ces informations doivent servir de base aux suivis post opératoires ou de suivis de l'expansion en cas de non-intervention. Ces documents permettent également de valider ou d'invalider le bien fondé d'une intervention de contrôle ainsi que son dimensionnement technique et financier.

Enlèvement manuel (ou micro-arrachage contrôlé) :

Sur matre morte, herbier clairsemé ou dégradé, sable ou vase, l'enlèvement manuel est réalisé à l'aide d'un couteau-scie permettant de retirer l'algue et son substrat sur une épaisseur de 10 cm. Cette technique est opérationnelle pour des surfaces inférieures à 2 ou 3 m². Bien que théoriquement applicable jusqu'à une profondeur maximale d'une quarantaine de mètres, il s'avère que l'enlèvement d'un nombre de bouture supérieur à une dizaine ne peut avoir lieu au-delà de -25 m dans de bonnes conditions de sécurité.

Le découpage du substrat nécessite la présence d'au moins 2 plongeurs titulaires du Certificat d'Aptitude à l'Hyperbarie. L'un est muni d'un couteau-scie assez long (lame > 20 cm), l'autre d'un sac du type filet à mailles très serrées. Celui qui découpe le substrat enlève, morceau par morceau, les parties du peuplement en prenant une extrême vigilance à ne pas mettre en suspension quelque partie de l'algue que ce soit. Dès qu'une partie du substrat est enlevée avec l'algue qui s'y développe, le second plongeur ouvre légèrement le filet en le remontant lentement au moment où l'autre plongeur dépose les éléments découpés. Le filet est ensuite refermé, puis redescendu sur le fond. L'équipe peut être renforcée d'un troisième plongeur, muni d'un petit filet (type épuisette) dont le rôle est de s'assurer qu'aucun débris n'échappe à la vigilance des deux premiers plongeurs.

Cette opération est reproduite jusqu'à l'élimination totale de la colonie. Remonté à bord, le sac contenant la récolte est déposé dans un conteneur fermé et protégé contre d'éventuels renversements. Une fois au port, le conteneur est transporté dans un lieu à l'abri d'une forte fréquentation. Eventuellement, les individus prélevés sont ensuite séparés de leur support, puis mesurés pour obtenir des données biométriques sur le développement du peuplement. Cette opération terminée, la totalité de la récolte est détruite à l'eau de Javel puis jetée dans un lieu de collecte des déchets.

Les périodes hivernales semblent être les périodes d'intervention optimales, dans la mesure où les chances de régénération des boutures arrachées y sont beaucoup plus faibles qu'en période estivale de croissance.

Les informations afférentes à l'opération de contrôle sont transmises à la hiérarchie et à l'Observatoire sur l'expansion de *Caulerpa taxifolia* dans le cas des espèces de *Caulerpa*.

Application de couvertures au cuivre :

Ces couvertures de polymère sont simplement posées au niveau des colonies à traiter en début d'après-midi et laissées en place jusqu'au lendemain matin. Ces couvertures au cuivre ne sont applicables qu'une seule fois sur les peuplements à traiter et doivent être ensuite rechargées avant toute nouvelle application. Un système de recharge permet au PNPC une utilisation en toute autonomie de ces couvertures.

Ces couvertures de 2 m² peuvent être appliquées sur des substrats très variés (parois rocheuses à forte déclivité notamment) et être découpés en « patch » plus petits pour le traitement de stolons isolés. Elles ne sont pas adaptées à des traitements dans les herbiers de phanérogames.

Comme pour l'intervention manuelle, les informations afférentes à l'opération de contrôle sont transmises à la hiérarchie et à l'Observatoire sur l'expansion de *Caulerpa taxifolia*.

6.7. Veille biologique et technologique

(Fiche stratégie n°7)

Objectif(s)

Mise en place d'un réseau de veille sur l'expansion des espèces marines envahissantes, des espèces nouvelles pour la Méditerranée, des avancées techniques visant à leur contrôle, des avancées législatives et des opportunités de financement.

Argumentaire

Le pourtour de la Méditerranée bénéficie d'un réseau relativement dense de stations marines, de centres de recherche en ingénierie ainsi que d'organismes de conservation de la nature. L'expansion des espèces envahissantes devrait être le sujet d'un réseau international d'expertise et d'information. Ce réseau doit permettre, par la mise en commun des informations et leur diffusion à la communauté (notamment via internet), de : (i) statuer sur les risques que peuvent représenter certains nouveaux taxons pour la Méditerranée, (ii) rendre compte de l'expansion et de l'impact des espèces déjà implantées (§ 2), (iii) rendre compte des avancées techniques, au niveau mondial, visant au contrôle de ces espèces et d'espèces similaires, (iv) rendre compte des succès et échecs dans le domaine du contrôle et de la prévention, (v) rendre compte et stimuler les avancées réglementaires dans ce domaine et (vi) diffuser les opportunités de financement (programme de recherche, bourses, postes) dans le domaine.

Ceci peut être réalisé par la mise en place d'un site internet dédié au phénomène tel que cela est réalisé, par exemple par des agences spécialisées aux Etats Unis d'Amérique (<http://www.invasivespecies.gov>) ou en Australie (<http://crimp.marine.csiro.au/nimpis>).

La création d'un tel réseau (le *Mediterranean Network on Invasive species – MNIS*) avait été demandée en assemblée plénière par les participants au IVth *International Workshop on Caulerpa taxifolia* à Lerici (1999) mais n'avait pas été suivi d'effet.

Besoins

La mise en place et la maintenance d'un site de travail collaboratif peuvent être réduites au minimum en adoptant un système de publication sur internet SPIP (logiciel libre, cf. www.spip.net). Ce système permet de piloter de grandes bases de données (p.ex. www.lemondediplomatique.fr) et fournit aux rédacteurs, en ligne, un espace de rédaction, de forum et de validation des brèves ou des articles auquel il est associé. Une fois mis en place, le système ne nécessite aucune maintenance.

Les besoins minimums sont donc essentiellement humain, équivalant à ceux d'un système éditorial.

Action(s)

- Recherche du contenu existant via le réseau universitaire et les sites similaires (principalement anglo-saxons).
- Création d'une maquette de site et publication des premiers articles.
- Recherche des listes de diffusion.
- Publication de l'annonce de création et appel à participation.
- Maintenance éditorial du site.

6.8. Rôle du Parc national de Port-Cros dans son environnement local et international

(Fiche stratégie n°8)

Objectif(s)

Mobiliser les acteurs locaux et internationaux pour la réalisation d'actions concrètes dans le domaine de la prévention et la lutte contre les espèces envahissantes.

Argumentaire

De nombreux pays se sont engagés, à travers la ratification de conventions internationales, à réglementer et contrôler les introductions d'espèces. La retranscription de cette volonté dans les législations nationales est rare dans les pays du pourtour de la Méditerranée. En France, où les actions de contrôle sont exceptionnelles, on note l'absence de textes fixant les conditions d'application de la loi sur les espèces introduites.

Depuis 1991, le PNPC est l'un des organismes les plus fortement impliqués dans le contrôle des espèces de *Caulerpa* envahissantes en Méditerranée. Il est également un des rares (avec le Govern Balears) à posséder, dans ce cadre, une expérience dans l'organisation de prospection active et de contrôle des colonies découvertes. Enfin, le PNPC bénéficie d'une reconnaissance locale et méditerranéenne grâce à ses travaux dans le domaine de la conservation et de la gestion de son aire marine protégée (AMP).

Ces atouts doivent permettre au PNPC d'impulser des politiques et actions concrètes pour le contrôle des espèces envahissantes aux niveaux local et international.

Par ailleurs son statut d'interlocuteur privilégié doit l'inciter à ouvrir un dialogue avec la préfecture maritime pour la mise en œuvre d'actions concrètes qui dépassent les seules limites du PNPC (notamment l'inscription sur les cartes SHOM d'interdiction des mouillages forains et des arts traînants dans les zones les plus fortement contaminées par *C. taxifolia* et *C. racemosa* et inclusion des mesures préventives lors des mouillages dans les instructions nautiques ou les examens de permis côtier).

Action(s)

- Communiquer au niveau local et international méditerranéen sur les risques pour la biodiversité et les activités humaines que représentent les espèces introduites et envahissantes.
- Etablir, en liaison avec les universités et les administrations des protocoles pour la prévention et le contrôle des colonies d'espèces envahissantes.
- Ouvrir un dialogue avec la préfecture maritime à Toulon pour une politique effective de prévention des espèces envahissantes sur le domaine public maritime méditerranéen.

7. Discussion générale sur le phénomène et les stratégies

L'impact des espèces envahissantes

Une somme importante de travaux dédiés aux deux espèces de *Caulerpa* envahissantes ont été réalisés depuis leur apparition en Méditerranée. Comme nous l'avons vu, il s'agit, pour *C. taxifolia*, de l'espèce marine introduite la mieux documentée au monde. Il est probable que les scientifiques impliqués dans les premiers programmes de recherche n'imaginaient pas qu'une telle mobilisation scientifique aurait lieu, notamment grâce à la formidable dynamique des programmes communautaires Life, et qu'autant d'aspects du phénomène seraient finalement connus.

De manière générale, les processus d'introduction d'espèces impliquent quatre phases successives : (i) l'arrivée, (ii) la phase d'implantation (naturalisation), (iii) la phase d'expansion et (iv) la phase de persistance (Boudouresque, 1999). Cette dernière phase signifie que l'espèce introduite peut occuper tous les biotopes favorables à l'espèce sur l'ensemble de l'aire géographique. Dans le monde, de tels cas d'expansion existent ; ils se sont poursuivis sur une longue durée, jusqu'à ce que la totalité des milieux favorables à l'espèce envahissante aient été occupée. A la fin de la phase d'expansion, l'aire de répartition de l'espèce atteint un plateau et présente ensuite, comme pour les espèces indigènes, des fluctuations plus ou moins grandes, liées, par exemple, aux relations prédateurs-proies, parasites-hôtes, au succès du recrutement, etc.

Dans le cas des deux espèces de *Caulerpa* envahissantes, il apparaît, en l'état des connaissances actuelles essentiellement la Méditerranée, que ces espèces sont bien susceptibles de coloniser, à terme, la plupart des biotopes présentant des substrats stables (les fonds rocheux, les herbiers de phanérogames, les mattes mortes de ces phanérogames, certains fonds sableux et vaseux incluant certaines lagunes et zones portuaires), de quelques mètres sous la surface à 30-50 m de profondeur.

Les études en Californie et en Australie sont encore trop rares pour statuer précisément sur l'évolution de peuplements à *Caulerpa taxifolia* récemment introduite. Toutefois, en Californie, il existe une chance pour que l'éradication totale des colonies, circonscrites à des lagunes artificielles fermées, ait été effectivement réalisée avec succès. Inversement, en raison des surfaces déjà contaminées en Australie, particulièrement en Nouvelles Galles du sud, une stratégie de contrôle à grande échelle sera nécessaire pour ralentir l'expansion de l'algue.

Au cas où une régulation naturelle des peuplements de *Caulerpa taxifolia* ou de *C. racemosa* interviendrait dans les années qui viennent, par exemple sous la forme d'un prédateur ou d'un pathogène (comme ce pourrait être le cas aux Baléares ; § 2.2), la régénération de certaines biocénoses, tels que les peuplements d'algues photophiles sur roche sera possible. En revanche, la destruction de certaines autres comme les peuplements de gorgones et du coralligène ou les herbiers de certaines Magnoliophytes (notamment *Posidonia oceanica* en Méditerranée, *Posidonia australis* en Australie), devrait être considérée comme irréversible à l'échelle humaine (la régénération naturelle de ces peuplements est en effet excessivement lente).

Dans le cadre du scénario d'une poursuite de l'expansion de ces deux espèces envahissantes, il est nécessaire de poursuivre l'étude de l'impact écologique et de l'impact sur les activités humaines décrites au § 3.1 et 3.2. Toutefois, il est difficile d'appréhender l'ampleur des nuisances sur les activités humaines.

Dans les zones les plus colonisées, les métiers de la pêche artisanale sont touchés, quelle que soit l'espèce de Caulerpe présente. Même s'il est difficile de chiffrer avec précision l'activité de ces métiers, l'expansion de ces algues se traduit généralement par une perte d'efficacité des engins, un alourdissement des charges de fonctionnement et un accroissement de la charge et de la pénibilité du travail. Les données issues de l'étude de Bec *et al.* (2002), évaluent le surcoût annuel pour la pêche artisanale dans les Alpes-Maritimes à 10-27 K€.an⁻¹ pour seulement 7 patrons pêcheur.

L'expansion de *Caulerpa taxifolia* constitue également une gêne pour la plongée sous-marine, particulièrement lorsqu'elle est organisée par des petites structures associatives. Ces structures doivent s'adapter en fréquentant alors d'autres sites de plongée, sans Caulerpe, et la plupart du temps plus éloignés que leurs sites habituels. L'éloignement des sites de plongée entraîne un surcoût non négligeable à la pratique de l'activité.

Soulignons toutefois que les stratégies d'ajustement de moyens de production qui peuvent être adoptées par l'ensemble de ces professions restent limitées (et coûteuses) dans leurs applications. En effet, ce sont des professions fortement inféodées à leurs situations géographiques (ports) qui ne peuvent exercer que dans un rayon géographique restreint, fonction de la puissance motrice de leurs embarcations et des temps de parcours. Une aggravation de la situation de l'expansion pourrait donc entraîner une aggravation parallèle des conditions de travail.

Enfin, l'impact de l'expansion des espèces envahissantes ne se résume pas à l'unique incidence sur les activités économiques ; les écosystèmes, la biodiversité, la qualité du paysage font appel à des valeurs esthétiques, culturelles et éthiques et peuvent être assimilés à des patrimoines que l'on peut souhaiter préserver et transmettre aux générations futures. Cet aspect abordé dans l'étude des valeurs de non-usages liées à l'expansion de *C. taxifolia* (Bec *et al.*, 2002) l'illustre parfaitement (§ 3.2). Ainsi, les consentements à payer, mesurés pour les seuls départements côtiers de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (21-169 M€), semblent révélateurs de l'attachement des individus à la protection des écosystèmes de leur littoral. Dans ce cadre la protection d'un patrimoine national naturel tel que le PNPC revêt une importance symbolique, d'une part, et exemplaire d'autre part.

Les stratégies de contrôle

Les éléments d'une stratégie cohérente pour le contrôle de l'expansion des espèces de *Caulerpa taxifolia* envahissantes ont été recommandés par les différents comités français créés pour la lutte contre *Caulerpa taxifolia*, comme par le comité permanent de la Convention de Berne, ou encore par les scientifiques réunis à Héraklion par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (*cf.* encadré § 4.1). Elles correspondent également aux recommandations plus générales de lutte contre les espèces envahissantes de l'IUCN (IUCN-SSG, 2000). En Méditerranée, les appels de la communauté scientifique aux autorités (§ 4.1) sont restés lettres mortes.

L'historique de la « non prise en compte » du phénomène par les autorités, particulièrement en France, dépasse le cadre de ce travail ; il a fait l'objet de différents travaux, comptes rendus, et questions à l'assemblée nationale française. On y relève notamment l'incompétence des organes chargés du conseil et de la remontée de l'information scientifique auprès des administrations centrales, l'absence de clarté dans les prérogatives sur les actions dans le domaine public maritime, et les blocages au niveau même des cabinets ministériels (Meinesz, 1999 ; Boudouresque, 2001). Pire, il est apparu que la politique de procrastination de la France à ce sujet avait influencé sur les politiques des autres pays (Simpère *et al.*, 1998).

Malgré cela, différentes méthodes de contrôle des colonies de *Caulerpa taxifolia* envahissantes ont été imaginées, développées puis testées (§ 4.4). Si aucune de ces méthodes ne permet la destruction définitive, des peuplements traités, elles représentent toutefois un ensemble de solutions applicables à différentes situations de colonisation, de substrat, de topologie des fonds, etc. A quelques rares exceptions il apparaît que les évaluations objectives des résultats obtenus par ces méthodes, notamment depuis la fin du programme Life II, font défaut et que plusieurs opérations réalisées en dehors du cadre expérimental n'ont pas été portées à la connaissance de la communauté. Il est du ressort des promoteurs de ces méthodes d'assurer une lisibilité de possibilités réelles, objectives, de leurs techniques auprès des décideurs. Dans le développement de futures méthodes, le recours à la lutte biologique ne devrait pas être écarté *a priori*. Il existe de nombreux points positifs qui plaident en faveur de cette méthode et les avancées réalisées dans le cadre de l'utilisation d'*Elysia subornata* devrait nous y encourager (§ 4.4).

Les stratégies de contrôle adoptées en Californie et en Australie, ont été, à l'inverse de celles adoptées en Méditerranée, rapides et efficaces. Aux Etats-Unis d'Amérique et en Australie, avant même la première signalisation de *C. taxifolia* dans ces pays, la situation en Méditerranée avait amené à interdire *Caulerpa taxifolia* et à établir des plans de prévention contre l'espèce (§ 4.1 et 4.2). La rapidité des réponses apportées souligne l'importance connaissance de ces administrations face aux introductions d'espèces. Les étapes de la reconnaissance d'une espèce comme envahissante jusqu'aux premières opérations de contrôle, même si elles ont bénéficié de l'expérience méditerranéenne, ont surtout bénéficié de l'existence dans les textes officiels des prérogatives et responsabilités au niveau fédéral et des états, qui incluent l'aspect fondamental des circuits de financement des actions. Cette compréhension du risque et des moyens de prévention contre les espèces introduites et envahissantes doit être insufflée par le PNPC aux administrations françaises et internationales des pays riverains de la Méditerranée.

La lutte contre les espèces introduites et envahissantes passe en premier lieu par la maîtrise de la source d'introduction, par exemple, pour *Caulerpa taxifolia*, l'interdiction de son utilisation dans le circuit aquariophile. La possibilité de nouvelles introductions par le circuit aquariologique s'est d'ailleurs vérifiée à plusieurs reprises en France (dans le port des Lecques, Var, en 1993 ; Gravez *et al.*, 1999b), en Californie et en Australie (§ 2.2), et au Japon (T. Komatsu comm. pers, *in* Thibaut, 2001). Les régions côtières où ces taxons sont disponibles à la vente et où les caractéristiques des eaux sont tout à fait compatibles avec leur développement sont nombreuses dans le monde (Gillespie *et al.*, 1997). Les recommandations émises à Héraklion (§ 4.1) proposent ainsi, pour la Méditerranée, d'interdire l'ensemble des espèces du genre *Caulerpa* à l'exception de l'espèce commune en Méditerranée *Caulerpa prolifera*.

De manière plus générale, devraient être listés et interdits (liste noire ou *Dirty list* en anglais), au niveau des territoires nationaux⁹², les taxons qui ont démontré leur potentiel comme espèce envahissante. De telles listes existent déjà de part le monde et elles ont déjà prouvé leur pertinence aux Etats-Unis d'Amérique et en Australie. Différents critères, même s'ils ne sont pas infaillibles, permettent d'estimer les espèces et groupes taxonomiques « à risque » (Boudouresque, 2001). Le genre *Caulerpa* regroupe plusieurs taxons qui peuvent être inclus dans cette catégorie. Par exemple, le développement rapide des peuplements de *Caulerpa scapelliformis*, *C. filiformis* et *C. taxifolia* introduites et la compétition avec les herbiers de Magnoliophytes avaient déjà été soulignés par les agences nationales dans plusieurs états australiens (Anonyme, 1999). De plus, Collado-Vides (2002) montre que les caractéristiques de *Caulerpa cupressoides* en font également un bon candidat pour devenir une espèce envahissante.

L'extension extrême de l'usage de ces listes d'organismes est illustrée par la situation en Nouvelle Zélande (§ 4.1) où seules peuvent pénétrer le territoire les espèces pour lesquelles l'absence de risque a été confirmée (*Clean list*).

Comme on l'a vu § 4.1 et 4.2, les textes, qu'ils s'agissent de conventions internationales ou de législations nationales, peuvent rester sans effet s'ils omettent d'instituer une stratégie nationale clairement énoncée, de prendre en compte la détermination précise des prérogatives et responsabilités institutionnelles de la gestion des introductions incluant, (i) les aspects de police, c'est à dire de contrôles et d'inspection de routine, (ii) les aspects curatifs, comme les interventions opérationnelles et (iii) les sources précises du financement.

La protection et la lutte contre les espèces envahissantes est une thématique vaste et transdisciplinaire (biologie, écologie marine et terrestre, économie, droit, ingénierie notamment) qui appelle la création d'organismes spécialisés (IUCN, 2000) comme nous l'avons vu dans le cas des pays anglo-saxons (§ 4.2). En l'absence de politique nationale claire, seuls des projets limités et pilotés au niveau local, visant à contrôler des colonies de petite dimension, éloignées des zones les plus fortement colonisées peuvent être mis en action. Dans ce cadre, le Parc national de Port-Cros fait figure d'exception et d'exemple.

Certaines opérations de prévention face aux espèces de *Caulerpa* envahissantes en Méditerranée, ne requièrent qu'un faible investissement financier. C'est le cas des opérations de sensibilisations qui peuvent se baser sur un matériel préexistant. D'autres nécessitent une mobilisation en moyens humains, comme la concertation avec les usagers ou les administrations, ou la mise en place d'un réseau d'expertise extérieur (réseau de veille biologique et technologique) qui peut être relativement facile à mettre sur pied dans le contexte actuel (§ 6). Les opérations qui représentent un coût important, comme les prospections ou les mises en oeuvre des opérations de contrôle, peuvent trouver une partie de leur financement dans les fonds destinés aux zones d'intérêt patrimonial, et particulièrement ceux issus de la directive européenne « habitats » (§ 4.1). Les sites Natura 2000, doivent ainsi intégrer dans leurs documents d'objectifs ces types d'opérations bénéficiant ainsi des financements appropriés comme ce fut déjà le cas pour le PNPC⁹³.

L'enjeu pour la Méditerranée est aujourd'hui d'importance et dépasse bien sûr le seul cadre des deux espèces de *Caulerpa* envahissantes étudiées dans ce travail. Il faudrait réussir à mettre en place les instruments permettant le ralentissement des introductions d'espèces, conformément aux engagements internationaux. Il est fondamental, et conforme au **Principe de précaution**, de ne plus reporter, l'application des mesures nécessaires au contrôle des espèces introduites, sous le prétexte de l'attente de nouvelles connaissances scientifiques, inévitablement perfectibles, ou d'une évaluation plus précise des risques encourus.

92. Ce point est important, en effet, une simple interdiction d'introduction dans la nature serait sans effet car elle ne permet pas la prévention des introductions non délibérées (qui, par exemple représentent 100% des introductions en Méditerranée, C.F. Boudouresque comm. Pers.).

93. En Méditerranée française, 4 sites Natura 2000 sont concernés par l'expansion de *C. taxifolia*.

9. Glossaire

Allélopathie. Inhibition par une plante du développement d'autres plantes croissant dans son voisinage par sécrétion de substances nocives au niveau de ses feuilles ou de ses racines.

Algicide. Substance qui a le pouvoir de tuer les algues.

Anoxiques (conditions -). Pénurie d'oxygène dans un milieu (eau ou sédiment par exemple).

Axénique. Qualifie une culture ou élevage d'une espèce dans un milieu ne contenant aucune autre espèce vivante, en particulier des Bactéries.

Ballast. Chargement d'un navire qui vise à en assurer l'équilibrage. L'eau de ballast est de l'eau de mer (anciennement de la roche ou du sable) pompée avant le voyage de retour d'un bateau vide. Ce ballast est rejeté en mer, parfois à des milliers de kilomètres de distance du lieu de prélèvement, avant le chargement de la cargaison du navire. La gestion des risques d'introduction par ces eaux de ballasts est recommandée par l'Organisation maritime internationale.

Benthique. Organisme mobile ou fixé, vivant sur – ou en étroite relation avec - le fond des océans.

Biocénose. Association équilibrée d'animaux et de végétaux qui vivent dans un même milieu, leur *biotope*.

Biotope. Milieu soumis à des conditions écologiques homogènes, support physique d'une biocénose (on utilise également le terme "habitat").

Biodiversité. Diversité du monde vivant, depuis le niveau des gènes (diversité génétique) et des espèces (diversité spécifique) jusqu'à celui des fonctions et des écosystèmes (biodiversité structurale ou écodiversité).

Chaîne trophique ou **Chaîne alimentaire.** Ensemble des relations qui s'établissent entre des organismes en fonction de la façon dont ceux-ci se nourrissent. On distingue différents niveaux dans cette chaîne alimentaire, des producteurs (par exemple, algues) des consommateurs primaires (herbivores), des consommateurs secondaires (carnivores) et des décomposeurs (ou détritivores). Le terme de réseau trophique (du grec trophê, nourriture) est en fait plus approprié.

Clone. Population composée d'individus tous génétiquement identiques ; elle résulte de la multiplication végétative (bourgeoisement) d'un individu unique.

Colonie. Réunion d'individus d'une même espèce.

Cour de justice internationale de La Haye. Organe judiciaire principal des Nations Unies, fonctionnant conformément à un Statut annexé à la Charte, et dont la mission est de régler, par des arrêts, les différents d'ordre juridique entre Etats et de donner des avis consultatifs aux organes de l'O.N.U. et aux institutions spécialisées. Cette cour est toutefois peu saisie, les états préférant l'arbitrage pour régler leurs conflits [cf. Tribunal arbitral].

Cytoplasme. Contenu cellulaire à consistance de gel, qui constitue l'intérieur de la cellule et qui contient le (ou les) noyau(x) et les divers organites.

Ecosystème. Ensemble du biotope et de la biocénose qui s'y établit.

Endémique. Qui a une distribution géographique limitée, limitation qui revêt une signification au regard de la biogéographie et de l'histoire des espèces.

Endogé. Qui vit à l'intérieur du substrat.

Gamète. Cellule reproductrice. Cette cellule fusionnera avec un autre gamète, de sexe opposé, lors de la reproduction sexuée, afin de former un individu original du point de vue génétique.

Habitat. cf. biotope. Le biotope est constitué d'habitats.

Hybride. Une hybridation est le croisement entre deux variétés différentes ; cette hybridation s'exprime parfois par une « vigueur hybride » (ou hétérosis) du nouvel individu lorsque l'hybride développe les caractéristiques les plus avantageuses des variétés parentes.

Lessepsien(ne) (immigrant ou espèce -). Espèce de mer Rouge arrivée en Méditerranée grâce à la communication ouverte entre ces deux mers par le creusement du canal de Suez, à la fin du 19^{ème} siècle. Ces espèces sont dites "espèces Lessepsiennes", d'après le nom de Ferdinand de Lesseps qui a imaginé et dirigé le creusement de ce canal. Près de 300 espèces du nord de la Mer Rouge sont ainsi entrées en Méditerranée, ce qui constitue le plus grand événement actuel, sur le plan biogéographique, à l'échelle de l'Océan mondial (Boudouresque, 2001 pour une revue). La plupart de ces espèces sont cantonnées à la Méditerranée orientale et ne dépassent pas la Sicile et la Tunisie.

Indigène. Se dit d'un organisme originaire de la région où il vit.

Infralittoral. Etage marin défini par la présence des phanérogames marines et des algues photophiles. En Méditerranée, il s'étend entre le voisinage du niveau moyen de la mer et 20-40 m de profondeur.

Invertébrés. Organismes ne possédant pas de colonne vertébrale, comme les vers, les mollusques, les crustacés, les éponges, etc.

Noyau. Organite contenu dans la cellule et contenant le matériel génétique.

OGM - Organisme génétiquement modifié. Est défini comme « tout organisme dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou recombinaison naturelle.

Plasmolyse. Perte d'eau d'une cellule vivante placée dans un liquide hypertonique entraînant une rétraction du cytoplasme autour du noyau. Les Caulerpes, dont l'appareil végétatif est un syncytium unique, c'est à dire une enveloppe entourant une masse unique de cytoplasme, peut être assimilé à une cellule géante.

Principe de précaution. Principe édicté lors de la conférence sur la diversité biologique de Rio (1992) qui stipule que "en cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives, visant à prévenir la dégradation de l'environnement". Ce principe est libellé de la manière suivante dans la "Charte de l'environnement" (projet de Loi constitutionnelle de la République française, 2003) "Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution, à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin d'éviter la réalisation du dommage ainsi qu'à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques encourus".

Prud'homie. Ce sont des unités de gestion des eaux territoriales qui ont à leur tête un Premier Prud'homme élu par les pêcheurs.

Station. La station correspond à un espace où l'algue a été rencontrée.

Substrat. Support sur lequel vit un organisme ou une communauté (ex. substrat dur : la roche, une épave ; substrat meuble : le sable, la vase).

Tribunal arbitral. le Règlement arbitral est un mode de règlement juridique consistant dans le recours des parties à des juges de leur choix chargé de régler le conflit par une décision obligatoire.

Zygotes. Œuf, cellule issue de la fusion des gamètes.

10. Bibliographie

- AMADE P., JONCHERAY L., LORU F., PESANDO D., 2001. Caulerpenyne behaviour in seawater : by-products investigations. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 158-167.
- ANONYME, 1997. National strategy for invasive plant management. Federal interagency committee for the management of Noxious and exotic weeds. <http://refuges.fws.gov>
- ANONYME, 1999. Joint SCC/SCFA National Taskforce on the Prevention and Management of Marine Pest Incursions. SCC/SCFA publ., Australia : 1-85.
- ARGYROU M., DEMETROPOULOS A., HADJICHRISTOPHOROU M., 1999. The impact of *Caulerpa racemosa* on the macrobenthic communities in the coastal waters of Cyprus. Proceedings of the workshop on invasive *Caulerpa* in the Mediterranean. Heraklion, Crete, Greece, 18-20 March 1998. UNEP publ., Athens, Greece : 139-158.
- AVON M., HENOCQUE Y., SAUZADE D., DENIS J., DIMEET J., CIAPETTI N., SKIERNIEWSKI E., 1994. Algue *Caulerpa taxifolia* - Qualification des techniques d'éradication. *First international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., GRAVEZ V. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 323-326.
- AVON M., DIMEET J., HENOCQUE Y., SAUZADE D., SKIERNIEWSKI E., 1996. Eradication de l'algue *Caulerpa taxifolia*. Démonstration des performances des techniques de destruction *in situ*. *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Univ. Barcelona publ., Spain : 135-137.
- BEC E., BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., S. LUCCHINI, 2002. Expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : Evaluation de l'incidence économique et représentations sociales d'une pollution biologique. Institut d'Economie Publique et Ministère de l'Amenagement du Territoire et de l'Environnement, Fr. : 1-188.
- BELLAN-SANTINI D., 1995. Faune d'invertébrés du peuplement à *Caulerpa taxifolia*. Données préliminaires pour les côtes de Provence (Méditerranée nord-occidentale). *Biol. mar. Médit.*, 2 (2) : 635-643.
- BELSHER T., 2001. *Caulerpa taxifolia*, Parc national de Port-Cros. Eléments de détermination des zones à risqué. Note au Parc national de Port-Cros : 1-4.
- BENZIE J.A.H., PRICE I.R., BALLMENT E., 1997. Population genetics and taxonomy of *Caulerpa* (Chlorophyta) from the Great Barrier Reef, Australia. *J. Phycol.*, 33 : 491-504.
- BERNARD G., GRAVEZ V., 2000. *Caulerpa taxifolia* : l'expansion d'une algue en Méditerranée. Eléments de gestion de l'expansion des espèces envahissantes dans les aires marines protégées. Fondation TOTAL, Parc National de Port-Cros et GIS Posidonie, GIS Posidonie publ., Fr. : 1-14.
- BONNAL L., 1999. Développement d'une méthode de contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* : la couverture à émission d'ions cuivriques. Diplôme de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, Montpellier, Fr. : 1-93 + 6 pl. + Annexes 1-10.
- BONNAL L., SANDEAUX R., SANDEAUX J., GAVACH C., UCHIMURA M., BACCOU J.C., COMBES J.F., GRAVEZ V., PALLUY F., 2001. Destruction of *Caulerpa taxifolia* by copper diffusion from textile covers. Study of copper toxicity and results *in situ*. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 281-288.
- BOUDOURESQUE C.F., 1999. Introduced species in the Mediterranean : routes, kenetics and consequences. *Proceedings of the workshop on invasive Caulerpa in the Mediterranean*. Heraklion, Crete, Greece, 18-20 March 1998. UNEP publ., Athens, Greece : 51-72.
- BOUDOURESQUE C.F., 2001. Les espèces introduites et invasives en milieu marin. GIS Posidonie publ., Fr. : 1-88.
- BOUDOURESQUE C.F., 2002. The spread of a non native species, *Caulerpa taxifolia*. Impact on the Mediterranean biodiversity and possible economic consequences. In : *Tourism, Biodiversity and Information*, DI CATRI F., BALAJI V. eds., Backhuis publ., Leiden : 75-87.
- BOUDOURESQUE C.F., 2003. Les espèces introduites en milieu marin : faut-il s'en inquiéter ? A la découverte de Scandula et du Fangu, Association Cunniscenza di Scandula è di u Fangu édit., Albania publ., Ajaccio : 101-120.
- BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., RIBERA M.A., BALLESTEROS E., 1995. Spread of the green alga *Caulerpa taxifolia* (*Caulerpales*, Chlorophyta) in the Mediterranean : possible consequences of a major ecological event. *Scientia marina*, 59 (suppl. 1) : 21-29.

- BOUDOURESQUE C.F., VERLAQUE M., 2002. Biological pollution in the Mediterranean Sea : invasive versus introduced macrophytes. *Mar. Poll. Bull.*, 44 : 32-38.
- BOUDOURESQUE C.F., LEMEE R., MARI X., MEINESZ A., 1996a. The invasive alga *Caulerpa taxifolia* is not a suitable diet for the sea-urchin *Paracentrotus lividus*. *Aquatic Botany*, 53 : 245-250.
- BOUDOURESQUE C.F., VAN KLAVEREN M.C., VAN KLAVEREN P., 1996b. Proposal for a list of threatened or endangered marine and brackish species (plants, invertebrates, fish, turtles and mammals) for inclusion in appendices I, II and III of the Bern Convention. Council of Europe, Document S/TPVS96/TPVS48E, 96A : 1-138.
- BOUDOURESQUE C.F., LEDIREAC'H L., MONIN M., MEINESZ A., 2002. Scientific papers and documents dealing with the alga *Caulerpa taxifolia* introduced to the Mediterranean. Thirteenth edition. GIS Posidonie publishers, Fr. : 1-85.
- BUIA M.C., GAMBI M.C., TERLIZZI A., MAZZELLA L., 2001. Colonization of *Caulerpa racemosa* along the southern Italian coast : distribution, phenological variability and ecological role. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 352-360.
- BURTAIRE L., 1997. Biologie de l'ascoglosse tropicale *Oxynoë azuropunctata* dans le cadre de la lutte biologique contre *Caulerpa taxifolia*. Mém. DEA Sciences de l'Environnement Marin, Université de la Méditerranée, Fr : 1-40 + annexes.
- CARLTON J.T., 1997. La lutte biologique, avantages et risques. *Séminaire international "Dynamique d'espèces marines invasives : application à l'expansion de Caulerpa taxifolia en Méditerranée"*, Lavoisier publ., Paris, Fr. : 279-284.
- CARVALHO N., LIDDLE L., CAYE G., MEINESZ A., 1998. Current knowledge on the biological cycle of the genus *Caulerpa* and karyological studies on *Caulerpa taxifolia*. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 127-132.
- CECCHERELLI G., CAMPO, 2002. Different effects of *Caulerpa racemosa* on two co-occurring seagrasses in the Mediterranean. *Bot. Mar.*, 45 (1) : 71-76.
- CECCHERELLI G., CINELLI F., 1999. Effects of *Posidonia oceanica* canopy on *Caulerpa taxifolia* size in a north-western Mediterranean bay. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 240 : 19-36.
- CECCHERELLI G., PIAZZI L., 2001. Dispersal of *Caulerpa racemosa* fragments in the Mediterranean : lack of detachment time effect on establishment. *Bot. Mar.*, 44 (3) : 209-213.
- CECCHERELLI G., SECHI N., 2002. Nutrient availability in the sediment and the reciprocal effects between the native seagrass *Cymodocea nodosa* and the introduced rhizophytic alga *Caulerpa taxifolia*. *Hydrobiology*, 474 (1-3) : 57-66.
- CECCHERELLI G., PIAZZI L., CINELLI F., 2001a. The role of vegetative fragments in the recruitment process of *Caulerpa taxifolia* and *Caulerpa racemosa*. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 111-117.
- CECCHERELLI G., PIAZZI L., CINELLI F., 2001b. The development of *Caulerpa racemosa* at the margin of *Posidonia oceanica*. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 376-384.
- CHARRIN J.P., EMERY E., GRAVEZ V., 2001. Procédé industriel d'éradication de *Caulerpa taxifolia* par diffusion d'algicide au contact de l'algue : développements, évaluations et perspectives. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 289-294.
- COLLADO-VIDES L., 2002. Morphological plasticity and invasive potential of some *Caulerpa* species. Abstract from the International *Caulerpa taxifolia* Conference, San Diego, 2002. <http://sgnis.org/publicat/collvide.htm>
- COQUILLARD P., THIBAUT T., HILL D.R.C., GUEUGNOT J., MAZEL C., COQUILLARD Y., 2000. Simulation of the mollusc *Ascoglossa Elysia subornata* population dynamics : application to the potential biocontrol of *Caulerpa taxifolia* growth in the Mediterranean Sea. *Ecological Modelling*, 135 : 1-16.
- COTTALORDA J.M., ROBERT P., CHARBONNEL E., DIMEET J., MENAGER V., TILLMAN M., VAUGELAS J. de, VOLTO E., 1996. Eradication de la colonie de *Caulerpa taxifolia* découverte en 1994 dans les eaux du parc National de Port-Cros (Var, France). *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Univ. Barcelona publ., Spain : 149-155.
- COTTALORDA J.M., CHARBONNEL E., GRAVEZ V., 1997. *Caulerpa taxifolia* : il y a le feu sous la mer. *Mer et Littoral*, Fr., 23 : 48-55.
- COTTALORDA J.M., GRAVEZ V., ANTOLIC A., ARANDA A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., CASSAR N., CINELLI F., DARDER-RIBOT J.D., ORESTANO C., GRAU-JOFRE A., JAKLIN A., MEINESZ A., RODRIGUEZ-PRIETO C., SPAN A., THIBAUT T., VAUGELAS J. de, ZAVODNIK N., ZULJEVIC A., 1998. Second international campaign for public awareness of the *Caulerpa taxifolia* problem. An essential tool to collect cartographic data and to slow down the spread of this alga. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 9-16.
- CUNY P., SERVE L., JUPIN H., BOUDOURESQUE C.F., 1995. Water soluble phenolic compounds of marine phanerogam *Posidonia oceanica* in a Mediterranean area colonised by the introduced Chlorophyte *Caulerpa taxifolia*. *Aquatic Botany*, 52 : 237-242
- DUMAY O., FERNADEZ C., PERGENT G. 2002a. Primary production and vegetative cycle in *Posidonia oceanica* when in competition with the green algae *Caulerpa taxifolia* and *Caulerpa racemosa*. *J. mar. Biol. Assoc. UK*, 82 (3) : 379-387.
- DUMAY O., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., AMADE P., 2002b. Variations in caulerpenyne contents in *Caulerpa taxifolia* and *Caulerpa racemosa*. *J. chem. Ecol.*, 28 (2) : 343-352.
- DURAND C., MANUEL M., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., VERLAQUE M., LE PARCO Y., 2002. Molecular data suggest a hybrid origin for the invasive *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea. *J. evol. Biol.*, 15 : 122-133.
- ESCOUBET S., DUPEUX D., ESCOUBET P., 1998. Utilisation du chlorure de sodium comme moyen d'éradication de *Caulerpa taxifolia* (Vahl) C. Agardh. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 117-124.
- FAMA P., JOUSSON O., ZANINETTI L., MEINESZ A., DINI F., DI GUISEPPE G., MILLAR A.J.K., PAWLOWSKI J., 2002. Genetic polymorphism of *Caulerpa taxifolia*. *J. Evol. Biol.*, 15 : 618-624.
- FAO, 1996. FAO technical guidelines for responsible Fisheries – Precautionary Approach to capture fisheries and species introductions – 2. Food & Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/DOCREP/003/W3592E/w3592e00.htm>
- FRISCH S., MURRAY S., 2002. The availability of *Caulerpa* spp. And "Live rock" in retail aquarium outlets in Southern California. Abstract from International *Caulerpa taxifolia* Conference 2002, San Diego (CA) : <http://sgnis.org/publicat/frismurr.htm>
- GAMBI M.C., TERLIZZI A., 1998. Record of large population of *Caulerpa racemosa* (Forsskl) J. Agardh (Chlorophyceae) in the Gulf of Salerno (Southern Tyrrhenian Sea, Italy). *Biol.mar.Medit.*, 5 (1) : 553-556.
- GAVACH C., BONNAL L., UCHIMURA M., SANDEAUX R., SANDEAUX J., SOUARD R., LAMAZE B., LASSERRE J.C., FOUGAIROLLE C., COMBES J.F., GRAVEZ V., 1998. Destruction de *Caulerpa taxifolia* par la technique de la couverture à ions

- cuvriques. Développements pré-industriels et premiers essais. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 101-104.
- GAVACH C., SANDEAUX R., SANDEAUX J., 2001. Can we predict the eco-toxicological effects resulting from the treatment of *Caulerpa taxifolia* by cupric ions ? *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 270-280.
- GILLESPIE R.D., MEINESZ A., CRITCHLEY A.T., 1997. Growth responses of *Caulerpa taxifolia* (Ulvoephyceae, Chlorophyta) from the South African aquarist trade. A potential invasive of South African coastal waters. *South Africa J. Bot.*, 63 (6) : 480-483.
- GRAU A.M., POU S., RIERA F., PASTOR E., BALLESTEROS E., 1996. Monitoring of the population of *Caulerpa taxifolia* in Cala d'Or (Mallorca, Western Mediterranean) : situation at the end 1994. *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Univ. Barcelona publ., Spain : 131-133.
- GRAU A.M., RIERA F., MASSUTI E., 1998. Programa de seguimiento de la expansión del alga *Caulerpa taxifolia* en las islas Baleares. Años 1995-1997. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 69-77.
- GRAVEZ V., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., COTTALORDA J.M., 1998. Eléments pour une stratégie de contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en région Provenances-Alpes-Côte d'Azur. DIREN PACA (Ministère de l'Environnement) et GIS Posidonie publ., Fr. : 1-42.
- GRAVEZ V., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., COTTALORDA J.M., 1999a. Eléments pour une stratégie de contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en région Provenances-Alpes-Côte d'Azur. DIREN PACA (Ministère de l'Environnement) et GIS Posidonie publ., Fr. : 1-37.
- GRAVEZ V., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., COTTALORDA J.M., AMADE P., ARANDA A., BALLESTEROS E., BELSHER T., CINELLI F., COQUILLARD P., DINI F., DUPUY DE LA GRANRIVE A., EL ABED A., GAVACH C., GRAU A., HARMELIN-VIVIEN M., HILL D., JAFFRENOU B., LEDIREACH L., MATRICARDI G., ORESTANO C., PERGENT G., PESANDO D., PIETRA F., SENESI S., VICENTE N., ZULJEVIC A., 1999b. Contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. Rapport final du programme Life de la Commission européenne, N° Life95/F/A31/EPT/782 v. 1.2. GIS Posidonie. GIS Posidonie publ., Fr. : i-v + 1-152 + 14 documents annexes.
- GRAVEZ V., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., COTTALORDA J.M., 1999c. Est-il possible de contrôler l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée ? propositions pour une stratégie. *Proceedings of the workshop on invasive Caulerpa in the Mediterranean*. Heraklion, Crete, Greece, 18-20 March 1998. UNEP publ., Athens, Greece : 115-126.
- GRAVEZ V., BERNARD G., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., COTTALORDA J.M., VAUGELAS J. de, 2000. *Caulerpa taxifolia* : éléments de synthèse. Programme Life DGXI (Communauté européenne), DIREN PACA (Ministère de l'Environnement), GIS Posidonie publ. (ISBN 2-905540-25-7) : 1-32.
- GRAVEZ V., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., VERLAQUE M., COTTALORDA J.M., GUITTON L., BERNARD G., ESCOFFIER B., BONHOMME P., 2001. *Caulerpa taxifolia* : l'expansion d'une algue tropicale en Méditerranée. Conséquences pour l'environnement et les activités humaines. Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et GIS Posidonie publ. (ISBN 2-905540-26-5) : 1-25.
- GREY D., 2001. *Caulerpa taxifolia* : invasive weed prompt response actions. *Fish. N.S.W.*, 4 (1) : 4-5.
- HARMELIN-VIVIEN M., FRANCOUR P., HARMELIN J.G., 1999. Impact of *Caulerpa taxifolia* on Mediterranean fish assemblages : a six year study. *Proceedings of the workshop on invasive Caulerpa in the Mediterranean*. Heraklion, Crete, Greece, 18-20 March 1998. UNEP publ., Athens, Greece : 127-138.
- HARMELIN-VIVIEN M., FRANCOUR P., HARMELIN J.G., LE DIREAC'H L., 2001. Dynamics of fish assemblage alterations caused by the introduced alga *Caulerpa taxifolia* near Menton (France). *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 236-245.
- HILL D., 1997. Modélisation des processus d'expansion, application à *Caulerpa taxifolia*. *Dynamique d'espèces marines invasives : application à l'expansion de Caulerpa taxifolia en Méditerranée*, Lavoisier publ., Paris, Fr. : 219-230.
- ICES, 1995. ICES Code of practice on the introductions and transferts of Marine Organisms 1994. ICES publ. : 1-13.
- IUCN-SSG, 2000. IUCN Guidelines for the prevention of biodiversity loss caused by alien invasive species. <http://www.iucn.org/themes/ssc/pubs/policy/invasivesEng.htm>
- IUCN, 2000. 100 of the world's worst invasive species. A selection from the global invasive species database. *Aliens*, 12, special lift-out : 1-12. <http://www.issg.org/booklet.pdf>
- JAFFRENOU B., ODDONE L., 1994. Procédé de maîtrise et de réduction du développement de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. *First international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., GRAVEZ V. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 339-340.
- JAFFRENOU B., ODDONE L., 1996. Procédé de maîtrise et de réduction du développement de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Publicacions Universitat Barcelona : 145-147.
- JAFFRENOU B., ODDONE L., 1998. Procédé de maîtrise et de réduction du développement de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. Campagne 1997. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 89-93.
- JAVEL F., MEINESZ A., THIBAUT T., COTTALORDA J.M., 2005. Suivi de l'invasion des algues introduites *Caulerpa taxifolia* et *Caulerpa racemosa* en Méditerranée : situation devant les côtes françaises à la fin 2004. Rapport final, Laboratoire Environnement Marin Littoral – Université de Nice-Sophia Antipolis, LEML – UNSA publ. : 1-26 + annexes.
- JOUSSON O., PAWLOWSKI J., ZANINETTI L., MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., 1998. Molecular evidence for the aquarium origin of the green alga *Caulerpa taxifolia* introduced to the Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 172 : 275-280.
- JOUSSON O., PAWLOWSKI J., ZANINETTI L., ZECHMAN E.W., DINI F., DI GUISEPPE G., WOODFIELD R., MILLAR A., MEINESZ A., 2000. Invasive alga reaches California. *Nature*, 408 : 157-158.
- JUNG V., THIBAUT T., MEINESZ A., POHNERT G., 2002. Comparison of the wound-activated transformation of caulerpenyne by invasive and noninvasive *Caulerpa* species of the Mediterranean. *J.Chem.Ecol.* 28 : 2091-2105.
- KEPPNER S.M. & CAPLEN R.T., 1999. A prevention program for the Mediterranean strain of *Caulerpa taxifolia*. Aquatic Nuisance Species Task Force :1-15. <http://www.anstaskforce.gov/Caulerpa.htm>
- KLEMM C. de, 1997. Le Protocole relatif aux aires spécialement protégées et à la diversité biologique en Méditerranée et la Convention sur la Diversité Biologique. Etude comparative. CAR/ASP, Plan d'Action pour la Méditerranée, PNUE, Tunis : 1-28.
- KNOEPFFLER H., KNOEPFFLER-PEGUY M., 1996. Eléments juridiques relatifs à la présence de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Univ. Barcelona publ., Spain : 431-439.
- KOMATSU T., MEINESZ A., BUCKLES D., 1997. Temperature and light responses of alga *Caulerpa taxifolia* introduced into the Mediterranean Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 146 : 145-153.

- LHMA – SORIS / SIVOM du Littoral des Maures, 1999. Analyse et validation d'un procédé de contrôle de l'algue *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. Rapport SIVOM du Littoral des Maures 1-20.
- MAGRI M., PIAZZI L., SERENA F., 2001. La présence de *Caulerpa racemosa* le long des côtes septentrionales de la Toscane et les conséquences possibles sur l'activité de pêche. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 338-344.
- MATRICARDI G., PORRO R., PIROLA E., 2001. *Caulerpa taxifolia* : an ecological problem transformed into a scientific information issue. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 100-107.
- MEINESZ A., 1997a. L'indispensable médiatisation. *Pour la Science (Scientific American)*, Fr., 234 : 9.
- MEINESZ A., 1997b. Utilisation d'Ascoglosses pour la lutte biologique contre *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. *Dynamique d'espèces marines invasives : application à l'expansion de Caulerpa taxifolia en Méditerranée*, Lavoisier publ., Paris, Fr. : 291-300.
- MEINESZ A., 1999. Killer algae. The true tale of a biological invasion. The University of Chicago Press, Chicago and London : i-xvi + 1-360 + 4 pl.
- MEINESZ A., HESSE B., 1991. Introduction et invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée nord-occidentale. *Oceanologica Acta*, 14 (4) : 415-426.
- MEINESZ A., THIBAUT T., 1998. The biological control of an invasive species in the open sea : need of an international decision. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 113-116.
- MEINESZ A., HESSE B., MARI X., 1991. Situation des zones atteintes par l'algue *Caulerpa taxifolia* sur la côte d'Azur. Rapport Laboratoire Environnement marin littoral, Université de Nice Sophia-Antipolis et GIS Posidonie : 1-22.
- MEINESZ A., VAUGELAS J. de, BENICHO L., CAYE G., COTTALORDA J.M., DELAHAYE L., FEBVRE M., GARIN S., KOMATSU T., LEMEE R., MARI X., MOLENAAR H., PERNEY L., VENTURINI A., 1993a. Suivi de l'expansion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : situation au 31 décembre 1992. Rapport Laboratoire Environnement Marin Littoral, Université de Nice-Sophia Antipolis et GIS Posidonie : 1-80.
- MEINESZ A., VAUGELAS J. de, HESSE B., MARI X., 1993b. Spread of the introduced tropical green alga *Caulerpa taxifolia* in northern Mediterranean waters. *J. applied Phycol.*, 5 : 141-147.
- MEINESZ A., VAUGELAS J. de, COTTALORDA J.M., BENICHO L., BLACHIER J., CAYE G., CHAMBET P., DELAHAYE L., FEBVRE M., GARIN S., KOMATSU T., LEMEE R., MARI X., MOLENAAR H., PERNEY L., PIETKIEWICZ D., 1994. Suivi de l'invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* devant les côtes françaises de la Méditerranée. Situation au 31 décembre 1993. Rapport Laboratoire Environnement Marin Littoral, Université de Nice Sophia Antipolis : 1-100.
- MEINESZ A., BENICHO L., BLACHIER J., KOMATSU T., LEMEE R., MOLENAAR H., MARI X., 1995a. Variations in the structure, morphology and biomass of *Caulerpa taxifolia* in the Mediterranean Sea. *Bot. Mar.*, 38 : 499-508.
- MEINESZ A., VAUGELAS de J., COTTALORDA J.M., CAYE G., CHARRIER S., COMMEAU T., DELAHAYE L., FEBVRE M., JAFFRENOU F., LEMEE R., MOLENAAR H., PIETKIEWICZ D., 1995b. Suivi de l'invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* devant les côtes françaises de la Méditerranée. Situation au 31 décembre 1994. Rapport Laboratoire Environnement marin littoral, Université de Nice Sophia-Antipolis : 1-122.
- MEINESZ A., COTTALORDA J.M., CHIAVERINI D., BRAUN M., CARVALHO N., FEBVRE M., IERARDI S., MANGIALAJO L., PASSERON-SEITRE G., THIBAUT T., VAUGELAS J. de, 1997. Suivi de l'expansion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : situation au 31 décembre 1996. Rapport Laboratoire Environnement marin Littoral, Université de Nice Sophia-Antipolis publ., Nice : 1-189.
- MEINESZ A., COTTALORDA J.M., CHIAVERINI D., CASSAR N., VAUGELAS J. de, 1998. Suivi de l'expansion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : situation au 31 décembre 1997. LEML (UNSA) and GIS Posidonie publ., Fr. : 1-238.
- MEINESZ A., COTTALORDA J.M., CHIAVERINI D., GARCIA D., THIBAUT T., VAUGELAS J. de, 2001a. Suivi de l'expansion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : situation en France au 31 décembre 2000. LEML (UNSA) publ., Fr. : 1-74.
- MEINESZ A., BELSHER T., THIBAUT T., ANTOLIC B., BEN MUSTAPHA K., BOUDOURESQUE C.F., CHIAVERINI D., CINELLI F., COTTALORDA J.M., DJELLOULI A., EL ABED A., ORESTANO C., GRAU A.M., IVESA L., JAKLIN A., LANGAR A., MASSUTI-PASCUAL E., PEIRANO A., TUNESI L., VAUGELAS J. de, ZAVODNIK N., ZULJEVIC A., 2001b. The introduced green alga *Caulerpa taxifolia* continues to spread in the Mediterranean. *Biol. Inv.*, 3 : 201-210.
- MEINESZ A., COTTALORDA J.M., CHIAVERINI D., GARCIA D., JAVEL F., GILLETTA L., 2002. Suivi de l'invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : situation devant les côtes françaises et monégasques au 31 Décembre 2001. Rapport Laboratoire Environnement marin Littoral, Université de Nice Sophia-Antipolis publ., Nice : 1-261.
- MEYER U., MEINESZ A., 2001. Inquiry on the aquarium cultivation of *Caulerpa taxifolia* in Europe before its introduction into the Mediterranean. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 7-11.
- MILLAR A. & TALBOT B., 2002. The introduction of *Caulerpa taxifolia* in New South Wales, Australia. Abstract of the International *Caulerpa taxifolia* Conference, 2002, San Diego (CA). <http://sgnis.org/publicat/milltalb.htm>
- MURPHY N.E., SCHAFFELKE B., 2003. Use of amplified fragment length polymorphism (AFLP) as a new tool to explore the invasive green alga *Caulerpa taxifolia* in Australia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 246 : 307-310.
- NIZAMUDDIN M., 1991. The Green Marine Algae of Lybia. Edga Publ., Bern : 1-230.
- PANAYOTIDIS P., ZULJEVIC A., 2001. Sexual reproduction of the invasive green alga *Caulerpa racemosa* var. *occidentalis* in the Mediterranean Sea. *Oceanologica Acta*, 24 (2) : 199-203.
- PEDROTTI M.L., MARCHI B., LEMEE R., 1996. Effects of *Caulerpa taxifolia* secondary metabolites on the embryogenesis, larval development and metamorphosis of the sea urchin *Paracentrotus lividus*. *Oceanologica Acta*, 19 (3-4) : 255-262.
- PESANDO D., LEMEE R., FERRUA C., AMADE P., GIRARD J.P., 1996. Effects of caulerpenyne, the major toxin from *Caulerpa taxifolia* on mechanisms related to sea urchin egg cleavage. *Aquat. Toxicol.*, 35 : 139-155.
- PHILLIPS J.A., PRICE I.R., 2002. How different is Mediterranean *Caulerpa taxifolia* (Caulerpales : Chlorophyta) to other populations of the species. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 238 : 61-71.
- PIAZZI L., CECCHERELLI G., 2002. Effects of competition between two introduced *Caulerpa*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 225 : 189-195.
- PIAZZI L., CINELLI F., 1999. Développement et dynamique saisonnière d'un peuplement méditerranéen de l'algue tropicale *Caulerpa racemosa* (Forssk.) J. Agardh. *Cryptogamie, Algol.* 20 (4) : 295-300.
- PIAZZI L., BALATA D., CECCHERELLI G., CINELLI F., 2001a. Comparative study of the growth of the two co-occurring introduced green algae *Caulerpa taxifolia* and *Caulerpa racemosa* along the Tuscan coast (Italy, western Mediterranean). *Cryptog. Algol.*, 22 (4) : 459-466.
- PIAZZI L., CECCHERELLI G., CINELLI F., 2001b. Threats to macroalgal diversity: effects of the introduced alga *Caulerpa racemosa* in the Mediterranean. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 210 : 149-159.

- PIAZZI L., CECCHERELLI G., BALATA D., CINELLI F., 2003. Early patterns of *Caulerpa racemosa* recovery in the Mediterranean Sea : the influence of the algal turfs. *J. mar. Biol. Assoc. UK*, 83 (1) : 27-29.
- PIAZZI L., CECCHERELLI G., MEINESZ A., VERLAQUE V., AKÇALI B., ARGYROU M., BALATA D., BALLESTEROS E., CINELLI F., D'ARCHINO R., JAVEL J., MIFSUD C., PALA D., PANAYOTIDIS P., PEIRANO A., PERGENT G., PETROCELLI A., RUITTON S., ZULJEVIC A. 2005. Invasion of *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea : the balance of Thirteen years of spread. *Cryptogamie, Agol.*, 26 (2) : 189-202.
- PNUE, 1998. Rapport de l'atelier sur les espèces *Caulerpa* invasives en Méditerranée. *Atelier sur les espèces Caulerpa invasives en Méditerranée*, Héraklion, Crète, Grèce, UNEP(OCA)/MED WG.139/4 : 1-17 + 1-12 + 1-2.
- POIZAT C., BOUDOURESQUE C.F., 1996. Méiofaune du sédiment dans des peuplements à *Caulerpa taxifolia* du Cap Martin (Alpes-Maritimes, France). *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Univ. Barcelona publ., Spain : 375-386.
- RELINI G., RELINI M., TORCHIA G., 1998. Fish and epiphytic fauna on *Caulerpa taxifolia* and *Cymodocea nodosa* at Imperia (Ligurian Sea). *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 185-195.
- RELINI G., RELINI M., TORCHIA G., 2000. The role of fishing gear in the spreading of allochthonous species : the case of *Caulerpa taxifolia* in the Ligurian Sea. *ICES J. mar. Sci.*, 57 (5) : 1421-1427.
- RELINI G., MANARATTI G., COPPO S., 2001a. Steps undertaken by the region of Liguria (Italy) for the study of the allochthonous *Caulerpa* species. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 303-312.
- RELINI M., TORCHIA G., RELINI G., 2001b. Fishes of bottoms dominated by *Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa* and *Caulerpa taxifolia*. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 246-255.
- RIBERA M.A., BOUDOURESQUE C.F., 1995. Introduced marine plants, with special reference to macroalgae : mechanisms and impact. In : *Progress in phycological Research*, ROUND F.E., CHAPMAN D.J. eds., Biopress Ltd publ., UK , 11 : 187-268.
- RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V., 1996. Second international workshop on *Caulerpa taxifolia*. Publications de la Universitat de Barcelona, Spain : 1-457.
- RIERA F., POU S., GRAU A.M., DELGADO O., WEITZMANN B., BALLESTEROS E., 1994. Eradication of a population of the tropical green alga *Caulerpa taxifolia* in Cala d'or (Mallorca, Western Mediterranean) : methods and results. *First international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., GRAVEZ V. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 327-331.
- ROBERT P., 2001. Mission d'éradication localisée de l'algue *Caulerpa racemosa* dans les eaux du Parc national de Port-Cros. Rapport Parc national de Port-Cros : 1-17.
- ROBERT P., 2002a. Contrôle de la progression de l'algue *Caulerpa taxifolia* dans les eaux du Parc national de Port-Cros. Rapport Parc national de Port-Cros, mars 2002 : 1-7.
- ROBERT P., 2002 b. Mission de recherche de l'algue *Caulerpa taxifolia* dans les eaux du Parc national de Port-Cros. Nécessité d'une nouvelle stratégie. Rapport Parc national de Port-Cros : 1-4.
- ROBERT P., GRAVEZ V., 1998. Contrôle de l'algue *Caulerpa taxifolia* dans le Parc National de Port-Cros (Var, France). *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 79-87.
- RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., 1994. Impact de *Caulerpa taxifolia* sur une population de l'oursin *Paracentrotus lividus* à Roquebrune-Cap Martin (Alpes-Maritimes, France). *First international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., GRAVEZ V. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 371-378.
- RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., BONHOMME P., BERNARD G., CADIOU G., ESCOFFIER B., 2001. Compétition entre l'algue introduite *Caulerpa taxifolia* et la Phanérogame marine *Posidonia oceanica* en Méditerranée nord-occidentale : suivi pluriannuel de deux carrés permanents. Conseil Régional PACA et GIS Posidonie publ. : 1-45.
- RUITTON S., JAVEL F., CULIOLI J.M., MEINESZ A., PERGENT G., VERLAQUE M. 2005a. First assessment of the *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta) invasion along the French Mediterranean coast. *Mar. Poll. Bull.*, 50 : 1061-1068.
- RUITTON S., VERLAQUE M., BOUDOURESQUE C.F. 2005b. Seasonal changes of the introduced *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Caulerpales, Chlorophyta) at the northwest limit of its Mediterranean range. *Aquatic Botany*, 82 : 55-70.
- RUITTON S., VERLAQUE M., AUBIN G., BOUDOURESQUE C.F. sous presse. Grazing of the introduced *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Caulerpales, Chlorophyta) in Mediterranean sea by herbivorous fish and sea urchins. *Vie et Milieu – Life & Environment*.
- SANT N., DELGADO O., RODRIGUEZ-PRIETO C., BALLESTEROS E., 1996. The spreading of the introduced seaweed *Caulerpa taxifolia* (Vahl) C. Agardh in the Mediterranean Sea : testing the boat transportation hypothesis. *Bot. Mar.*, 39 : 427-430.
- SCHAFFELKE B., MURPHY N., UTHICKE S., 2002. Using genetic techniques to investigate the source of the invasive alga *Caulerpa taxifolia* in three new locations in Australia. *Mar. Poll. Bull.*, 44 (3) : 204-210.
- SILVA P.C., 2003. Historical review of the genus *Caulerpa*. *Cryptogamie, algol.*, 24 (1) : 33-50.
- SIMPERE F., ODY D., BAUDELLOT D., BONNAFOUX F., BARBARROUX C., MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., SCABBIA G., GABRIELIDES G., LOPEZ E., LANGAR H., 1998. L'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée : vers une prise en compte politique ? *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 243-268.
- SMITH C.M., WALTERS L.J., 1999. Fragmentation as a strategy for *Caulerpa* species : fates of fragments and implications for management of an invasive weed. *Mar. Ecol.*, 20 (3-4) : 307-319.
- THIBAUT T., 2001. Etude fonctionnelle, contrôle et modélisation de l'invasion d'une algue introduite en Méditerranée : *Caulerpa taxifolia*. Thèse Doct. Univ. Paris VI, Fr. : 1-272.
- THIBAUT T., MEINESZ A., 2000. Are the Mediterranean ascoglossan molluscs *Oxynoe olivacea* and *Lobiger serradifalci* suitable agents for a biological control against the invading tropical alga *Caulerpa taxifolia* ? *C.R. Acad. Sci. Paris, Life Sci.*, 323 : 477-488.
- THIBAUT T., COQUILLARD P., HILL D., 1999. Simulation de l'expansion potentielle de *Caulerpa taxifolia* dans la baie de Port-Man (Parc national de Port-Cros, Var). Etude Parc national de Port-Cros, Fr. : 1-7 + 5 cartes.
- THIBAUT T., COQUILLARD P., VAUGELAS J. de, COQUILLARD Y., 2001a. Preliminary computer model of the biological control of *Caulerpa taxifolia*. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 298-302.
- THIBAUT T., MEINESZ A., AMADE P., CHARRIER S., De ANGELIS K., IERARDI S., MANGIALAJO L., MELNICK J. & VIDAL V., 2001b. *Elysia subornata* (Mollusca) a potential control agent of the alga *Caulerpa taxifolia* (Chlorophyta) in the Mediterranean Sea. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, 81 (3) : 497-504.

- TOLAY M., EVIRGEN A., CIRIK S., 2001. Observations of *Caulerpa racemosa* in Turkish coasts of the Aegean Sea and the Mediterranean Sea. *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 328-333.
- UCHIMURA M., 1999. Contribution à l'étude de *Caulerpa taxifolia* en vue du contrôle de son expansion. Examen d'un modèle de toxicité, sensibilité au cuivre, destruction par la technique de la couverture échangeuse d'ions. Thèse Doct. Univ. Montpellier II, Fr. : 1-167.
- UCHIMURA M., BACCOU J.C., BONNAL L., SANDEAUX R., SANDEAUX J., GAVACH C., 1998. Etude comparative de l'action de l'ion cuivrique sur *Caulerpa taxifolia* et d'autres espèces végétales présentes en Méditerranée. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 95-99.
- VALLEE A., 2002. Economie de l'environnement. Seuil publ., Fr. : 1-345
- VAUGELAS J. de, COTTALORDA J.M., CHARRIER S., COMMEAU T., DELAHAYE L., JAFFRENOU F., LEMEE R., MEINESZ A., MOLENAAR H., 1996. Cartographie de l'invasion de *Caulerpa taxifolia*. Situation sur les côtes françaises de la Méditerranée à la fin de 1994. *Second international workshop on Caulerpa taxifolia*, RIBERA M.A., BALLESTEROS E., BOUDOURESQUE C.F., GOMEZ A., GRAVEZ V. eds., Univ. Barcelona publ., Spain : 91-97.
- VAUGELAS J. de, MEINESZ A., COQUILLARD P., HILL D., 1998. A computer model to simulate *Caulerpa taxifolia* eradication. *Third international workshop on Caulerpa taxifolia*, BOUDOURESQUE C.F., GRAVEZ V., MEINESZ A., PALLUY F. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 63-67.
- VAUGELAS J. de, MEINESZ A., ANTOLIC B., BALLESTEROS E., BELSHER T., CASSAR N., CECCHERELLI G., CINELLI F., COTTALORDA J.M., FRADA-ORESTANO C., GRAU A.M., JAKLIN A., MORUCCI C., RELINI M., SANDULLI R., SPAN A., TRIPALDI G., VAN KLAVEREN P., ZAVODNIK N., ZULJEVIC A., 1999. Standardization proposal for the mapping of *Caulerpa taxifolia* expansion in the Mediterranean Sea. *Oceanologica Acta*, 22 (1) : 85-94.
- VERLAQUE M., FRITAYRE P., 1994. Modifications des communautés algales méditerranéennes en présence de l'algue envahissante *Caulerpa taxifolia* (Vahl) C. Agardh. *Oceanologica Acta*, 17 (6) : 659-672.
- VERLAQUE M., BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., GRAVEZ V., 2000. The *Caulerpa racemosa* complex (*Caulerpales*, Ulvophyceae) in the Mediterranean Sea. *Bot. Mar.*, 43 : 49-68.
- VERLAQUE M., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F. 2005. List of invasive or potentially invasive exotic macroalgae in Europe – Final Report. WP 10 SCREENING PROTOCOL. ALIENS European program. UMR CNRS 6540 DIMAR, COM, Marseille, Fr. : 1-28.
- VILLELE X. de, VERLAQUE M., 1995. Changes and degradation in a *Posidonia oceanica* bed invaded by the introduced tropical alga *Caulerpa taxifolia* in the North Western Mediterranean. *Bot. Mar.*, 38 : 79-87.
- WIEDENMANN J., BAUMSTARK A., PILLEN T.L., MEINESZ A., VOGEL W., 2001. DNA fingerprints of *Caulerpa taxifolia* provide evidence for the introduction of an aquarium strain into the Mediterranean Sea and its close relationship to an Australian population. *Mar. Biol.*, 138 : 229-234.
- WILLIAMS S.L., GROSHOLZ E.D., 2002. Preliminary reports from the *Caulerpa taxifolia* invasion in Southern California. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 233 : 307-310.
- ZAVODNIK N., IVESA L., TRAVIZI A., JAKLIN A., 2001. Recent study of *Caulerpa taxifolia* (Chlorophyta) settlement at maliska, Croatia (North Adriatic Sea, Krk Island). *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 118-127.
- ZULJEVIC A., ANTOLIC B., 1999. Country reports : Croatia. Proceedings of the workshop on invasive *Caulerpa* in the Mediterranean. Heraklion, Crete, Greece, 18-20 March 1998. UNEP publ., Athens, Greece : 227-230.
- ZULJEVIC A., ANTOLIC A., 2001a. Partial eradication of *Caulerpa taxifolia* in Stari Grad bay (Croatia). *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 259-265.
- ZULJEVIC A., ANTOLIC A., 2001b. Appearance and eradication of *Caulerpa taxifolia* in the Barbat channel (Croatia). *Fourth international workshop on Caulerpa taxifolia*, GRAVEZ V., RUITTON S., BOUDOURESQUE C.F., LE DIREAC'H L., MEINESZ A., SCABBIA G., VERLAQUE M. eds., GIS Posidonie publ., Fr. : 266-269.
- ZULJEVIC A., ZAVODNIK N., ANTOLIC B., JAKLIN A., SPAN A., 1998. Suivi de l'invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* devant les côtes croates de la Méditerranée : situation au 31 décembre 1997. in : *Suivi de l'invasion de l'algue tropicale Caulerpa taxifolia en Méditerranée : situation au 31 Décembre 1997*. MEINESZ A., COTTALORDA J.M., CHIAVERINI D., CASSAR N., VAUGELAS J. de, eds., LEML (UNSA) and GIS Posidonie publ., Fr. : 211-224.
- ZULJEVIC A., THIBAUT T., ELLOUKAL H., MEINESZ A., 2001. Sea slug disperses the invasive *Caulerpa taxifolia*. *J. mar. Biol. Ass. U.K.*, 81 : 1-2.

11. Acronymes

AMP. Aire Marine Protégées

APHIS. Animal & Plant Health Inspection Service, du Ministère de l'Agriculture des Etats Unis d'Amérique (USAD) – <http://www.aphis.usad.gov>

BASECAUL. Moteur de recherche bibliographique sur les espèces de *Caulerpa* envahissantes. <http://www.gisposidonie.org>

Caulerpa Life I. Programme Life de la Commission européenne sur "L'expansion de l'algue verte tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée. Suivi de l'expansion ; risques liés à la toxicité ; base biologiques et technologiques de l'éradication" (1993-1994).

Caulerpa Life II. Programme Life de la Commission européenne sur le "Contrôle de l'expansion de *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée" (1996- 1999). Le rapport final de ce programme (Gravez *et al.*, 1999b) et des résumés sont disponibles sur le site du GIS Posidonie <http://www.com.univ-mrs.fr/gisposi.htm>

CEAB. Centro de Estudios Avanzados de Blanes, Espagne.

C.O.L. *Caulerpa* On Line, site internet sur *Caulerpa taxifolia* et *Caulerpa racemosa* issu de l'Observatoire de suivi de l'expansion de *Caulerpa taxifolia*. <http://www.caulerpa.org>

CRIMP. Center for Research on Introduced Marine Pests, dépend du CSIRO, Australie. <http://crimp.marine.csiro.au>

CSIRO. Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation, organisme national Australien pour la recherche. <http://www.csiro.au>

DIREN. Direction de l'Environnement pour la Région Provence-Alpes Côte d'Azur, Aix-en-Provence, France.

FAO. Food & Agriculture Organisation, institution spécialisée des Nations Unies pour l'alimentation dans son sens le plus large et incluant notamment l'agriculture, les forêts, les pêches et les industries se rattachent directement à l'alimentation. Créée en 1945.

GIS Posidonie. Groupement d'Intérêt Scientifique pour l'étude de l'environnement marin, Campus Universitaire de Luminy, Marseilles, France. <http://www.gisposidonie.org>

ICES (CIEM). le Conseil International pour l'Exploration de la Mer, est une organisation intergouvernementale, créé en 1902, traitant des sciences marines couvrant l'Océan Atlantique et ses mers adjacentes. Le CIEM est basé au Danemark. Malgré la restriction géographique inscrite dans ses statuts, ses travaux sont reconnus internationalement.

IEB. Institut d'Ecologia Litoral, Universitat de Alicante, Spain.

IFREMER. Institut français pour la recherche et l'exploitation de la mer.

IMO (OMI). International Maritime Organisation, institution intergouvernementale spécialisée sur les transports maritimes (créée en 1958).

ISSG. Invasive Species Specialist Group, World Conservation Union (IUCN), University of Auckland, New Zealand.

IUCN (UICN). International Union for the Conservation of Nature (également Union International pour la Conservation de la Nature), organisation internationale environnementale créée en 1948.

LEML-UNSA. Laboratoire Environnement Marin Littoral, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, France. <http://www.unice.fr/LEML>

LMPM. Laboratoire des Matériaux et Procédés Membranaires, CNRS, Montpellier, France.

MAP (PAM). Plan d'Action pour la Méditerranée. Le PAM, mis en place par les pays méditerranéens, dans le cadre du Programme des Nations Unies pour l'environnement, engage la coopération de ces pays, de l'Union européenne et de nombreuses organisations internationales. Ses objectifs sont notamment l'analyse prospective, l'aide à la gestion du littoral, la surveillance de l'environnement, le contrôle des pollutions et la promotion de la mise en place de sites marins protégées. <http://www.unepmap.org>

MEDD. Ministère français de l'Ecologie et de Développement Durable.

NIMPIS. National Introduced Marine Pest Information System, base de données sur les espèces marines envahissantes du CSIRO, Australie. <http://crimp.marine.csiro.au/nimpis/Default.htm>

PNPC. Parc national de Port-Cros, Hyères, Var, France.

SCCAT. Southern California Caulerpa Action Team, <http://caulerpa.cjb.net>

UNEP (PNUE). United Nations Environment Programme, organisation spécialisée directement rattachée à l'Organisation des Nations Unies (ONU).