

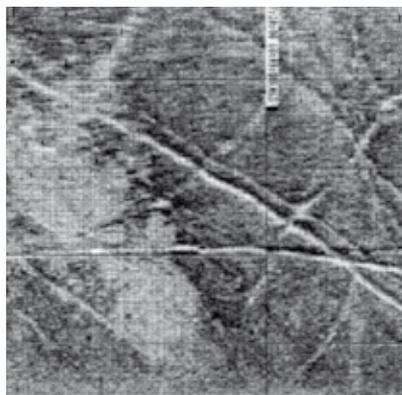


Mediterranean Seagrass Meadows: Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation

A Short Summary

Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques

Résumé



1	4	7	
2	5		
3	6	8	9

Cover pictures:

- 1 Evolution of the average temperature and level of the sea since 1850 (after *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Figure SPM.1. IPCC, Geneva, Switzerland).
- 2 *Cymodocea nodosa* © G. Pergent.
- 3 Mixed meadow of *Posidonia oceanica* & *Cymodocea nodosa* © G. Pergent
- 4 *Halophila stipulacea* © G. Pergent.
- 5 Distribution of *Posidonia oceanica* in the Mediterranean.
- 6 *Posidonia oceanica* meadow © G. Pergent.
- 7 *Posidonia oceanica* meadow © S. Ruitton.
- 8 Traces of trawl nets detected along Cap Corse with the help of a side-scan sonar.
- 9 Foliar shoots of *Posidonia oceanica* © S. Ruitton.

Photos (except as may be stated otherwise):

Copyright M. Foulquié, M.A. Mateo, G. Pergent & S. Ruitton.

The designation of geographical entities in this book, and the presentation of the material, do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IUCN concerning the legal status of any country, territory, or area, or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The views expressed in this publication do not necessarily reflect those of IUCN.

This publication has been made possible in part by funding from the Spanish Agency for International Development Cooperation (AECID).

Reproduction of this publication for educational or other non-commercial purposes is authorized without prior written permission from the copyright holder provided the source is fully acknowledged.

Reproduction of this publication for resale or other commercial purposes is prohibited without prior written permission of the copyright holder.

Published by:
IUCN, Gland, Switzerland and Málaga, Spain.

Copyright:
© 2012 International Union for Conservation of Nature and Natural Resources.

Citation:
Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Verlaque M. 2012. *Mediterranean Seagrass Meadows: Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation, A Short Summary / Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques, Résumé*. Gland, Switzerland and Málaga, Spain: IUCN. 40 pages.

Editing and layout:
François-Xavier Bouillon, F-06800 Cagnes-sur-Mer

Translation in English:
Deadline SARL, F-06570 Saint-Paul-de-Vence

Printing: Solprint, Mijas, Malaga, Spain.

ISBN:
978-2-8317-1457-8

Produced by:
IUCN Centre for Mediterranean Cooperation

Available from:
IUCN Centre for Mediterranean Cooperation
C/ Marie Curie 22
29590 Campanillas, Malaga, Spain
Tel: +34 952 028430
Fax: +34 952 028145
www.iucn.org/mediterranean

Or

IUCN
(International Union for Conservation of Nature)
Publications Service
Rue Mauverney 28
1196 Gland, Switzerland
Tel: +41 22 999 0000
Fax: +41 22 999 0020
books@iucn.org
www.iucn.org/publications

Mediterranean Seagrass Meadows: Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation

A Short Summary

February 2012

Gérard Pergent, GIS Posidonie et Equipe « Ecosystèmes Littoraux », Université de Corse (F)

Hocein Bazairi, Faculté des Sciences Rabat, Université Mohammed V – Agdal (MA)

Carlo Nike Bianchi, Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova (I)

Charles-François Boudouresque, GIS Posidonie et Mediterranean Institute of Oceanography (MIO),
Université d'Aix-Marseille (F)

Maria Cristina Buia, Stazione Zoologica Anton Dohm di Napoli (I)

Philippe Clabaut, Consultant en Géologie littorale et Marine (F)

Mireille Harmelin-Vivien, GIS Posidonie et Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), Université d'Aix-Marseille (F)

Miguel Angel Mateo, Centre d'Estudis Avançats de Blanes – CSIC (ES)

Monica Montefalcone, Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova (I)

Carla Morri, Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova (I)

Sotiris Orfanidis, **Ινστιτούτο Αλιευτικής Έρευνας**, Fisheries Research Institute (GR)

Christine Pergent-Martini, GIS Posidonie et Equipe « Ecosystèmes Littoraux », Université de Corse (F)

Rachid Semroud, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (DZ)

Oscar Serrano, Centre d'Estudis Avançats de Blanes – CSIC (ES)

Marc Verlaque, GIS Posidonie et Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), Université d'Aix-Marseille (F)



1	4	7	
2	5		
3	6	8	9

Photos de couverture :

- 1 Évolution de la température moyenne et du niveau de la mer depuis 1850 (d'après GIEC, *Bilan 2007 des Changements Climatiques : Rapport de Synthèse. Contributions des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Figure RiD.1. GIEC, Genève, Suisse.).
- 2 *Cymodocea nodosa* © G. Pergent.
- 3 Herbier mixte à *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa* © G. Pergent
- 4 *Halophila stipulacea* © G. Pergent.
- 5 Répartition de *Posidonia oceanica* en Méditerranée.
- 6 Herbier à *Posidonia oceanica* © G. Pergent.
- 7 Herbier à *Posidonia oceanica* © S. Ruitton.
- 8 Traces de chaluts mises en évidence le long du cap Corse à l'aide d'un sonar à balayage latéral.
- 9 Faisceaux foliaires de *Posidonia oceanica* © S. Ruitton.

Photos (sauf indication contraire) :

Copyright M. Foulquié, M.A. Mateo, G. Pergent & S. Ruitton.

La terminologie géographique employée dans cet ouvrage, de même que sa présentation, ne sont en aucune manière l'expression d'une opinion quelconque de la part de l'UICN sur le statut juridique ou l'autorité de quelque pays, territoire ou région que ce soit, ou sur la délimitation de ses frontières.

Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles de l'UICN.

Le présent ouvrage a pu être publié grâce au soutien financier de l'Agence espagnole de Coopération internationale pour le Développement.

La reproduction de cette publication à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite préalable du détenteur des droits d'auteur à condition que la source soit dûment citée.

La reproduction de cette publication à des fins commerciales, notamment en vue de la vente, est interdite sans autorisation écrite préalable du détenteur des droits d'auteur.

Publié par : UICN, Gland, Suisse et Malaga, Espagne.

Droits d'auteur :

© 2012 Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources.

Citation:

Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Verlaque M. 2012. *Mediterranean Seagrass Meadows : Resilience and Contribution to Climate Change Mitigation, A Short Summary / Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques, Résumé*. Gland, Switzerland and Málaga, Spain: IUCN. 40 pages.

Edition :

François-Xavier Bouillon, F-06800 Cagnes-sur-Mer.

Traduction en anglais :

Deadline SARL, F-06570 Saint-Paul-de-Vence.

Impression : Solprint, Mijas, Malaga, Espagne.

ISBN :

978-2-8317-1457-8

Produit par :

UICN-Centre de coopération pour la Méditerranée.

Disponible auprès de :

UICN-Centre de coopération pour la Méditerranée
C/ Marie Curie 22
29590 Campanillas, Malaga, Spain
Tel: +34 952 028430
Fax: +34 952 028145
www.iucn.org/mediterranean

ou

UICN (Union internationale pour la conservation de la nature)
Service des publications
Rue Mauverney 28
1196 Gland, Suisse
Tél +41 22 999 0000
Fax +41 22 999 0020
books@iucn.org
www.iucn.org/publications

Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques

Résumé

Février 2012

Gérard Pergent, GIS Posidonie et Equipe « Ecosystèmes Littoraux », Université de Corse (F)

Hoceïn Bazairi, Faculté des Sciences Rabat, Université Mohammed V – Agdal (MA)

Carlo Nike Bianchi, Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova (I)

Charles-François Boudouresque, GIS Posidonie et Mediterranean Institute of Oceanography (MIO),
Université d'Aix-Marseille (F)

Maria Cristina Buia, Stazione Zoologica Anton Dohrn di Napoli (I)

Philippe Clabaut, Consultant en Géologie littorale et Marine (F)

Mireille Harmelin-Vivien, GIS Posidonie et Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), Université d'Aix-Marseille (F)

Miguel Angel Mateo, Centre d'Estudis Avançats de Blanes – CSIC (ES)

Monica Montefalcone, Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova (I)

Carla Morri, Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse (DipTeRis), Università di Genova (I)

Sotiris Orfanidis, **Ινστιτούτο Αλιευτικής Έρευνας**, Fisheries Research Institute (GR)

Christine Pergent-Martini, GIS Posidonie et Equipe « Ecosystèmes Littoraux », Université de Corse (F)

Rachid Semroud, École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (DZ)

Oscar Serrano, Centre d'Estudis Avançats de Blanes – CSIC (ES)

Marc Verlaque, GIS Posidonie et Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), Université d'Aix-Marseille (F)



ABOUT IUCN

IUCN, International Union for Conservation of Nature, helps the world find pragmatic solutions to our most pressing environment and development challenges.

IUCN works on biodiversity, climate change, energy, human livelihoods and greening the world economy by supporting scientific research, managing field projects all over the world, and bringing governments, NGO's, the UN and companies together to develop policy, laws and best practice.

IUCN is the world's oldest and largest global environmental organization, with more than 1,000 government and NGO members and almost 11,000 volunteer experts in some 160 countries. IUCN's work is supported by over 1,000 staff in 45 offices and hundreds of partners in public, NGO and private sectors around the world.

www.iucn.org

AU SUJET DE L'UICN

L'UICN, Union internationale pour la conservation de la nature, aide à trouver des solutions pratiques aux problèmes de l'environnement et du développement les plus pressants de l'heure.

L'UICN œuvre dans les domaines de la biodiversité, des changements climatiques, de l'énergie, des moyens d'existence et lutte en faveur d'une économie mondiale verte, en soutenant la recherche scientifique, en gérant des projets dans le monde entier et en réunissant les gouvernements, les ONG, l'ONU et les entreprises en vue de générer des politiques, des lois et de bonnes pratiques.

L'UICN est la plus ancienne et la plus grande organisation mondiale de l'environnement. Elle compte plus de 1 200 membres, gouvernements et ONG, et près de 11 000 experts bénévoles dans quelque 160 pays. Pour mener à bien ses activités, l'UICN dispose d'un personnel composé de plus de 1 000 employés répartis dans 45 bureaux et bénéficie du soutien de centaines de partenaires dans les secteurs public, privé et ONG, dans le monde entier.

www.uicn.org

Table of contents

Foreword.....	9
A. Specificities of the Mediterranean	11
B. The impact of climate change on Magnoliophyta in the Mediterranean	20
C. Contribution to the mitigation of the consequences of climate change	29
Conclusion.....	35
References.....	37

Sommaire

Avant-propos	9
A. Les spécificités de la Méditerranée	11
B. L'impact des changements climatiques sur les Magnoliophytes en Méditerranée	20
C. Contribution à l'atténuation des conséquences du changement climatique.....	29
Conclusion.....	35
Références bibliographiques	37



Posidonia oceanica meadow. Herbier à *Posidonia oceanica*.

Foreword

THE IUCN GLOBAL MARINE PROGRAMME AND CLIMATE CHANGE

The IUCN Global Marine and Polar Programme (GMPP) is widely engaged in addressing cutting-edge issues posed by current developments in climate change relating to the marine environment, and particularly issues raised by coral reefs, seagrass meadows and mangroves. Activities can be broadly divided into two main categories: firstly, adaptation and resilience from an ecological and social point of view, and secondly, carbon sequestration and mitigation of emissions.

Adaptation

Adaptation to climate change and the resilience of ecosystems is one of the GMPP's main concerns. The IUCN focuses on synergies evolving around the scientific concept of resilience, and marine management and policies. The next step will be to foster the establishment of networks of marine protected areas as, inter alia, they may serve as key tools to enhance the adaptation and resilience of marine ecosystems to global warming, while also protecting biodiversity and allowing for the rebuilding of stocks capable of supporting sustainable fisheries activities.

Sequestration and mitigation

Seagrass meadows offer considerable potential for carbon sequestration, and at a time when carbon credit schemes are becoming increasingly important in combating climate change, growing attention is being given to marine ecosystems and their possibilities. The best solution would be to protect and manage coastal ecosystems that are naturally active in carbon fixation and sequestration (for example, tidal marshlands, mangrove forests and seagrass meadows), so that they remain effective as carbon sinks and even further the potential for sequestration of CO₂.

Avant-propos

LE PROGRAMME MARIN DE L'UICN ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le Programme global marin et polaire de l'UICN (Global Marine and Polar Programme – GMPP) est largement engagé dans la problématique aiguë posée par l'actualité du changement climatique eu égard au milieu marin, notamment par les questions qu'elle soulève pour les récifs coralliens, les herbiers marins et les mangroves. Dans les grandes lignes, ses préoccupations peuvent être classées en deux catégories : d'une part l'adaptation et la résilience du point de vue écologique et social, et d'autre part la séquestration du carbone et l'atténuation des émissions.

Adaptation

L'adaptation au changement climatique et la résilience des écosystèmes forment l'une des préoccupations majeures pour le GMPP. L'UICN se penche sur les synergies qui s'articulent autour du concept scientifique de résilience, et des questions de gestion et de politique marine. La prochaine étape consistera à promouvoir l'établissement de réseaux d'aires marines protégées qui sont, entre autres, susceptibles de constituer des outils de base autant destinés à favoriser l'adaptation et la résilience des écosystèmes marins contre le réchauffement, qu'à protéger la biodiversité et reconstituer des stocks halieutiques capables de soutenir une pêche durable.

Séquestration et atténuation

Les herbiers marins représentent un potentiel de séquestration de carbone considérable et, au moment où le crédit-carbone prend une place grandissante dans la lutte contre le changement climatique, une attention croissante est donnée aux écosystèmes marins et à leurs possibilités. Il faudrait donc protéger et gérer les écosystèmes côtiers naturellement actifs dans la fixation et la séquestration du carbone (estrans, mangroves et herbiers) de manière à ce qu'ils demeurent des puits de carbone efficaces, voire à amplifier ce potentiel de séquestration.

This document is a summary of the technical report on the current state of affairs in the Mediterranean basin¹.

It describes the specific characteristics of the Mediterranean Sea and the phenomenon of climate change observed on the scale of this particular region. It then presents five species of Magnoliophyta documented in its waters.

Secondly, it describes the impact of climate change on Mediterranean seagrasses, firstly with regard to the pressures to which they are subjected and their resilience to them and, secondly, to the communities associated with the marine environments they form.

The last part of the document is devoted to the role played by seagrass meadows in the mitigation of the consequences of climate change, in respect of extreme weather events and the fixation and sequestration of blue carbon.

Ce document est un résumé du rapport technique relatif à l'état de la question dans le bassin méditerranéen¹.

Il décrit les spécificités de la mer Méditerranée et le phénomène du changement climatique observé à l'échelle de cette région. Il présente ensuite les caractéristiques des cinq espèces de Magnoliophytes présentes dans ses eaux.

Dans un second temps, il décrit l'impact du changement climatique sur les herbiers méditerranéens, d'abord en ce qui concerne les pressions qu'il y exerce et leur résilience à ces pressions, et ensuite en ce qui concerne les communautés qui leur sont associées.

La dernière partie du document est consacrée au rôle joué par les herbiers dans l'atténuation des conséquences du changement climatique, en prenant en compte les événements climatiques extrêmes et la fixation ou la séquestration du carbone bleu.

¹ Pergent *et al.*, 2012. *Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée: résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques*. UICN. Currently undergoing publication.

¹ Pergent *et al.*, 2012. *Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée : résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques*. UICN. En cours de publication.

GB	United Kingdom	Royaume-Uni (Gibraltar)	1	Strait of Gibraltar	Détroit de Gibraltar
E	Spain	Espagne	2	Alboran Sea	Mer d'Alboran
F	France	France	3	Balearic Sea	Mer des Baléares
MC	Monaco	Principauté de Monaco	4	Gulf of Lion	Golfe du Lion
I	Italy	Italie	5	Sardinian Sea	Mer de Sardaigne
SLO	Slovenia	Slovénie	6	Ligurian Sea	Mer Ligure
HR	Croatia	Croatie	7	Tyrrhenian Sea	Mer Tyrrhénienne
BIH	Bosnia and Herzegovina	Bosnie-Herzégovine	8	Strait of Sicily	Détroit de Sicile
MNE	Montenegro	Monténégro	9	Gulf of Gabes	Golfe de Gabès
AL	Albania	Albanie	10	Strait of Messina	Détroit de Messine
GR	Greece	Grèce	11	Adriatic Sea	Mer Adriatique
TR	Turkey	Turquie	12	Gulf of Sirte	Golfe de Syrte
SYR	Syria	Syrie	13	Ionian Sea	Mer Ionienne
CY	Cyprus	Chypre	14	Aegean Sea	Mer Égée
RL	Lebanon	Liban	15	Sea of Marmara	Mer de Marmara
IL	Israel	Israël	16	Bosphorus	Détroit du Bosphore
ET	Egypt	Égypte	17	Levantine Sea	Mer du Levant
(LAR)	Libya	Libye	18	Suez Canal	Canal de Suez
TN	Tunisia	Tunisie	19	Black Sea	Mer Noire
DZ	Algeria	Algérie	20	Red Sea	Mer Rouge
MA	Morocco	Maroc			

A. Specificities of the Mediterranean

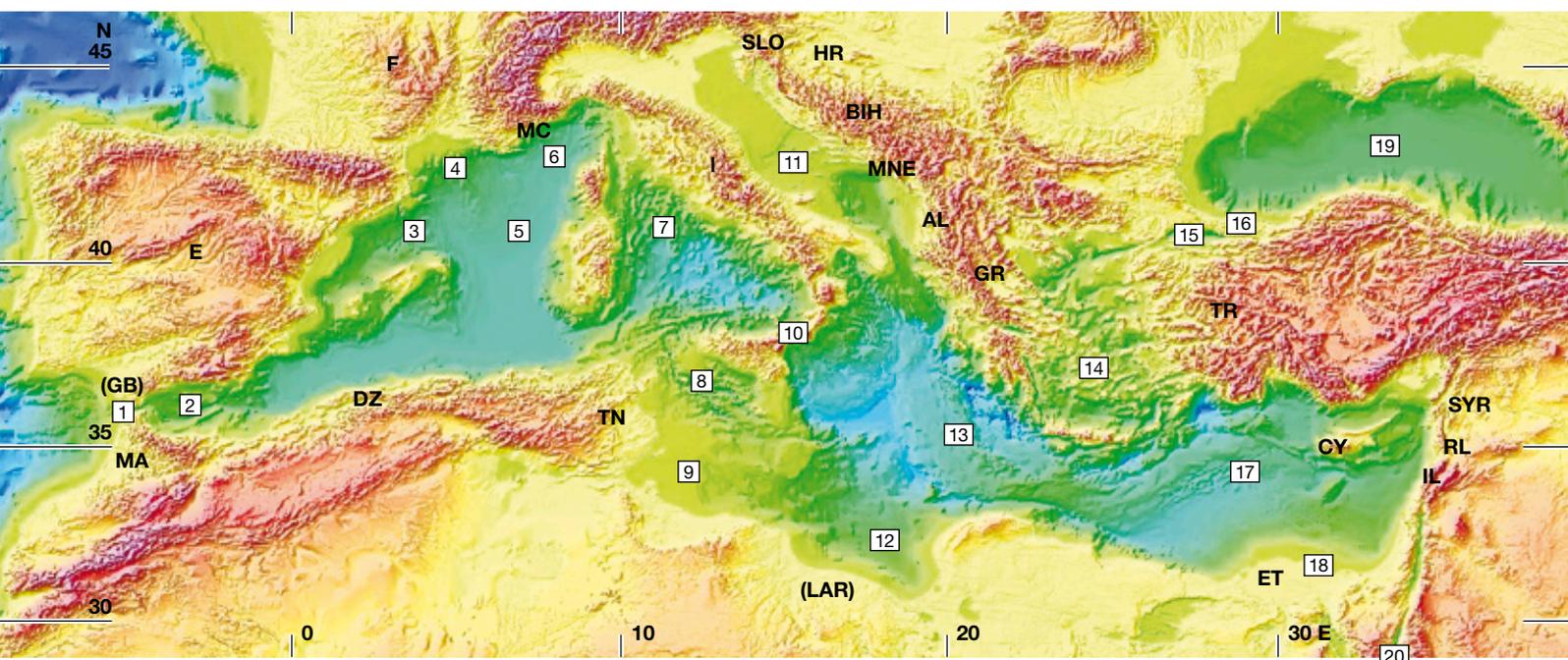
A. Les spécificités de la Méditerranée

A BRIEF OUTLINE OF THE GEOGRAPHY OF THE MEDITERRANEAN SEA: PHYSICAL, BIOLOGICAL AND ANTHROPOGENIC ASPECTS

The Mediterranean Sea is a bio-geographical crossroads between the Atlantic and Indo-Pacific Oceans. Its history and the diversity of its environmental conditions (biotopes, climates) explain its extremely high level of biodiversity (4 to 18% of known marine species, Bianchi & Morri, 2000; Boudouresque, 2004) and high endemism (almost 25 % of the species present). Geological events at the end of the Miocene epoch (Messinian crisis) and climate changes in the Pleistocene epoch (alternation of glacial and interglacial periods) played a decisive role in the settlement of the populations observed today.

UN BREF APERÇU DE LA GÉOGRAPHIE DE LA MER MÉDITERRANÉE : ASPECTS PHYSIQUES, BIOLOGIQUES ET ANTHROPIQUES

La Méditerranée apparaît comme un carrefour bio-géographique entre l'Atlantique et l'Indo-Pacifique. La diversité des conditions environnementales (biotopes, climats) et son histoire sont à l'origine d'une biodiversité extrêmement élevée (4 à 18 % des espèces marines connues, Bianchi & Morri, 2000 ; Boudouresque, 2004) et d'un fort endémisme (près de 25 % des espèces présentes). Les événements géologiques de la fin du Miocène (crises messiniennes) et les modifications climatiques du Pléistocène (alternance de périodes glaciaires et inter-glaciaires) ont joué un rôle déterminant dans la mise en place des peuplements observés aujourd'hui.

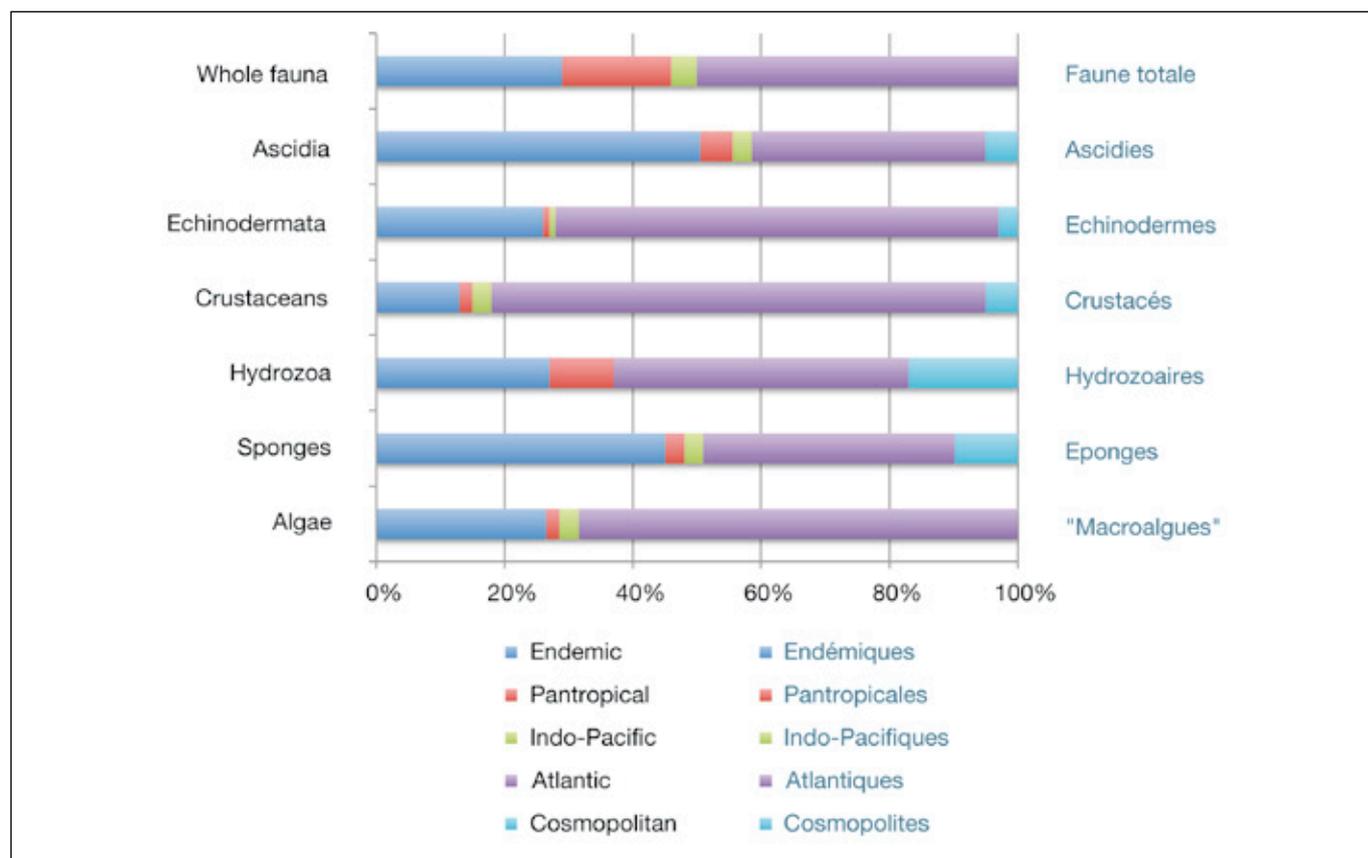


The Mediterranean Sea. La Méditerranée.

Based on *An Interactive Global Map of Sea Floor Topography Based on Satellite Altimetry & Ship Depth Soundings*. Meghan Miller, Walter H.F. Smith, John Kuhn, & David T. Sandwell. NOAA Laboratory for Satellite Altimetry. <http://ibis.grdl.noaa.gov>.

The chorology of species now encountered in the Mediterranean makes it possible to distinguish (i) endemic species, (ii) warm temperate species of Atlantic origin, (iii) northern species of Atlantic origin, (iv) subtropical species of Atlantic origin, (v) species of broad oceanic distribution and (vi) Indo-Pacific species (Bianchi & Morri, 2000). The wide variety of hydrological and climate conditions and the existence of communication and introduction channels (Gibraltar, Suez, human activities) for recent immigrants (Boudouresque, 2004) determine the distribution of these different species (cold affinity species in the northern basin and warm affinity species in the south).

La chorologie des espèces, présentes aujourd'hui en Méditerranée, permet de distinguer (i) les espèces endémiques, (ii) les espèces tempérées chaudes d'origine atlantique, (iii) les espèces boréales d'origine atlantique, (iv) les espèces subtropicales d'origine atlantique, (v) les espèces à large distribution océanique et (vi) les espèces indo-pacifiques (Bianchi & Morri, 2000). La grande variété des conditions hydrologiques et climatiques et l'existence de voies de communication et d'introduction (Gibraltar, Suez, les activités humaines) pour les émigrants récents (Boudouresque, 2004) conditionnent la répartition de ces différentes espèces (espèces à affinité froide dans le nord du bassin et espèces à affinité chaude dans le sud).



Origins of species dwelling in the Mediterranean Sea (from Boudouresque, 2004).
 Origine des espèces rencontrées en Méditerranée (d'après Boudouresque, 2004)

Biodiversity in the Mediterranean is weakened today by anthropogenic pressures, introduced species and climate change. These pressures are now proportionately greater than anywhere else in the global ocean (Lejeusne *et al.*, 2010); in addition to the intense nature of these pressures, it is the speed at which they are appearing which is of particular significance. Strong demographic pressures, urban and industrial waste, climate change and over-exploitation of living resources are leading to degradation of the habitats and modification of the ecosystems, thus placing the natural heritage of this sea at risk. The future of biodiversity in the Mediterranean is very closely linked to actions which will be undertaken by human societies over the next decades.

La biodiversité méditerranéenne est aujourd'hui fragilisée par les pressions anthropiques, les espèces introduites et les changements climatiques. Ces pressions sont aujourd'hui proportionnellement plus importantes que partout ailleurs dans l'océan mondial (Lejeusne *et al.*, 2010) ; outre l'intensité des pressions exercées, c'est la vitesse à laquelle elles se produisent qui revêt une importance particulière. La forte pression démographique, les rejets urbains et industriels, les modifications climatiques et la surexploitation des ressources vivantes conduisent à une dégradation des habitats, une modification des écosystèmes et hypothèquent l'héritage naturel de cette mer. Le devenir de la biodiversité en Méditerranée est fortement lié aux actions qui seront entreprises par les sociétés humaines dans les prochaines décennies.



Caulerpa taxifolia, an introduced "emblematic" species.
Caulerpa taxifolia, espèce introduite « emblématique ».



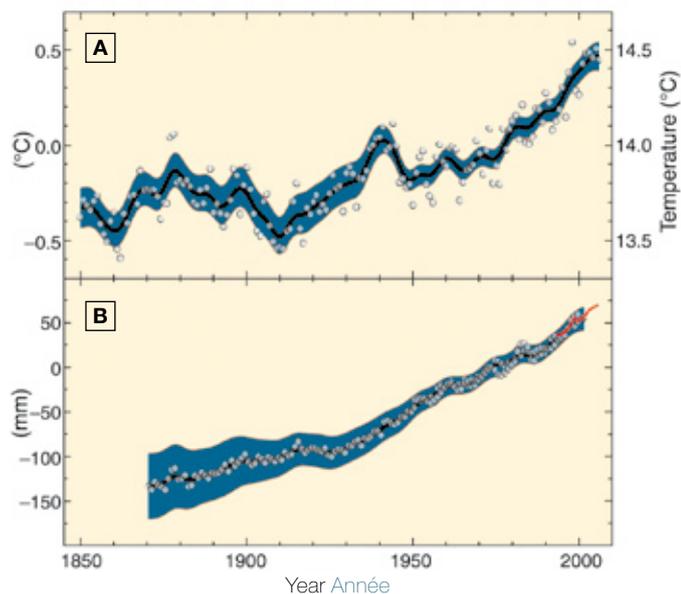
Urbanization along the shores of the Mediterranean Sea
 (Gulf of Palermo, Sicily).
 Urbanisation le long des rivages de la Méditerranée
 (golfe de Palerme, Sicile).

CLIMATE CHANGE IN THE MEDITERRANEAN BASIN

Climate change follows from a whole series of complex mechanisms of natural and anthropogenic origin, often interconnected, which are the subject of many research studies. Among these mechanisms, the rise in the concentration of greenhouse gas, highlighted in the 1970's, is often identified as the principal cause of the climate changes observed. Throughout the 20th century, air temperature has risen on average by 0.7°C (Li *et al.*, 2011).

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE BASSIN MÉDITERRANÉEN

L'évolution du climat obéit à toute une série de mécanismes complexes, d'origine naturelle et anthropique, souvent interconnectés, qui font l'objet de nombreuses recherches. Parmi ces mécanismes, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, mise en évidence dans les années 1970, est souvent identifiée comme la cause principale des changements climatiques observés. Au total, au cours du XX^{ème} siècle la température de l'air a augmenté en moyenne de 0.7°C (Li *et al.*, 2011).



Evolution of the average temperature and level of the sea since 1850
 (Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure SPM.1. IPCC, Geneva, Switzerland).

- A) Global average surface temperature.
- B) Global average sea level.

Évolution de la température moyenne et du niveau de la mer depuis 1850
 (Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure SPM.1. IPCC, Genève, Suisse).

- A) Température moyenne à la surface du globe.
- B) Niveau moyen de la mer à l'échelle du globe.

These mechanisms can be more clearly understood through the development of climate models which, despite their complexity and uncertainties, could contribute information on the future evolution of the climate. A Regional Climate Change Index (RCCI) was proposed by Giorgi (2006) to identify the most vulnerable regions. This index and several other climate models show that the Mediterranean region is a "hotspot" where a significant reduction in precipitation, rising temperatures and extreme weather events may well lead to aridification, especially in the southern part of the basin (Elguindi *et al.*, 2011).

La compréhension de ces mécanismes passe par l'élaboration de modèles climatiques qui, malgré leur complexité et leurs incertitudes, pourraient apporter des informations sur l'évolution future du climat. Un indice de changement climatique régional (RCCI) a été proposé par Giorgi (2006) pour identifier les régions les plus vulnérables. Cet indice et plusieurs autres modèles climatiques indiquent que la région méditerranéenne constitue un « hotspot » où une baisse importante des précipitations et une augmentation des températures et des événements extrêmes devraient conduire à une aridification notamment dans le sud du bassin (Elguindi *et al.*, 2011).



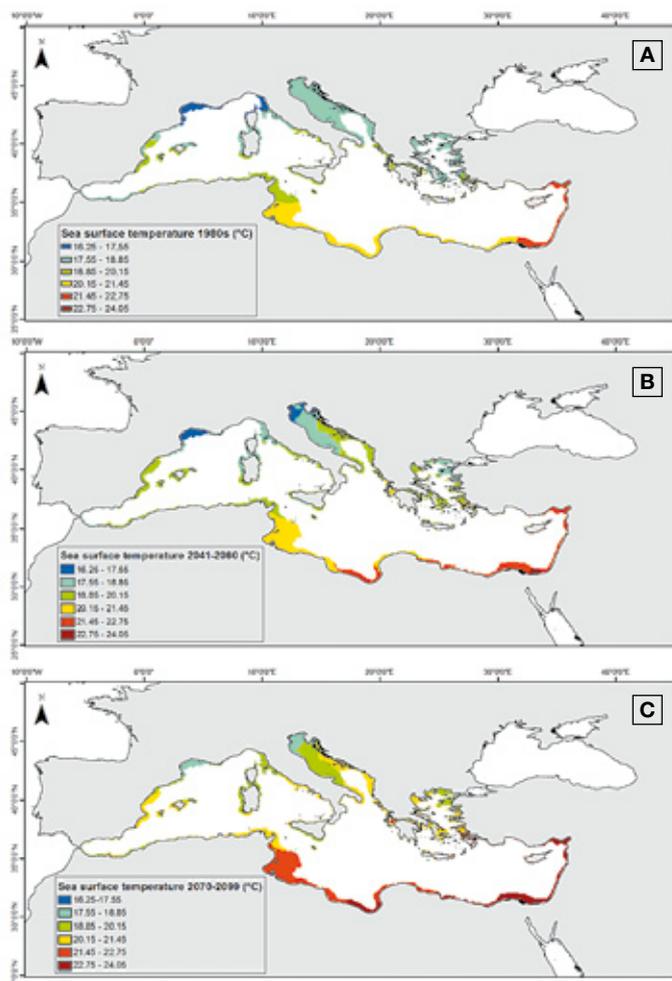
Desertification in the Maghreb.
Désertification dans le Maghreb.

Characterized by severe climate gradients (temperature, precipitation), the Mediterranean is also affected by both tropical and intertropical systems. Fluctuations observed in the North Atlantic Oscillation are therefore not without consequence on precipitation, winds and temperatures recorded in the Mediterranean. Generally, after significant cooling observed in the 1970's, the temperature of the entire water column has risen regularly (Rixen *et al.*, 2005). While continuation of this warming may lead to "meridionalization" or even "tropicalization" of the Mediterranean, depending on the sectors, the increasing frequency of extreme weather events (climate anomalies) is also a cause for concern (Lejeusne *et al.*, 2010). The rise in average temperatures leads to a higher rate of evaporation which has accelerated over the past few decades (Rixen *et al.*, 2005). Temperature and salinity measurements taken in the Strait of Gibraltar since the 1990's show higher levels (+0.3 °C and +0.06 PSU respectively) than 20 years ago (Millot *et al.*, 2006).

CO₂ dissolving in the oceans forms carbonic acid (H₂CO₃) and the resulting increase in H⁺ ions lowers the seawater's pH. Compared to the pre-industrial era, the pH of the surface water of the oceans has fallen on average by 0.1 pH unit, and this trend is likely to intensify over the coming decades. From 1870 to 2001, the evolution of pH in the Mediterranean shows that the entire water column presents acidification estimated between -0.14 and -0.05 (Touratier & Goyet, 2011); these values make the Mediterranean one of the world areas most affected by this phenomenon.

Caractérisée par de forts gradients climatiques (température, précipitations) la Méditerranée est également affectée à la fois par les systèmes tropicaux et intertropicaux. Ainsi les fluctuations enregistrées dans l'Oscillation Nord Atlantique ne sont pas sans conséquence sur les précipitations, les vents et les températures enregistrés en Méditerranée. De façon générale, après un refroidissement significatif qui a été observé dans les années 1970, la température de l'ensemble de la colonne d'eau a augmenté régulièrement (Rixen *et al.*, 2005). Si la poursuite de ce réchauffement global pourrait conduire à une « méridionalisation » ou même à une « tropicalisation » de la Méditerranée, selon les secteurs, l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes (anomalies climatiques) n'en est pas moins préoccupante (Lejeusne *et al.*, 2010). L'augmentation des températures moyennes se traduit par une évaporation plus forte qui s'est accélérée au cours des dernières décennies (Rixen *et al.*, 2005). Les mesures de température et de salinité réalisées au niveau du détroit de Gibraltar, depuis les années 1990, montrent des valeurs plus élevées (respectivement +0.3 °C et +0.06 PSU) qu'il y a vingt ans (Millot *et al.*, 2006).

Le CO₂ dissous dans les océans forme de l'acide carbonique (H₂CO₃) et l'augmentation des ions H⁺ qui en résulte diminue le pH de l'eau. Comparé à la période préindustrielle, le pH des eaux de surface des océans a diminué en moyenne de 0.1 unité et cette tendance devrait s'accroître dans les prochaines décennies. L'évolution du pH en Méditerranée, entre 1870 et 2001, montre que l'ensemble de la colonne d'eau présente une acidification évaluée entre -0.14 et -0.05 (Touratier & Goyet, 2011) ; ces valeurs font de la Méditerranée l'une des régions les plus touchées par ce phénomène.



Estimated evolution of the average temperature of surface water for the continental shelf in the Mediterranean.

- A) 1980's (source NOAA).
- B) From 2041 to 2060.
- C) From 2070 to 2099 (OPAMED8 model, after Coll *et al.*, 2010).

Prévision de l'évolution de la température moyenne des eaux de surface du plateau continental en Méditerranée.

- A) Années 1980' (source NOAA).
- B) Entre 2041 et 2060.
- C) Entre 2070 et 2099 (modèle OPAMED8, d'après Coll *et al.*, 2010).

MARINE MAGNOLIOPHYTA SPECIES

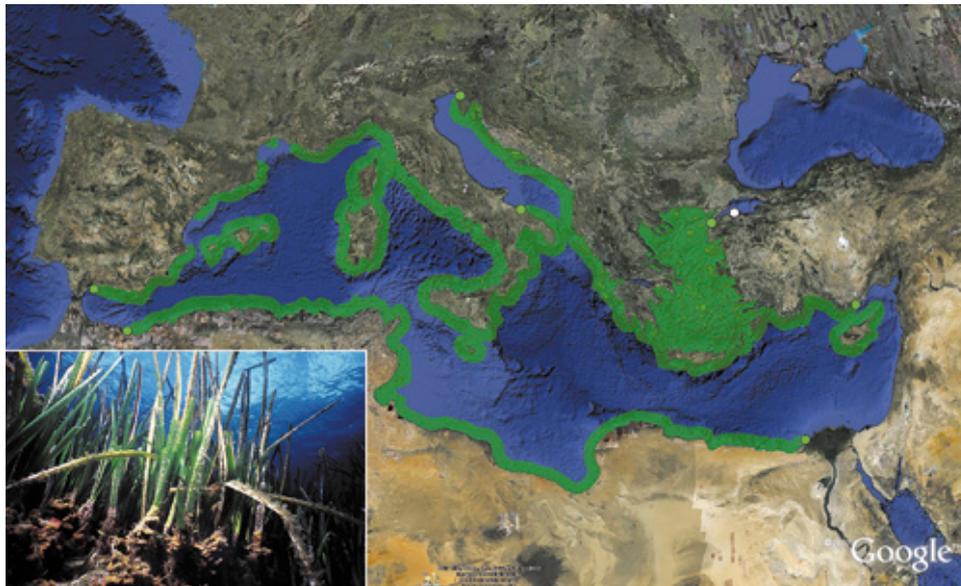
Of the five species of strictly marine Magnoliophyta found in the Mediterranean Sea, one is endemic (*Posidonia oceanica*), three are also found in the Atlantic Ocean (*Cymodocea nodosa*, *Zostera marina* and *Zostera noltii*) and one is a Lessepsian immigrant (*Halophila stipulacea*).

Posidonia oceanica forms vast meadows, between the sea-surface and a depth of 35 to 40 m, in the entire Mediterranean basin with the exception of the extreme south-east. The species plays an important role at ecological, sedimentary and economic levels; it is also a powerful integrator of the quality of the water and plays a major role in carbon fixation and storage – "carbon sinks" (Pergent *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 1997; Duarte *et al.*, 2005). Regression of the meadows is often related to the impact of human activities, but this species also seems to regress in sectors where anthropogenic pressures are very low (Boudouresque *et al.*, 2009). The absence of *Posidonia oceanica* in the extreme south-east of the basin seems to be directly related to excessive summertime water temperatures (Celebi *et al.*, 2006). Furthermore, diminished vitality of *Posidonia oceanica* has been documented in several regions of the western basin following sporadic weather events, responsible for an exceptional rise in water temperature (Marbà & Duarte, 2010).

LES ESPÈCES DE MAGNOLIOPHYTES MARINES

Parmi les cinq espèces de Magnoliophytes strictement marines présentes en Méditerranée, une est endémique (*Posidonia oceanica*), trois se retrouvent également dans l'océan Atlantique (*Cymodocea nodosa*, *Zostera marina* et *Zostera noltii*) et une est un immigrant lessepsien (*Halophila stipulacea*).

Posidonia oceanica constitue de vastes herbiers, entre la surface et 35 à 40 m de profondeur, dans tout le bassin méditerranéen à l'exception de l'extrême sud-est. Cette espèce joue un rôle important au niveau écologique, sédimentaire et économique ; elle constitue également un puissant intégrateur de la qualité des eaux et joue un rôle majeur dans la fixation et le stockage du carbone – « puits de carbone » (Pergent *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 1997; Duarte *et al.*, 2005). La régression des herbiers est souvent liée à l'impact des activités humaines mais cette espèce semble également régresser dans des secteurs où les pressions anthropiques sont très faibles (Boudouresque *et al.*, 2009). L'absence de *Posidonia oceanica* dans l'extrême sud-est du bassin semble en relation directe avec des températures estivales de l'eau trop élevées (Celebi *et al.*, 2006). D'autre part, une diminution de la vitalité de *Posidonia oceanica* a été enregistrée, dans plusieurs régions du bassin occidental, suite à des événements climatiques ponctuels responsables d'une augmentation exceptionnelle de la température de l'eau (Marbà & Duarte, 2010).



Distribution of *Posidonia oceanica* in the Mediterranean Sea; the green dots correspond to the limits of the species' range; the white dot to the "relict site" in the Sea of Marmara.

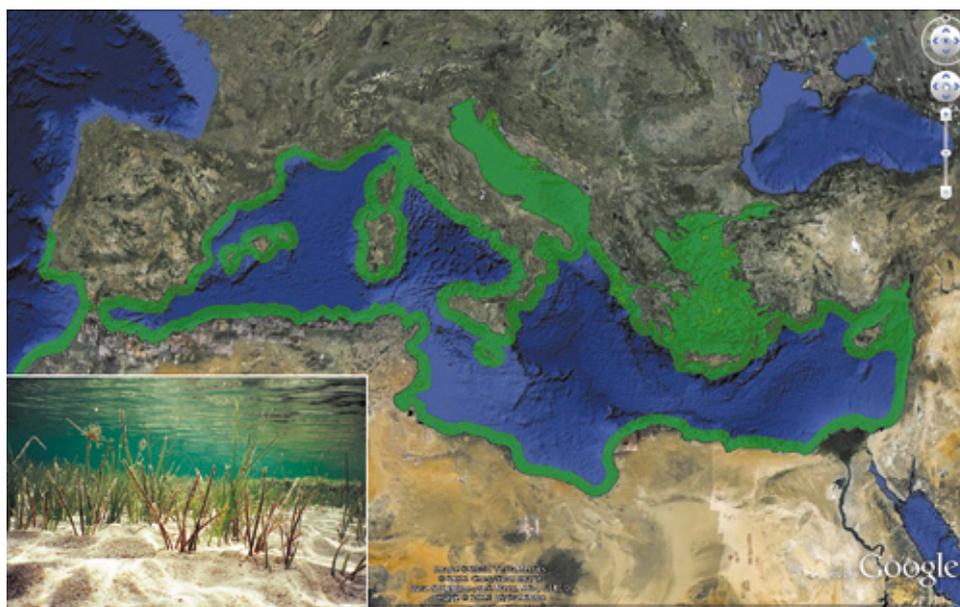
Répartition de *Posidonia oceanica* en Méditerranée ; les points verts correspondent aux limites d'extension de l'espèce ; le point blanc à la « station relique » de la mer de Marmara.

Cymodocea nodosa is found all over the Mediterranean basin, in the Sea of Marmara and in the Atlantic. It ranks second, after *Posidonia oceanica*, in terms of occupied surface areas in the Mediterranean; it is particularly evident in the eastern part of the Oriental Basin. While local regressions of *Cymodocea nodosa*

Cymodocea nodosa est présente dans tout le bassin méditerranéen, dans la mer de Marmara, et en Atlantique. Il s'agit de la seconde espèce, après *Posidonia oceanica*, en termes de surfaces occupées en Méditerranée ; elle est particulièrement présente dans l'est du bassin oriental. Si des régressions locales

have been recorded in sectors subjected to heavy pressure from human activities, this species seems to be more influenced by long-term natural fluctuations, such as variations in salinity, the action of herbivores and climate change. In general, this warm affinity species seems to benefit somewhat from the overall warming of the environment (Boudouresque *et al.*, 2009). In several sectors of the Mediterranean, *Cymodocea nodosa* has taken advantage of the regression of *Posidonia oceanica* to further its own development (Montefalcone *et al.*, 2007).

de *Cymodocea nodosa* ont été enregistrées dans des secteurs soumis à une forte pression des activités humaines, cette espèce semble plutôt influencée par des fluctuations naturelles à long terme comme les variations de salinité, l'action des herbivores ou les changements climatiques. De façon générale cette espèce, à affinité chaude, semble plutôt favorisée par le réchauffement global du milieu (Boudouresque *et al.*, 2009). Dans plusieurs secteurs de Méditerranée, *Cymodocea nodosa* a profité de la régression de *Posidonia oceanica* pour se développer (Montefalcone *et al.*, 2007).



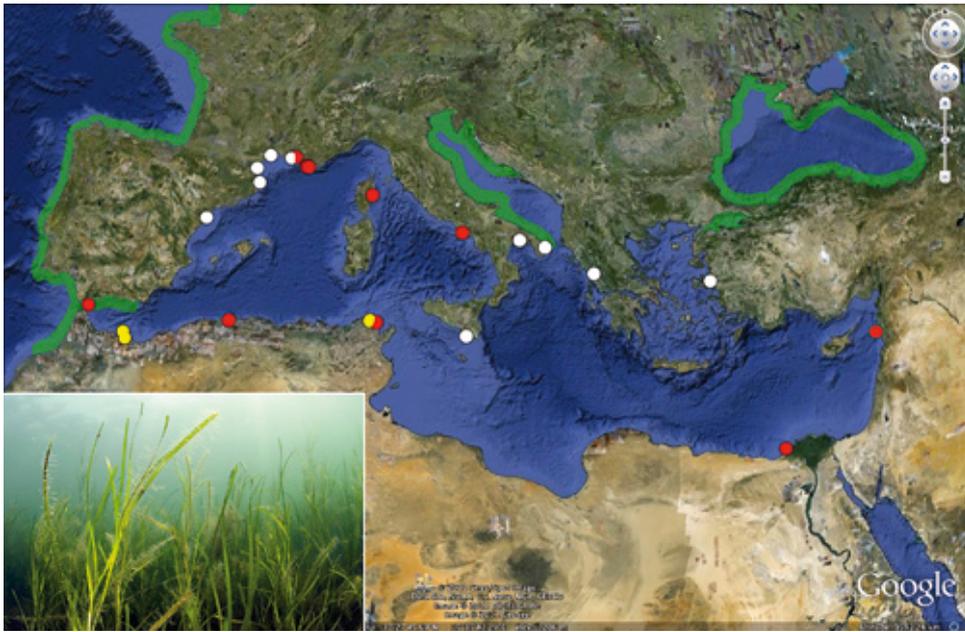
Distribution of *Cymodocea nodosa* in the Mediterranean.
Répartition de *Cymodocea nodosa* en Méditerranée.

Zostera marina is the most widely distributed species, from the Atlantic Ocean to the Pacific Ocean, and from temperate regions to the Arctic Circle (Green & Short, 2003).

Zostera marina forms very large meadows in sublittoral zones, generally between the sea surface and a depth of about 10 metres. In the Mediterranean, this species is above all present in a number of coastal lagoons and at the innermost part of very sheltered bays. While the main causes of its regression are of an anthropogenic nature (eutrophication, modifications of sedimentary environments, mechanical degradations and pollution), the amplitude of this phenomenon leads us to wonder about its more global dynamics on the scale of the Mediterranean basin. In fact, *Zostera marina* is one of the cold affinity species likely to regress, or even disappear from the Mediterranean if global warming intensifies. Today, this species seems to have disappeared from numerous sites where it was present several decades ago (Pergent-Martini, 2000) and, in localities where this species is still present, significant regressions have already been recorded (Boudouresque *et al.*, 2009).

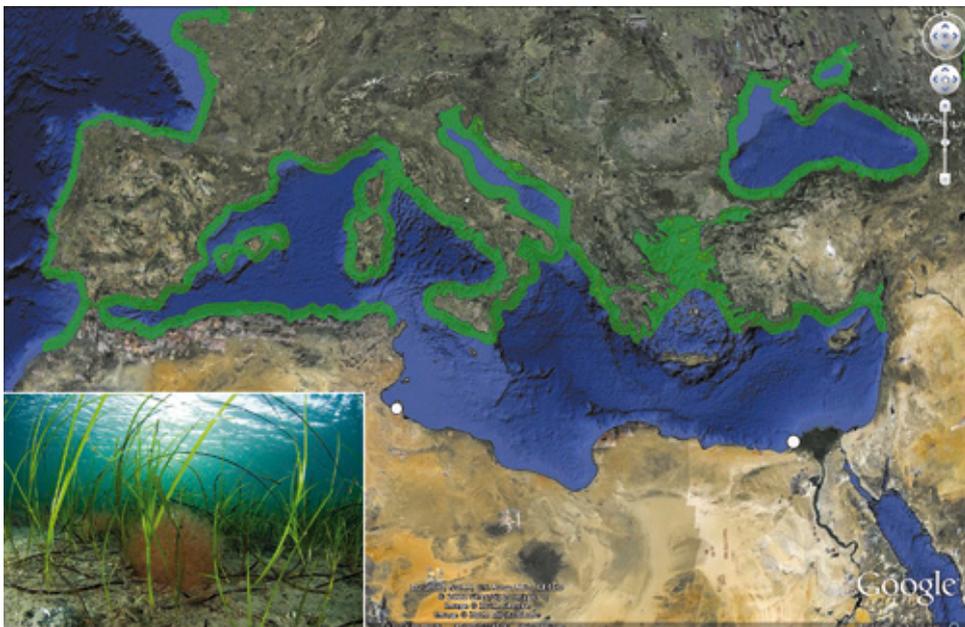
Zostera marina est l'espèce présentant la plus large répartition, de l'océan Atlantique à l'océan Pacifique, et des régions tempérées au cercle Arctique (Green & Short, 2003).

Zostera marina édifie de très grands herbiers dans l'infralittoral, généralement entre la surface et une dizaine de mètres de profondeur. En Méditerranée, cette espèce est surtout présente dans quelques lagunes littorales et des fonds de baies très abritées. Si les principales causes de sa régression sont de nature anthropique (eutrophisation, modifications des milieux sédimentaires, dégradations mécaniques et pollutions), l'ampleur de ce phénomène conduit à s'interroger sur sa dynamique plus globale à l'échelle du bassin méditerranéen. En effet, *Zostera marina* fait partie des espèces à affinité froide susceptibles de régresser, voire de disparaître de Méditerranée si le réchauffement global s'accroît. Aujourd'hui cette espèce semble avoir disparu dans de nombreuses stations où elle était présente il y a plusieurs décennies (Pergent-Martini, 2000) et, dans les stations où cette espèce est toujours présente, des regressions significatives sont enregistrées (Boudouresque *et al.*, 2009).



Distribution of *Zostera marina* in the Mediterranean Sea
 (In green: zones where the species is frequently found; red dots: localities where the species has disappeared; white dots: isolated localities; yellow dots: presence to be confirmed).

Répartition de *Zostera marina* en Méditerranée
 (En vert : zones où l'espèce est fréquente ; points rouges : stations où l'espèce a disparu ; points blancs : stations isolées ; points jaunes : présence à confirmer).

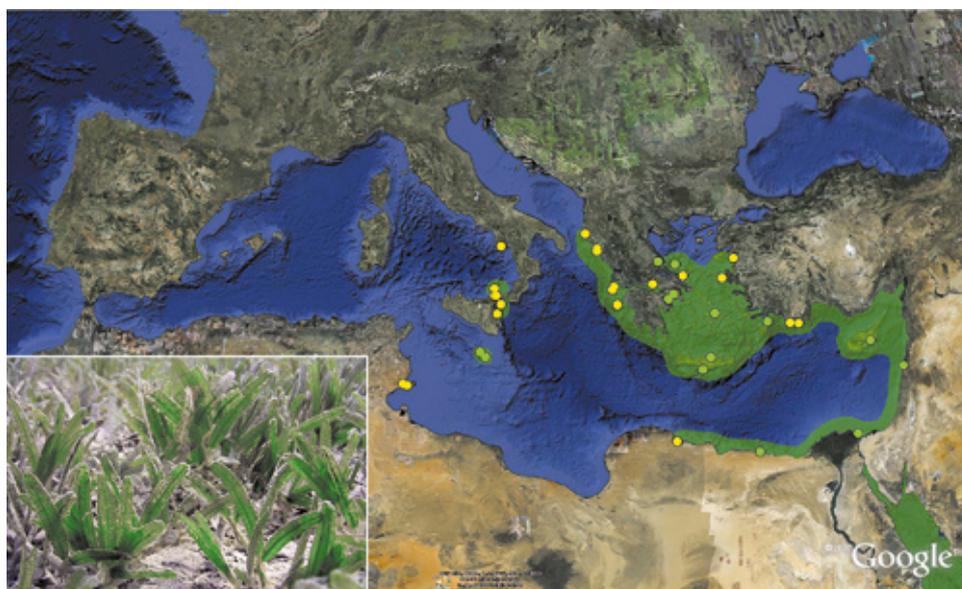


Distribution of *Zostera noltii* in the Mediterranean Sea
 (In green: zones where the species is frequently found; white dots: sporadic sightings).

Répartition de *Zostera noltii* en Méditerranée
 (En vert : zones où l'espèce est fréquente ; points blancs : signalisations ponctuelles).

Zostera noltii most often develops in the loose substrates of the intertidal zone where it can form very vast meadows which are subject to wide variations of light intensity and temperature. In the Mediterranean, it is confined to coastal lagoons, the innermost part of some sheltered bays and small harbours where it forms permanently submerged meadows. This species is often associated with *Zostera marina* or *Cymodocea nodosa*, with which it may form mixed meadows. In terms of dynamics, this species demonstrates high resilience, even though several examples of regression have been reported, related to modifications in salinity or nutrient enrichment (Ben Maiz & Shili 2007; Bernard *et al.* 2007). However, the few regressions recorded do not represent a general trend and *Zostera noltii* may benefit from the regression of other species of Magnoliophyta (Boudouresque *et al.*, 2009).

Zostera noltii se développe le plus souvent sur les substrats meubles de la zone intertidale où elle peut édifier de très vastes herbiers qui subissent de fortes variations d'intensité lumineuse et de température. En Méditerranée, elle se cantonne aux lagunes littorales, dans certains fonds de baies abritées et dans des petits ports où elle constitue des herbiers constamment immergés. Cette espèce est souvent associée à *Zostera marina* ou *Cymodocea nodosa* avec lesquelles elle peut constituer des herbiers mixtes. En termes de dynamique, cette espèce présente une résilience élevée même si plusieurs exemples de régressions sont rapportés en relation avec des modifications de la salinité ou un enrichissement en nutriments (Ben Maiz & Shili 2007 ; Bernard *et al.* 2007). Toutefois, les quelques régressions enregistrées ne correspondent pas à une tendance générale et *Zostera noltii* peut être favorisée par la régression d'autres espèces de Magnoliophytes (Boudouresque *et al.*, 2009).



Distribution of *Halophila stipulacea* in the Mediterranean Sea
(Green dots: sightings prior to 1990; yellow dots: sightings since 1990).

Répartition de *Halophila stipulacea* en Méditerranée
(Points verts : signalisations antérieures à 1990 ; Points jaunes : signalisations depuis 1990).

Halophila stipulacea can form meadows extending to depths of 35 to 40 m in the Mediterranean, though it is most often found in shallower habitats (-2 to -10 m), in zones of low hydrodynamism and within, or near, harbours. The initial distribution range of *Halophila stipulacea* was in the western part of the Indian Ocean, the Persian Gulf and Red Sea (Den Hartog, 1970). The opening of the Suez Canal enabled it to enter the Mediterranean where it was first reported in 1894 (Fritsch, 1895). Since then, *Halophila stipulacea* has continued to advance, usually following prevailing currents (Galil, 2006), and thus colonizing a large part of the eastern basin: this trend seems, however, to have accelerated over the past few years, with colonization of new sectors formerly considered as hardly compatible with the development of tropical affinity species.

Halophila stipulacea peut constituer des pelouses qui se développent jusqu'à 35 à 40 m de profondeur en Méditerranée, mais elle est le plus souvent rencontrée dans des habitats plus superficiels (-2 à -10 m), dans des zones à faible hydrodynamisme et dans ou à proximité des ports. L'aire de répartition initiale de *Halophila stipulacea* est située dans l'ouest de l'océan Indien, le golfe Persique et la mer Rouge (Den Hartog, 1970). L'ouverture du Canal de Suez lui a permis de pénétrer en Méditerranée où elle est signalée dès 1894 (Fritsch, 1895). Depuis, *Halophila stipulacea* ne cesse de progresser en suivant généralement les courants dominants (Galil, 2006), ce qui lui a permis de coloniser une grande partie du bassin oriental. Mais cette cinétique semble s'accélérer depuis quelques années avec la colonisation de nouveaux secteurs autrefois considérés comme peu compatibles avec le développement d'espèces à affinité tropicale.

B. The impact of climate change on Magnoliophyta in the Mediterranean

MAGNOLIOPHYTA MEADOWS: PRESSURES EXERTED AND RESILIENCE

The regression of seagrass meadows is a phenomenon which has been observed over several decades, though the amplitude of this regression varies depending on the species and geographical zones under consideration (Short & Wyllie-Echeverria, 2000). In any event, the estimates available should be considered with prudence, in view of the data obtained, still very fragmentary, on the worldwide distribution of marine Magnoliophyta.

The five marine species of Magnoliophyta present in the Mediterranean are subjected to natural and anthropogenic pressures of a kind likely to lead to significant regressions (Marbà *et al.*, 1996; Boudouresque *et al.*, 2009). Mediterranean coastal zones are sectors characterized by increasing urbanization, in which many activities are performed which are not without consequence on the quality of the water and the sustainability of natural populations.

The main regressions of marine Magnoliophyta meadows recorded in the Mediterranean are related to restructuring of the shores, management of living resources (fisheries and aquaculture), solid and liquid waste, the development of pleasure boating and tourism (cruises) and the introduction of exotic species. More recently, the rising temperature of the water and the rise in the sea level could explain certain regressions (Marbà & Duarte, 2010). These regressions primarily concern the emblematic species *Posidonia oceanica*, though other species are also affected by anthropogenic impacts (Boudouresque *et al.*, 2009). Within the Mediterranean basin, the decline of seagrass meadows seems to be relatively limited (between 0 and 10 % throughout the 20th century; Boudouresque *et al.*, 2009). However, in sectors subject to strong anthropogenic pressures, declines can be much more significant (5 to 8 % per year; Marbà *et al.*, 1996).

B. L'impact des changements climatiques sur les Magnoliophytes en Méditerranée

LES HERBIERS DE MAGNOLIOPHYTES : PRESSIONS EXERCÉES ET RÉSILIENCE

La régression des herbiers à Magnoliophytes marines est un phénomène constaté depuis plusieurs décennies, même si l'ampleur de cette régression varie en fonction des espèces et des zones géographiques considérées (Short & Wyllie-Echeverria, 2000). Toutefois, les estimations disponibles doivent être considérées avec prudence au regard des connaissances, encore très fragmentaires, sur la répartition des Magnoliophytes marines dans le monde.

Les cinq espèces marines de Magnoliophytes présentes en Méditerranée subissent des pressions naturelles et anthropiques de nature à entraîner des régressions significatives (Marbà *et al.*, 1996 ; Boudouresque *et al.*, 2009). Les zones littorales méditerranéennes apparaissent comme des secteurs caractérisés par une urbanisation croissante où s'exercent de nombreuses activités qui ne sont pas sans conséquence sur la qualité des eaux et le maintien des populations naturelles.

Les principales régressions d'herbiers à Magnoliophytes marines enregistrées en Méditerranée sont liées à la restructuration des rivages, à la gestion des ressources vivantes (pêche et aquaculture), aux rejets solides et liquides, au développement de la plaisance et du tourisme (croisières) et à l'introduction d'espèces exotiques. Plus récemment, l'élévation de la température des eaux et la montée du niveau de la mer pourraient expliquer certaines régressions (Marbà & Duarte, 2010). Si ces régressions concernent surtout l'espèce emblématique *Posidonia oceanica*, les autres espèces sont également touchées par ces impacts anthropiques (Boudouresque *et al.*, 2009). A l'échelle du bassin méditerranéen, la régression des herbiers de Magnoliophytes marines apparaît relativement limitée (entre 0 et 10 % au cours du XX^{ème} siècle ; Boudouresque *et al.*, 2009) même si, dans les secteurs soumis à de fortes pressions anthropiques, les régressions peuvent être beaucoup plus importantes (5 à 8 % par an ; Marbà *et al.*, 1996).

AN "ILLUSTRATED" CONCEPT OF RESILIENCE

Resilience in ecosystems is determined on different scales. Specific, genetic, functional, response diversity, as well as functional redundancy, ensure resilience and sometimes also resistance of the ecosystems (e.g. Peterson *et al.*, 1998; Hughes & Stachowicz, 2004). Let us imagine the rivets used to assemble an aeroplane. The existence of thousands of them (redundancy) makes the loss of a few irrelevant. Let us now imagine a whole batch of defective rivets (due to a disease, the impact of a species-specific disturbance). In this case, the integrity of the plane would be compromised. If, on the other hand, the plane had been built with different types of rivets (different manufacturers, i.e., species with not identical but similar or over-lapping functions within the ecosystem), the function of 'keeping the parts of the plane together' would have been preserved, preventing the plane from falling apart. The construction method used, i.e., the "airplane" system, would have been resilient. The greater the diversity of the rivets, the greater the robustness of the plane.

The work by Hughes & Stachowicz (2004) on *Zostera marina* provides a useful example to illustrate the ideas above. In their experiments, they observed that beds of *Z. marina* with the highest genotypic diversity were more resistant to grazing by geese (more shoots remaining after the grazing disturbance). The time required to recover near pre-disturbance shoot densities was also shorter in beds with the highest diversity. In this example, the results suggest that genetic seagrass diversity accelerates recolonization by enhancing the ecosystem's resistance rather than its resilience.

Given increasing pressure from human activities, the capacity of ecosystems for recovery could become increasingly lower due to erosion of their resilience. While this is the most plausible scenario, the concept of stochasticity, or ecosystem resilience, has been proposed (Walker *et al.*, 2004). This new concept represents an exercise in realism, aiming to accommodate the idea that ecosystems change within and between various stable states.

Zostera marina seagrass in the Thau Lagoon (France).



LE CONCEPT DE RÉSILIENCE "ILLUSTRÉ"

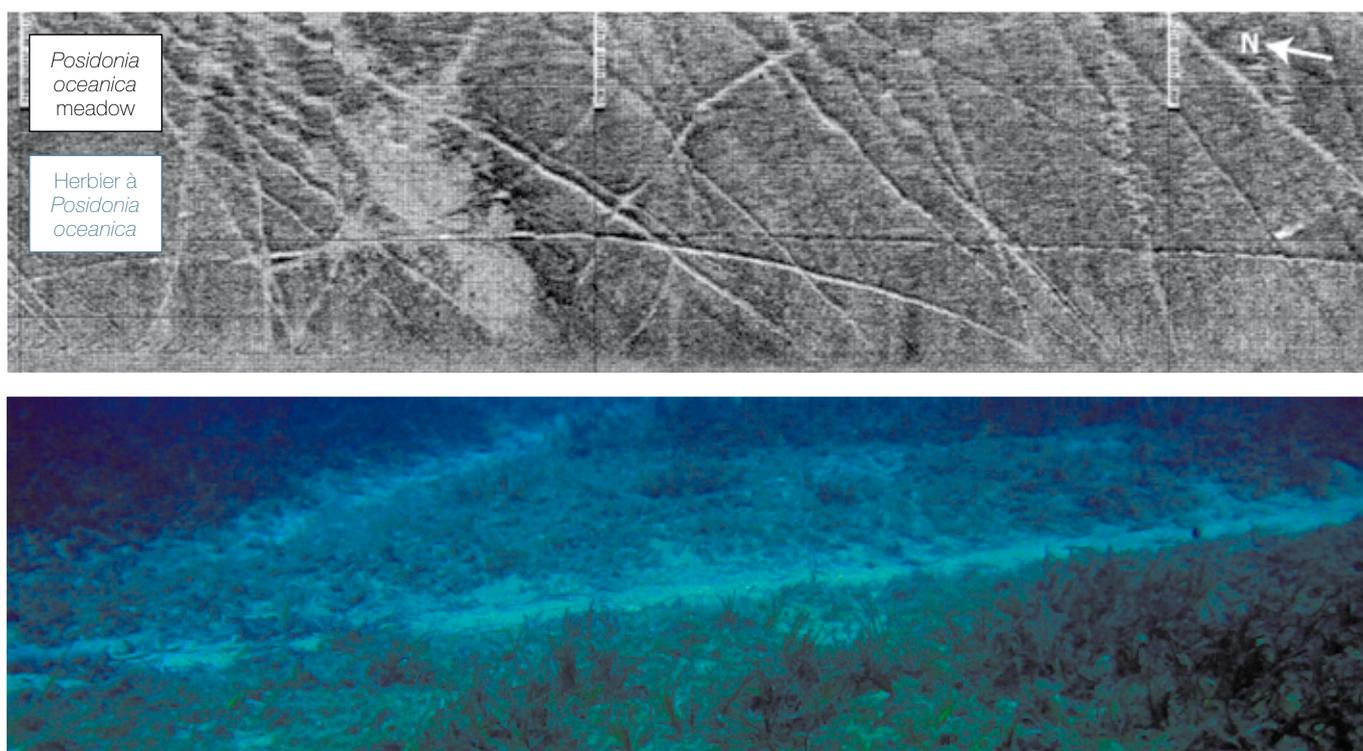
La résilience des écosystèmes est déterminée à différentes échelles. Spécifique, génétique, fonctionnelle et la diversité des réponses, comme la redondance fonctionnelle, assurent la résilience et parfois aussi la résistance (e.g. Peterson *et al.*, 1998 ; Hughes & Stachowicz, 2004). Imaginons les rivets utilisés pour l'assemblage d'un avion. L'existence de milliers d'entre eux (la redondance) rend sans effet la perte de quelques-uns. Imaginons maintenant qu'un lot entier de rivets soit défectueux (une maladie, l'impact d'une perturbation sur une espèce). Dans ce cas, l'intégrité de l'avion pourrait être compromise. Par contre, si l'avion a été construit avec différents types de rivets (des fabricants différents, c'est-à-dire, des espèces avec des fonctions non identiques mais similaires ou se chevauchant au sein de l'écosystème), la fonction « gardent les parties de l'avion ensemble » serait conservée, empêchant l'avion de tomber en morceaux. La méthode de construction utilisée, c'est-à-dire, le système « avion », serait résilient. La plus grande diversité des rivets assure la plus grande robustesse de l'avion.

Le travail de Hughes & Stachowicz (2004) avec *Zostera marina* fournit un exemple permettant d'illustrer les idées énoncées ci-dessus. Au cours de leurs expériences, ils ont observé que les parcelles de *Zostera marina* présentant la diversité génétique la plus élevée étaient plus résistantes au pâturage par des oies (densité des faisceaux plus élevée après le pâturage). Le temps nécessaire pour retrouver une densité proche de l'état initial était également plus court dans les parcelles présentant la plus grande diversité. Dans cet exemple, les résultats suggèrent que la

diversité génétique des Magnoliophytes marines accélérerait la recolonisation à travers l'amélioration de la résistance de l'écosystème plutôt que sa résilience.

Compte tenu de l'augmentation des pressions humaines, la capacité de rétablissement des écosystèmes pourrait être de plus en plus réduite du fait de l'érosion de la résilience des écosystèmes. Cela étant, le scénario le plus plausible, le concept de stochasticité ou de résilience de l'écosystème, a été proposé (Walker *et al.*, 2004). Ce nouveau concept apparaît comme un exercice de réalisme, visant à accepter l'idée que les écosystèmes changent au sein et entre des états stables.

Herbier à *Zostera marina* dans l'étang de Thau (France).



Traces of trawling detected along Cap Corse with the help of a side-scan sonar (top) and validated by divers (bottom).
 Traces de chaluts mises en évidence le long du cap Corse à l'aide d'un sonar à balayage latéral (en haut) et validées en plongée (en bas).

Depending on the characteristics specific to the various species of Magnoliophyta found in the Mediterranean (physiological, biological and ecological), their resilience, adjustment stability and capacity to adapt may differ.

En fonction des caractéristiques propres aux différentes espèces de Magnoliophytes présentes en Méditerranée (physiologie, biologie et écologie), leur résilience, leur stabilité d'ajustement et leur capacité d'adaptation peuvent être différentes.

Generally speaking, the resilience of *Posidonia oceanica* and the meadows it creates seems to be relatively high. This explains how the species has succeeded in colonizing a large part of the sublittoral zone, in the largest part of the Mediterranean. It also explains why it has resisted quite well several thousand years of human impacts, climatic episodes and the uninterrupted rise of the sea level. If one considers separately the disturbances likely to affect *Posidonia oceanica*, the resilience of seagrass meadows proves to be quite contrasted. It is relatively strong for temperature, most contaminants, the anchoring of small units (< 15 m) and invasive species, but seems weaker in the case of salinity, turbidity, rate of sedimentation, anchoring of large units and trawling. The frequency of disturbances also plays an important role; thus, the consequences of mechanical impacts (trawling, anchoring) often depend on their repetitive character (Boudouresque *et al.*, 2006). In the case of minor impacts, the seagrass is capable of regenerating itself by means of regular production of new shoots through branching of the rhizome and vegetative propagation (cuttings). Many studies emphasize the ability of *Posidonia oceanica* to recolonize the substrate once the disturbance which caused its decline has disappeared (Pergent-Martini *et al.*, 2002). However, it grows very slowly (maximum 7 cm per year in Caye, 1982) and the time it takes to return to its previous

D'une façon générale, la résilience de *Posidonia oceanica* et des herbiers qu'elle édifie apparaît comme relativement élevée. Cela explique que l'espèce ait réussi à coloniser une grande partie de l'étage infralittoral, dans la plus grande partie de la Méditerranée. Cela explique aussi qu'elle ait assez bien résisté à plusieurs millénaires d'impacts humains, à des épisodes climatiques et à la montée ininterrompue du niveau de la mer. Si l'on considère séparément les perturbations susceptibles d'affecter *Posidonia oceanica*, la résilience des herbiers est toutefois contrastée. Elle est relativement importante pour la température, la plupart des contaminants, les ancrages de petites unités (< 15 m) et les espèces invasives mais elle semble plus faible pour la salinité, la turbidité, le taux de sédimentation, l'ancrage de grosses unités et l'action des arts trainants. La fréquence des perturbations joue également un rôle important ; ainsi, les conséquences des impacts mécaniques (arts trainants, mouillages) dépendent souvent de leur caractère répétitif (Boudouresque *et al.*, 2006). Pour de faibles impacts, l'herbier est en capacité de se régénérer, par la production régulière de nouveaux faisceaux de feuilles par ramification du rhizome et par multiplication végétative (bouturage). De nombreuses études soulignent la capacité de recolonisation du substrat par *Posidonia oceanica* après l'arrêt de la perturbation à l'origine de sa régression (Pergent-Martini *et al.*, 2002). Toutefois, sa vitesse de croissance

MAGNOLIOPHYTA MONITORING NETWORKS

The setting up of monitoring systems for Magnoliophyta seagrass meadows has been seen as a priority for several decades. There are two major monitoring systems: the seagrass monitoring network (SeagrassNet), set up at global level in the early 2000's, covering all species of seagrass (Short *et al.*, 2002), and the Posidonia Monitoring Network (RSP in French), launched in the Mediterranean in the early 1980's (Boudouresque *et al.*, 2006), which is specific to *Posidonia oceanica*, though it could be adapted to other Mediterranean species.

The RSP is now used, with certain variations from one country to another, in at least nine Mediterranean countries and over 350 sites; it benefits from an up-dated and standardized procedure (PNUE-PAM-CAR/ASP, 2009).

Measurements are taken (i) at the level of fixed markers, placed along the meadow's lower limit, (ii) at the level of a portion of the upper limit and (iii) at a fixed intermediate depth of -15 m. Descriptors provide information on the healthiness of the seagrass, but also on the quality of the environment in which it develops (the species then being used as a bio-indicator).

SeagrassNet disposes of global coverage with over 115 sites shared out in 32 countries, including two in the Mediterranean (www.seagrassnet.org). Monitoring is performed along three permanent transects, parallel to the coast, positioned respectively (i) in the part of the seagrass meadow closest to the surface, (ii) in its deepest part and (iii) at an intermediate depth between these two levels. The selected descriptors are measured at fixed and precise points along each transect.



LES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DES MAGNOLIOPHYTES

La mise en place de systèmes de surveillance des herbiers de Magnoliophytes marines apparaît comme une priorité depuis quelques décennies. Il existe deux grands types de systèmes de surveillance : le système de surveillance des Magnoliophytes marines (*SeagrassNet*), établi au niveau mondial, au début des années 2000 et qui concerne l'ensemble des espèces de Magnoliophytes marines (Short *et al.*, 2002) et le réseau de surveillance « Posidonies » (RSP), initié en Méditerranée au début des années 1980 (Boudouresque *et al.*, 2006), qui est spécifique à l'espèce *Posidonia oceanica* même s'il pourrait être adapté aux autres espèces de Méditerranée.

Le RSP est aujourd'hui utilisé, avec une certaine variabilité d'un pays à l'autre, dans au moins neuf pays méditerranéens et plus de 350 sites et bénéficie d'une approche actualisée et standardisée (PNUE-PAM-CAR/ASP, 2009).

Les mesures sont réalisées (i) au niveau de repères fixes, placés le long de la limite inférieure de l'herbier, (ii) au niveau d'une portion de la limite supérieure et (iii) à une profondeur intermédiaire fixe de -15 m. Les descripteurs renseignent sur l'état de santé de l'herbier mais également sur la qualité du milieu dans lequel il se développe (l'espèce étant alors utilisée en tant que bioindicateur global).

Le *SeagrassNet* dispose d'une couverture mondiale avec plus de 115 sites, répartis dans 32 pays, dont deux en Méditerranée (www.seagrassnet.org). La surveillance est effectuée le long de trois transects permanents, parallèles à la côte, positionnés respectivement (i) dans la partie la plus superficielle de l'herbier, (ii) dans la partie la plus profonde et (iii) à une profondeur intermédiaire entre ces deux positions. Les descripteurs choisis sont mesurés sur des points précis et fixes le long de chacun des transects.

state is often very long. Its capacity for recolonization and the speed of its recolonization of the substrate also depend on the nature of the initial disturbance, as the disappearance of the disturbance does not automatically induce the start of recolonization.

Following a significant decline, *Cymodocea nodosa* is capable of rapidly recover due e.g. to the large seed-bank within the sediment (Terrados, 1993), and to the dispersion of cuttings. Numerous examples testify to rapid rates of recolonization (Ben Maïz & Shili, 2007). Confronted by stress, this species is also capable of significantly increasing the proportion of its energy

est très faible (maximum 7 cm par an *in Caye*, 1982) et le retour à l'état antérieur est souvent très long. La capacité de recolonisation et la vitesse de recolonisation du substrat par l'herbier dépendent également de la nature de la perturbation initiale car l'arrêt d'une perturbation n'induit pas automatiquement le début d'une recolonisation.

Après une régression importante, *Cymodocea nodosa* présente la capacité de reconstituer rapidement ses populations, du fait notamment de l'importante réserve de graines disponible dans le sédiment (Terrados, 1993) mais également par la dispersion de

budget dedicated to reproduction. Observation, at shallow sites, of patches of *Cymodocea nodosa* with reddish leaves seems to be a relatively recent phenomenon (Pergent *et al.*, 2006). This particular pigmentation, also recently documented for other seagrasses such as *Cymodocea serrulata*, could be linked to high production of anthocyanin in response to increased exposure to light and/or a rise in water temperature (Novak & Short, 2010).

While the resilience of *Zostera noltii* is low, its adjustment stability is high. It is, for example, particularly sensitive to fluctuations in salinity and turbidity; the meadows it forms can disappear then recover on the basis of these parameters (Charpentier *et al.*, 2005; Ben Maïz & Shili, 2007). Likewise, important regressions recorded in meadows of *Zostera marina* subjected to dystrophic crises (Venice lagoon and Thau Lagoon) are often of short duration thanks to the seed bank present in the sediment (Plus *et al.*, 2003). Recovery by *Zostera* spp. seagrass is not, however, a general feature, even following diminishment of the factors responsible for their decline.

The ecological characteristics of seagrasses in the Mediterranean enable them to cover a wide spectrum of abiotic conditions, and their sensitivity to anthropogenic pressures is also very different (Boudouresque *et al.*, 2009). While *Posidonia oceanica* constitutes the "climax" species for a large part of Mediterranean shorelines, *Cymodocea nodosa* and, to a lesser extent, *Zostera noltii*, can constitute pioneer species in the succession, allowing for the settlement of *Posidonia oceanica* meadows (Boudouresque *et al.*, 2006). Furthermore, when environmental conditions become unfavorable for one species, it may be replaced by another. However, while *Posidonia oceanica* can be replaced by native species, it can also be replaced by opportunistic "introduced" species (Montefalcone *et al.*, 2010). Furthermore, these substitutions by species with weaker structuring capacities may trigger profound changes within the communities.

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON COMMUNITIES ASSOCIATED WITH MARINE MAGNOLIOPHYTA MEADOWS

The five species of marine Magnoliophyta provide the communities they host with different types of habitats, depending on their own morphology. Three levels of structural complexity can thus be distinguished among the seagrass meadows. The lowest complexity is found in *Halophila stipulacea* meadows; *Cymodocea nodosa* and *Zostera* spp. meadows give slightly higher structural complexity, while *Posidonia oceanica* meadows show the highest structural complexity and a wide diversity of habitats.

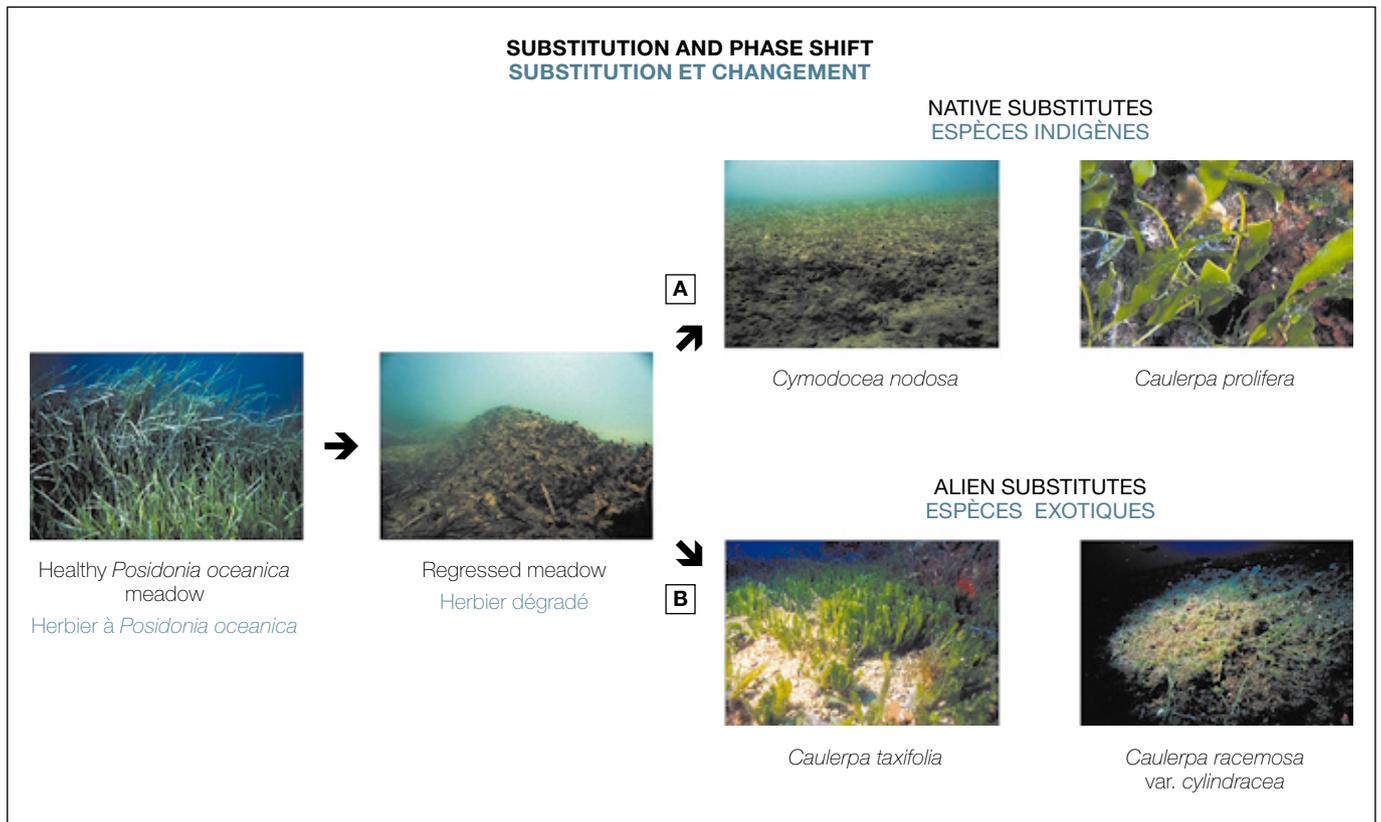
boutures. De nombreux exemples témoignent de vitesses de recolonisation élevées (Ben Maïz & Shili, 2007). Confrontée à un stress, cette espèce est également capable d'augmenter significativement la part de son budget énergétique consacrée à la reproduction. L'observation, à faible profondeur, de faisceaux de *Cymodocea nodosa* portant des feuilles de couleur rougeâtre semble un phénomène relativement récent (Pergent *et al.*, 2006). Cette pigmentation particulière, également mise en évidence récemment chez d'autres Magnoliophytes marines comme *Cymodocea serrulata*, pourrait être liée à une forte production d'anthocyanine en réponse à une exposition plus importante à la lumière et/ou à une augmentation de la température de l'eau (Novak & Short, 2010).

La résilience de *Zostera noltii* est faible, mais sa stabilité d'ajustement est élevée. Elle est par exemple particulièrement sensible aux fluctuations de salinité et de turbidité, les herbiers qu'elle constitue pouvant disparaître puis se reconstituer en fonction de ces paramètres (Charpentier *et al.*, 2005 ; Ben Maïz & Shili, 2007). De même, les régressions importantes enregistrées dans des herbiers à *Zostera marina* soumis à des crises dystrophiques (lagune de Venise ou étang de Thau) sont souvent de courte durée grâce à la banque de graines présente dans le sédiment (Plus *et al.*, 2003). Toutefois, la recolonisation du milieu, par les herbiers de *Zostera* spp. n'est pas systématique, même après une réduction des facteurs responsables de leur régression.

Les caractéristiques écologiques des Magnoliophytes marines présentes en Méditerranée leur permettent de couvrir un large spectre de conditions abiotiques et leur sensibilité aux pressions anthropiques est également très différente (Boudouresque *et al.*, 2009). Si *Posidonia oceanica* constitue l'espèce « climacique » pour une grande partie des littoraux méditerranéens, *Cymodocea nodosa*, et dans une moindre mesure *Zostera noltii*, peuvent constituer des espèces pionnières de la succession permettant l'installation de l'herbier à *Posidonia oceanica* (Boudouresque *et al.*, 2006). Aussi, lorsque les conditions de milieu deviennent défavorables pour une espèce, elle peut être remplacée par une autre. Toutefois, si des herbiers à *Posidonia oceanica* peuvent être remplacés par des espèces « indigènes », ils peuvent également l'être par des espèces « introduites » plus opportunistes (Montefalcone *et al.*, 2010). D'autre part, ces substitutions par des espèces présentant des capacités structurantes plus faibles peuvent initier des changements profonds dans les communautés.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES COMMUNAUTÉS ASSOCIÉES AUX HERBIERS DE MAGNOLIOPHYTES MARINES

Les cinq espèces de Magnoliophytes marines procurent à la communauté qui leur est associée différents types d'habitats en fonction de leur propre morphologie. Trois niveaux de complexité structurale peuvent ainsi être distingués parmi les herbiers. La complexité la plus faible s'observe pour les herbiers à *Halophila stipulacea* ; les herbiers à *Cymodocea nodosa* et à *Zostera* spp. déterminent une complexité structurale un peu plus élevée, alors que les herbiers à *Posidonia oceanica* présentent une complexité structurale maximale et une grande diversité d'habitats.



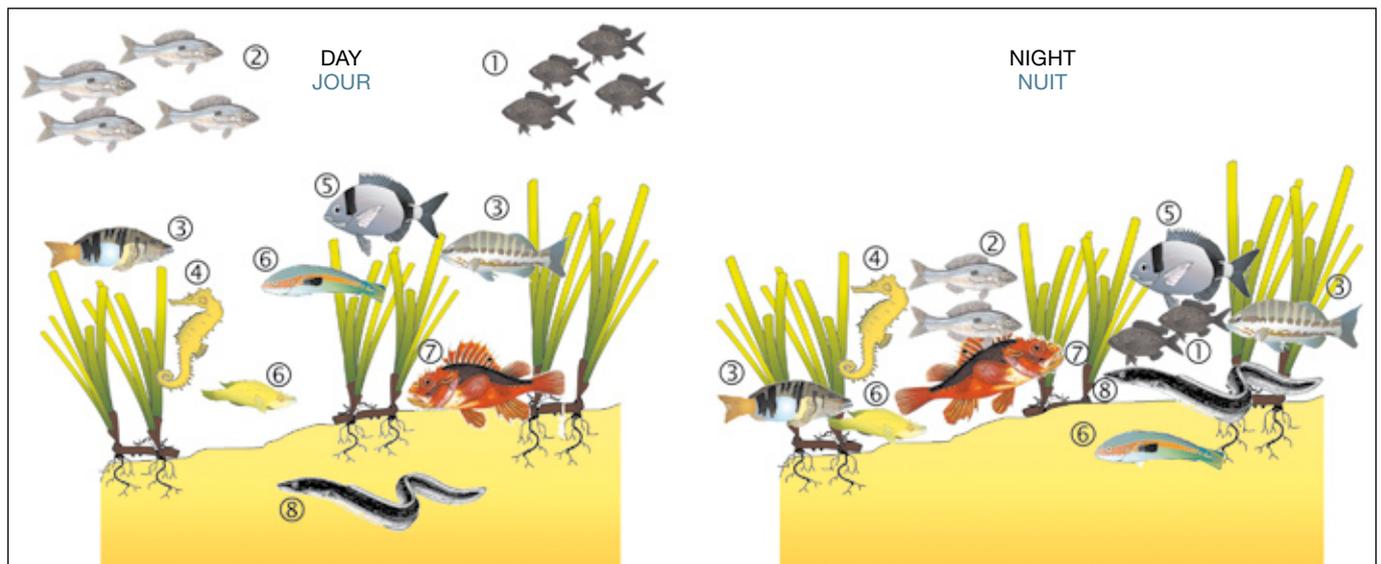
Evolution of the environment following regression of *Posidonia oceanica* meadows in the Ligurian Sea.
 A) Substitution by native species; B) Substitution by introduced species (from Montefalcone *et al.*, 2010).
 Évolution du milieu après une régression des herbiers à *Posidonia oceanica* en mer Ligure.
 A) Substitution par des espèces natives ; B) Substitution par des espèces introduites (d'après Montefalcone *et al.*, 2010).

Several thousand species are dwelling in seagrass meadows in the Mediterranean Sea (Boudouresque *et al.*, 2006). They use the seagrass meadows for substratum, shelter, nourishment, reproduction and/or development, colonizing all the available habitats: above the leaf canopy upon the leaves, beneath the leaf canopy, on the rhizomes or within the mat.

Plusieurs milliers d'espèces vivent dans les herbiers de Magnoliophytes marines en Méditerranée (Boudouresque *et al.*, 2006). Elles utilisent les herbiers pour se fixer, s'abriter, se nourrir, se reproduire et/ou y grandir, en colonisant les différents habitats disponibles : au dessus des feuilles, sur les feuilles, sous le couvert des feuilles, sur les rhizomes et au sein de la mat.



Rising structural complexity of Magnoliophyta meadows in the Mediterranean, from a *Halophila stipulacea* meadow (A), to a *Cymodocea nodosa* meadow (B) and lastly a *Posidonia oceanica* meadow (C).
 Augmentation de la complexité structurale des herbiers à Magnoliophytes en Méditerranée de la pelouse à *Halophila stipulacea* (A), à l'herbier à *Cymodocea nodosa* (B) et enfin à l'herbier à *Posidonia oceanica* (C).



Vertical distribution of ichthyofauna (teleosts) in *Posidonia oceanica* meadows by day (A) and by night (B) (from Harmelin-Vivien, 1982 simplified).

Distribution verticale de l'ichtyofaune (téléostéens) dans les herbiers à *Posidonia oceanica* le jour (A) et la nuit (B) (d'après Harmelin-Vivien, 1982 simplifié).

- 1 – Pomacentridae (*Chromis chromis*),
- 2 – Centracanthidae (*Spicara maena*),
- 3 – Serranidae (*Serranus scriba*, *Serranus cabrilla*),
- 4 – Syngnathidae (*Hippocampus guttulatus*),

- 5 – Sparidae (*Diplodus vulgaris*),
- 6 – Labridae (*Coris julis*, *Symphodus ocellatus*),
- 7 – Scorpaenidae (*Scorpaena porcus*),
- 8 – Congridae (*Conger conger*).

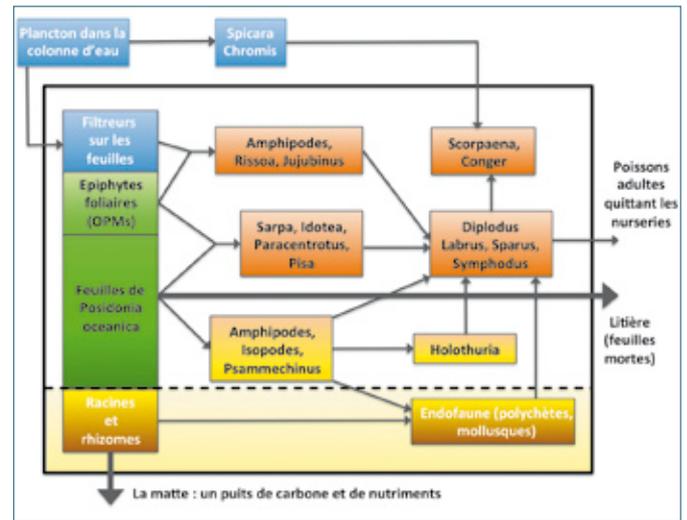
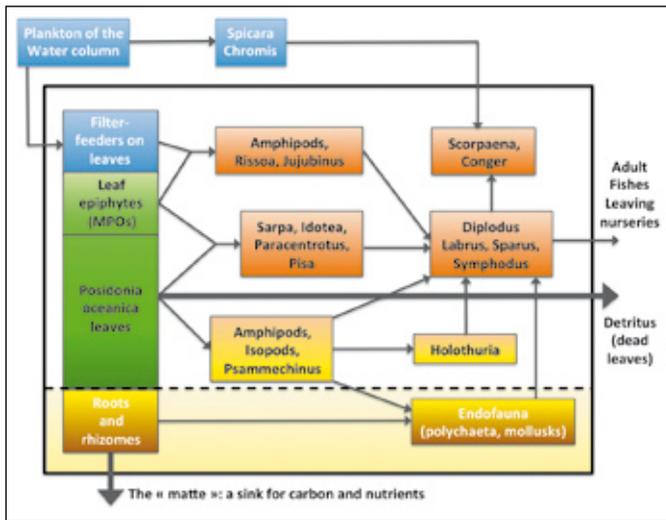
In addition to *Posidonia oceanica*, the compartment of primary producers includes numerous "macro-algae" fixed on the leaves and rhizomes, as well as unicellular species (e.g. diatoms). The compartment of secondary producers includes numerous sessile or vagile "invertebrates", as well as teleosts. Finally, heterotrophic prokaryotes play an important role in the recycling of organic matter.

Le compartiment des producteurs primaires comporte, outre *Posidonia oceanica*, de nombreuses « macroalgues » fixées sur les feuilles et les rhizomes ainsi que des unicellulaires (diatomées en particulier). Le compartiment des producteurs secondaires comporte de nombreux « invertébrés » sessiles ou vagiles, ainsi que des téléostéens. Enfin, les procaryotes hétérotrophes jouent un rôle important dans le recyclage de la matière organique.

The trophic organization of *Posidonia oceanica* meadows shows a low level of direct consumption of the high seagrass biomass by herbivores. The seagrass biomass enters trophic networks principally in the form of detritus (Vizzini, 2009). However, in the case of other species such as *Zostera marina*, direct consumers are relatively numerous; this is particularly true of birds (Nienhuis & Groenendijk, 1986), while *Cymodocea nodosa* is one of the preferred foods of herbivores (the sea urchin *Paracentrotus lividus* and teleost *Sarpa salpa*). The use of stable isotopes of carbon and nitrogen confirms that most of the carbon entering the meadows' trophic networks, especially in the case of *Posidonia oceanica*, derives from photosynthetic epibionts on the leaves, and also phytoplankton (Vizzini, 2009). Herbivores fall prey to a number of secondary consumers (shrimps, crabs, cephalopods and especially teleosts). Top predators, mainly temporary or occasional migrant piscivorous, also come in search of nourishment in the meadows.

L'organisation trophique des herbiers à *Posidonia oceanica* montre que seule une faible partie de l'importante biomasse végétale disponible est consommée par les herbivores. Cette biomasse végétale entre dans les réseaux trophiques principalement sous forme de détrit (Vizzini, 2009). Toutefois, chez d'autres espèces comme *Zostera marina*, les consommateurs directs sont relativement nombreux ; il s'agit en particulier d'oiseaux (Nienhuis & Groenendijk, 1986) tandis que *Cymodocea nodosa* constitue l'un des aliments préférés des herbivores (l'oursin *Paracentrotus lividus* et le téléostéen *Sarpa salpa*). L'utilisation des isotopes stables du carbone et de l'azote confirme que la majeure partie du carbone alimentant les réseaux trophiques des herbiers, surtout dans le cas de *Posidonia oceanica*, provient des épibiontes photosynthétiques des feuilles, ainsi que du phytoplancton (Vizzini, 2009). Les herbivores constituent les proies d'un grand nombre de consommateurs secondaires (crevettes, crabes, céphalopodes et surtout téléostéens). Des prédateurs de plus haut niveau, essentiellement des piscivores migrants temporaires ou occasionnels, viennent également se nourrir dans les herbiers.

The rise in water temperature is likely to lead to the replacement of "cold" affinity seagrass species of average structural complexity, such as *Zostera marina*, by 'warm' affinity seagrass species of lower



Simplified conceptual model of the trophic functioning of the *Posidonia oceanica* ecosystem with the main inputs and outputs of organic matter. The width of the arrows is proportionate to their importance (from Boudouresque *et al.*, 2006).

Modèle conceptuel simplifié du fonctionnement trophique de l'écosystème à *Posidonia oceanica* avec les principales entrées et sorties de matière. La largeur des flèches est proportionnelle à leur importance (d'après Boudouresque *et al.*, 2006).

structural complexity, such as *Cymodocea nodosa* and *Halophila stipulacea*. This diminishment of structural complexity will be even more marked in sectors where *Posidonia oceanica* runs a risk of regression (extension of the exclusion area of *Posidonia oceanica* due to high summer temperatures in the eastern basin).

L'augmentation de la température des eaux est de nature à engendrer le remplacement d'herbiers d'espèces à affinité « froide » et à complexité structurale moyenne comme les herbiers à *Zostera marina* par des herbiers d'espèces à affinité « chaude » mais à plus faible complexité structurale comme ceux à *Cymodocea nodosa* et *Halophila stipulacea*. Cette diminution de la complexité structurale sera encore plus marquée dans les secteurs où *Posidonia oceanica* risque de régresser (extension de la zone d'exclusion de *Posidonia oceanica* due aux fortes températures estivales dans le bassin oriental).

Furthermore, the rise in the temperature of surface water in the Mediterranean causes two types of modification in the seagrass communities:

D'autre part, l'augmentation de la température des eaux de surface de la Méditerranée génère deux types de modification du peuplement des herbiers :

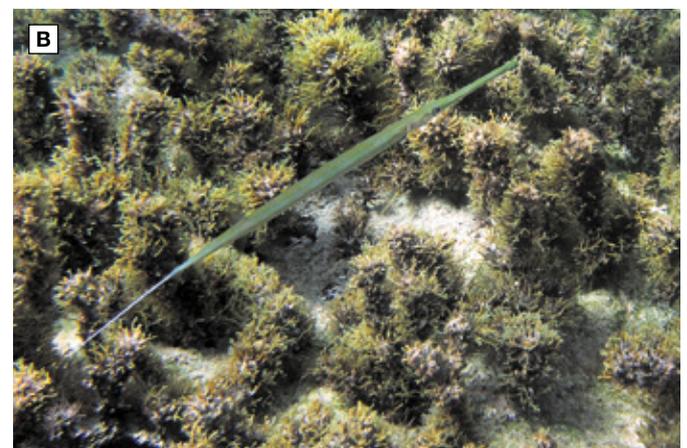
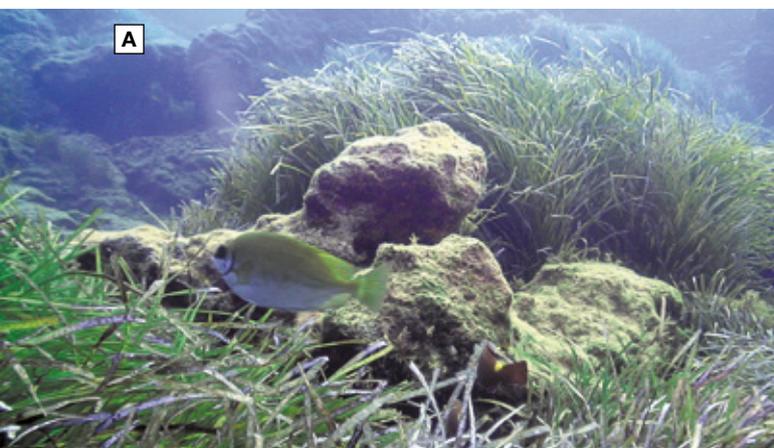
- modification of the relative abundance of closely related species, benefitting those with the most "meridional" affinities.
- modification combining temperature and the introduction of alien species, particularly those which entered the Mediterranean through the Suez Canal (Lessepsian species).

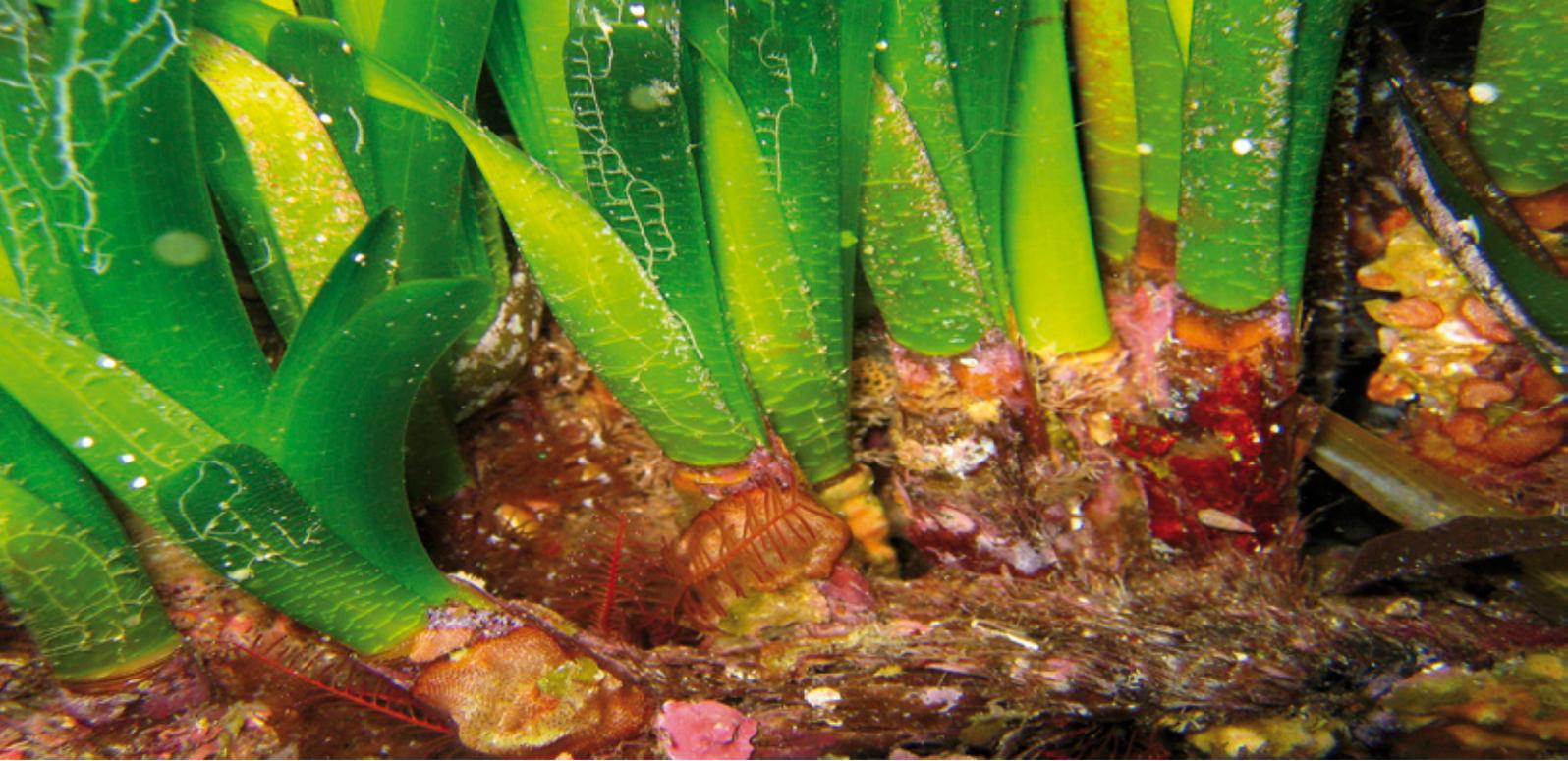
- une modification des abondances relatives d'espèces voisines au profit de celles ayant les affinités les plus méridionales.
- une modification qui combine température et introduction d'espèces exotiques, en particulier celles entrées en Méditerranée par le canal de Suez (espèces lessepsiennes).

Lessepsian species showing significant geographic expansion in the Mediterranean:

Espèces lessepsiennes présentant une forte expansion géographique en Méditerranée :

- A) *Siganus luridus*,
- B) *Fistularia commersonii*.





Foliar shoots of *Posidonia oceanica*.
Faisceaux foliaires de *Posidonia oceanica*.

Thus, after the opening of the Suez Canal in 1869, while species from the Red Sea long remained confined to the south-eastern coasts of the eastern basin, this is no longer the case today; for the past fifteen years or so, we have witnessed considerable acceleration of the colonization process of the Mediterranean by these Lessepsian species (Galil & Zenetos, 2002; Lejeusne *et al.*, 2010). This acceleration, which seems to be definitely correlated with the warming of the Mediterranean, is likely to continue in the coming decades.

While modification of the relative abundance of closely related species should not cause any major changes in the functioning of seagrass meadows, there is a risk that a massive arrival of invasive alien species will significantly alter the functioning of these ecosystems (Boudouresque *et al.*, 2005). It is currently very difficult to foresee with any exactitude the consequences of these modifications and their "cascade effects" on the functioning of Magnoliophyta ecosystems. However, two conflicting trends in the ecosystem functioning could occur, possibly in different sectors (Boudouresque *et al.*, 2005):

- increased grazing pressure due to *Siganus* spp. and expansion of the *Sparisoma cretense* range could accentuate the "herbivore pathway" at the expense of the "detritivore pathway", in the functioning of seagrass ecosystems,
- the rising abundance of primary producers with strong chemical anti-herbivore defenses, such as *Caulerpa* spp. (Chlorobionta), could further accentuate the importance of the detritivore pathway (Boudouresque *et al.*, 2005).

Likewise, consequences arising from modifications of the "invertebrate" compartment, strongly influenced by the introduction of new species, climate change, water acidification and the rise in the sea level, must also be taken into consideration.

Ainsi, après l'ouverture du Canal de Suez en 1869, si les espèces venant de mer Rouge sont restées longtemps cantonnées sur les côtes sud-est du bassin oriental, ce n'est plus le cas aujourd'hui et, depuis une quinzaine d'années, nous assistons à une considérable accélération du processus de colonisation de la Méditerranée par ces espèces lessepsiennes (Galil & Zenetos, 2002 ; Lejeusne *et al.*, 2010). Cette accélération, qui semble être corrélée positivement avec le réchauffement global des eaux de la Méditerranée, risque de se poursuivre dans les décennies qui viennent.

Si la modification d'abondance relative d'espèces proches ne devrait pas générer de grands changements dans le fonctionnement des herbiers, l'arrivée massive d'espèces exotiques invasives risque de modifier de façon significative le fonctionnement de ces écosystèmes (Boudouresque *et al.*, 2005). Il est très difficile aujourd'hui de prévoir exactement les conséquences de ces modifications et leurs « effets cascades » sur le fonctionnement des herbiers de Magnoliophytes. Toutefois, deux tendances opposées pourraient se dessiner dans le modèle de fonctionnement des herbiers, éventuellement dans des secteurs différents (Boudouresque *et al.*, 2005) :

- l'accroissement de la pression de broutage due aux *Siganus* spp. et à l'expansion de l'aire de *Sparisoma cretense* pourrait accentuer la « voie des herbivores », aux dépens de la « voie des détritivores », dans le modèle de fonctionnement des herbiers
- l'accroissement de l'abondance de producteurs primaires à fortes défenses chimiques anti-herbivores, tels que les *Caulerpa* spp. (chlorobionte), pourrait accentuer encore l'importance de la voie des détritivores (Boudouresque *et al.*, 2005).

De même, les conséquences liées aux modifications du compartiment « invertébrés » fortement influencé par l'introduction de nouvelles espèces, le changement climatique, l'acidification des eaux et la montée du niveau marin doivent être prises en considération.

C. Contribution to the mitigation of the consequences of climate change

EXTREME WEATHER EVENTS

In the Mediterranean, the origin of extreme weather events is either linked to the climate (storms and cyclones) or geological occurrences (tsunamis caused by submarine earthquakes, large-scale landslides or volcanic activity). Even if these phenomena are rare, the basin's recent history confirms that they should certainly not be excluded (Pareschi *et al.*, 2006), especially as certain extreme climatic phenomena seem to be more and more frequent (Romero *et al.*, 2007).

Following a series of recent natural catastrophes, including the tsunami in the Indian Ocean in 2004 and the Katrina and Nargis cyclones, the role played by vegetation in reducing the impact of associated waves has been widely emphasized (Feagin *et al.*, 2010). While mangroves, maritime marshes, coastal dunes and coral reefs are well-known for the role they play in breaking waves and reducing the speed of currents, several species of seagrass are also capable of diminishing the energy of waves and currents (Koch *et al.*, 2009). Resistance to waves and protection of the shore can only be assured up to a certain threshold, a certain limit, beyond which the meadow itself is damaged or even destroyed.

Among their many functions, *Posidonia oceanica* meadows play a part in stabilizing seabeds, breaking swells and waves, and encouraging the deposit of sedimentary particles (Boudouresque *et al.*, 2006). Furthermore, a particular feature common to sandy coastlines in the Mediterranean is the accumulation of *Posidonia oceanica* debris ("banquettes"). These "banquettes", of which 95 % consist of dead leaves, can be over 2 metres high and up to 20 metres wide. When conditions allow, this accumulated material can consolidate and produce a very compact and resistant structure, which can stay in place for several years, providing very effective protection against erosion of the shore.

C. Contribution à l'atténuation des conséquences du changement climatique

LES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES

En Méditerranée, les événements extrêmes ont une origine soit climatique (tempêtes et cyclones), soit géologique (tsunamis provoqués par des séismes sous-marins, des glissements de terrain de grande ampleur ou l'activité volcanique). Même si ces phénomènes sont rares, l'histoire récente du bassin confirme qu'il ne faut pas du tout les exclure (Pareschi *et al.*, 2006), d'autant plus que certains phénomènes climatiques extrêmes semblent de plus en plus fréquents (Romero *et al.*, 2007).

A la suite d'une série de catastrophes naturelles récentes, incluant le tsunami de l'océan Indien de 2004, les cyclones Katrina et Nargis, le rôle de la végétation sur la réduction de l'impact des vagues associées a été largement souligné (Feagin *et al.*, 2010). Si les mangroves, les marais maritimes, les dunes littorales, et les récifs coralliens sont les plus connus pour leur rôle dans la réduction des vagues et des vitesses de courant, plusieurs espèces marines de Magnoliophytes marines sont également à même d'atténuer l'énergie des vagues et des courants (Koch *et al.*, 2009). L'atténuation des vagues et la protection du littoral ne s'exercent que jusqu'à un certain seuil, une certaine limite, au-delà de laquelle l'herbier lui-même est endommagé voire détruit.

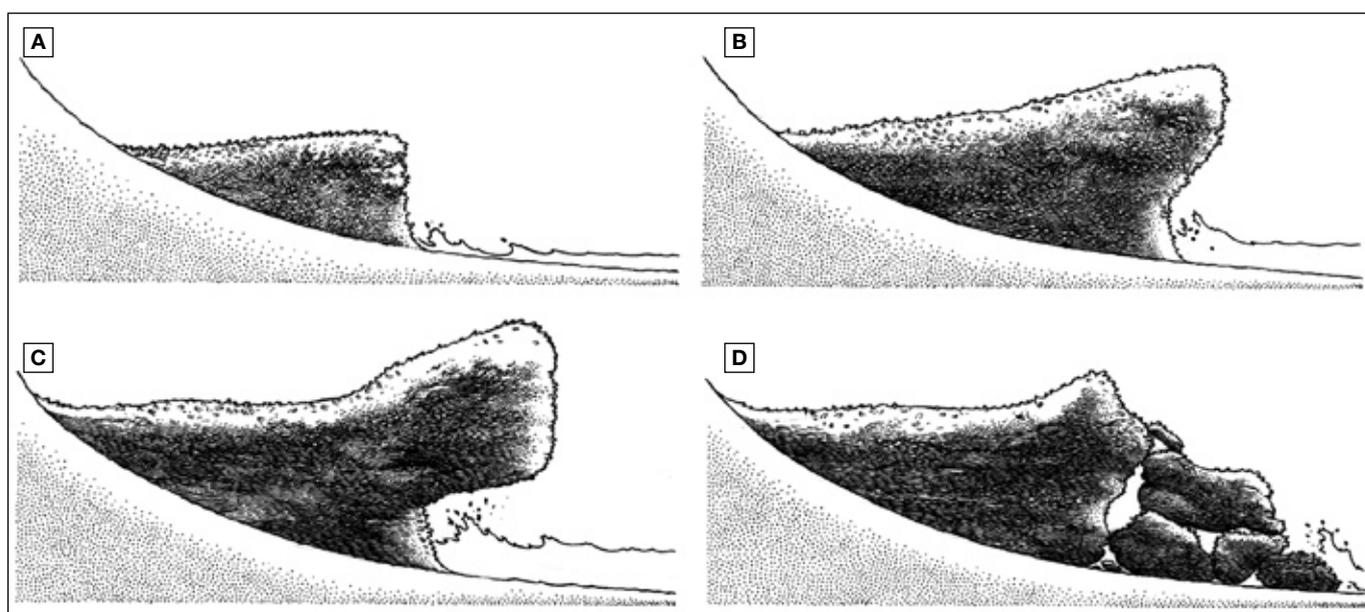
Parmi ses nombreuses fonctions, l'herbier à *Posidonia oceanica* joue un rôle dans la stabilisation des fonds marins, l'amortissement de la houle et des vagues, et favorise le dépôt des particules sédimentaires (Boudouresque *et al.*, 2006). D'autre part, une caractéristique commune aux côtes sableuses de Méditerranée est l'accumulation de débris de *Posidonia oceanica* (banquettes). Ces banquettes, dont 95 % sont constitués par les feuilles mortes, peuvent atteindre plus de 2 m de hauteur et jusqu'à 20 m de largeur. Lorsque les conditions le permettent, le matériel accumulé peut se consolider et donner naissance à une structure très compacte et résistante qui peut rester en place pendant plusieurs années offrant une protection très efficace contre l'érosion du littoral.

However, as in the case of mangroves or maritime marshes, while seagrasses are capable of playing the part of "shock absorber" under normal conditions, their action is likely to be more limited during more intense events (tsunami waves or very violent storms). On the other hand, in the wake of such events, seagrass meadows are able to reduce the potential for sediment re-suspension, enhance the speed of sedimentation and therefore reduce turbidity more quickly (Madsen *et al.*, 2001). Their capacity for mitigation will also depend on their resistance (which differs from one species to another) and characteristics (length of the leaves, density), the characteristics of the event itself (intensity, orientation, duration), bathymetry, the volumes and mobility of the sediment present, whence a wide variability of local factors.

Synergy between extreme weather events and the long-term consequences of climate evolution must also be taken into account. In fact, the rise in the sea level, temperatures and precipitation could constitute as many aggravating factors. The replacement of high biomass species (*Zostera marina* and *Posidonia oceanica*) with cold or temperate affinities, by smaller, warm affinity species (*Cymodocea nodosa* and *Halophila stipulacea*) could thus reduce capacities for protecting the shores.

Toutefois, comme pour les mangroves ou les marais maritimes, si les herbiers sont à même de jouer un rôle « d'amortisseur » dans des conditions normales, en revanche lors d'évènements plus intenses (vagues de tsunamis ou de tempêtes extrêmes) leur action risque d'être plus limitée. Par contre, après le passage de ces évènements, les herbiers pourront réduire la remise en suspension du sédiment, augmenter la vitesse de sédimentation et, par là même, réduire plus rapidement la turbidité (Madsen *et al.*, 2001). La capacité d'atténuation dépendra également de sa résistance (différente d'une espèce à l'autre), et fonction de ses caractéristiques (longueur des feuilles, densité), des caractéristiques de l'aléa (intensité, orientation, durée), de la bathymétrie, des volumes sédimentaires présents et de leur mobilité, d'où une grande variabilité locale de réponses.

La synergie entre les évènements extrêmes et les conséquences à long terme de l'évolution climatique ne doit pas non plus être écartée. En effet, l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation des températures et des précipitations pourraient constituer autant de facteurs aggravants. Ainsi le remplacement d'espèces à forte biomasse (*Zostera marina* et *Posidonia oceanica*), à affinité froide ou tempérée, par des espèces de plus petite taille, à affinité plus chaude (*Cymodocea nodosa* et *Halophila stipulacea*), pourrait réduire la capacité de protection du littoral.



Formation-destruction dynamics of the *Posidonia oceanica* "banquette".

(A) Initial stage, (B) increased size, (C) maximum height, (D) collapse of the "banquette" due to erosion of its base by wave action (Mateo *et al.*, 2002).

Dynamique de formation-destruction de la banquette de *Posidonia oceanica*.

(A) stade Initial, (B) augmentation de taille, (C) hauteur maximale atteinte, (D) écroulements de banquette dus à l'érosion de sa base par l'action des vagues (Mateo *et al.*, 2002).

CARBON SINKS ASSOCIATED WITH *POSIDONIA OCEANICA* MEADOWS

Carbon sinks are natural or artificial reservoirs in which carbon can be accumulated for a certain length of time. Since the beginning of the industrial era, carbon emissions resulting from human activities ($9.1 \cdot 10^9 \text{ tC a}^{-1}$ in Canadell *et al.*, 2007) have significantly affected the planet's carbon cycle (e.g. global warming and acidification of the oceans). These emissions come from the increasing use of natural carbon wells (hydrocarbons, coal, peat).

Although carbon stored in coastal vegetation (blue carbon) is not taken into account in the Kyoto Protocol, several studies point to the major role played by these sinks in carbon sequestration. Seagrasses play a major role as they are estimated to account for 40% ($50 \cdot 10^6 \text{ tC a}^{-1}$) of the carbon stored each year by coastal vegetation (Nelleman *et al.*, 2009).

Organic carbon buried in sediment comprises the main sink for *Posidonia oceanica*. *Posidonia oceanica* has a high primary production ($45 \text{ to } 542 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in Mateo *et al.*, 2006). The proportion of this production buried in sediment and the matte (dead sheaths, rhizomes and roots), is estimated on average to be 30 % of total production (Pergent *et al.*, 1994).

LES PUIITS DE CARBONE ASSOCIÉS AUX HERBIERS À *POSIDONIA OCEANICA*

Les puits de carbone correspondent à des réservoirs naturels ou artificiels dans lesquels le carbone peut être accumulé pendant un certain temps. Depuis le début de l'ère industrielle, les émissions de carbone liées aux activités humaines ($9.1 \cdot 10^9 \text{ tC a}^{-1}$ in Canadell *et al.*, 2007) ont affecté significativement le cycle du carbone de notre planète (e.g. réchauffement global et acidification des océans). Ces émissions proviennent de l'utilisation croissante de puits de carbone naturels (hydrocarbures, charbon, tourbe).

Bien que le carbone stocké dans la végétation littorale (carbone bleu) ne soit pas pris en compte dans le protocole de Kyoto, plusieurs études montrent le rôle majeur joué par ces puits dans la séquestration du carbone. Les Magnoliophytes marines jouent un rôle majeur puisqu'elles seraient responsables de 40 % ($50 \cdot 10^6 \text{ tC a}^{-1}$) du carbone stocké chaque année par la végétation côtière (Nelleman *et al.*, 2009).

Le carbone organique enfoui dans le sédiment correspond au puits principal pour *Posidonia oceanica*. *Posidonia oceanica* présente une production primaire élevée ($45 \text{ to } 542 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in Mateo *et al.*, 2006). La part de cette production enfouie dans le sédiment, la matte (écailles, rhizomes et racines), est évaluée en moyenne à 30 % de la production totale (Pergent *et al.*, 1994).



The mat formed by *Posidonia oceanica* accumulates a very important amount of organic matter with a low rate of decomposition (carbon sequestration).

La matte de *Posidonia oceanica* constitue une accumulation très importante de matière organique peu putrescible (séquestration de carbone).

In the case of *Posidonia oceanica*, it is usually possible to identify (i) a short-term organic carbon sink (mineralization occurring between 2 and 6 years) and (ii) a longer-term sink (a few decades to several millennia). The proportion of carbon that joins the sinks over the long term (sequestration) is estimated at 10 to 25% of the total carbon fixed by the plant, which represents 0.15 to 8.75 10⁶ tC a⁻¹ on the scale of the Mediterranean, i.e. 0.5 to 20% of the carbon sequestered by all the seagrasses present in the oceans.

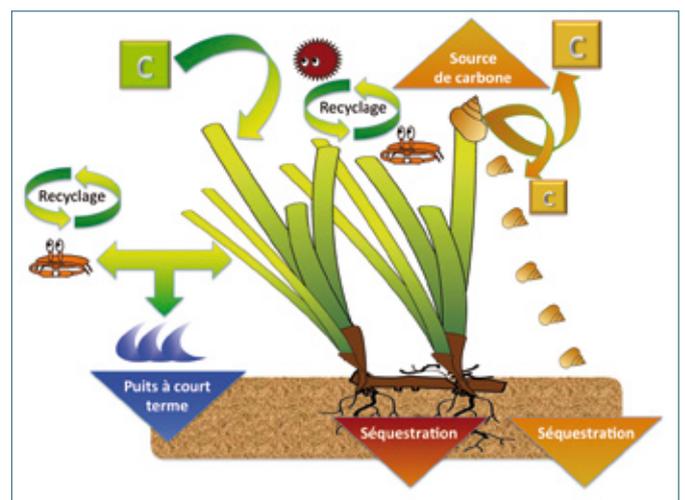
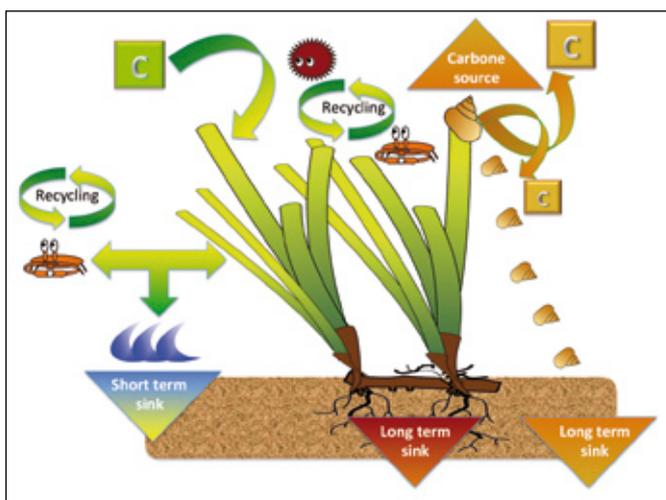
Taking the average thickness of the mat into account (1 to 4 m), the organic carbon stored is estimated to be between 100 and 410 10³ gC m⁻² (Romero *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 2010; Serrano, 2011). This represents 2.5 to 20.5 10⁹ tC on the scale of the Mediterranean, i.e. 11 to 89% of CO₂ emissions produced by Mediterranean countries, through combustion of fossil hydrocarbons, since the beginning of the industrial revolution (23 10⁹ tC in CDIAC, 2010). On the market for carbon, this quantity sequestered by *Posidonia oceanica* meadows is evaluated at 3 to 45 € m⁻², i.e. 17 to 250 times more than tropical forests (MacCord & Mateo, 2010).

The ecosystem formed by *Posidonia oceanica* hosts an important community of calcareous organisms (Rhodobionta and "invertebrates"). Little data exists on the deposit of carbonated sediments from these organisms (Serrano *et al.*, 2011). The limited data available gives values comparable to those documented for coral ecosystems. While the building of the mat leads to significant carbon storage, calcification mechanisms provide the atmosphere, on the other hand, with a significant source of CO₂ (Smith & Gattuso, 2009). The ratio between CO₂ emitted and CO₂ fixed is estimated at 0.6 (Ware *et al.*, 1992). In *Posidonia oceanica*, carbonates precipitation could be responsible of a net carbon emission between 28 to 83 gC m⁻² a⁻¹, i.e. a value somewhere between 0.7 and 4.2 10⁶ tC a⁻¹ at the Mediterranean scale.

Chez *Posidonia oceanica*, Il est généralement possible d'identifier (i) un puits de carbone organique à court terme (la minéralisation s'effectue entre 2 et 6 ans) et (ii) un puits à plus long terme (quelques décennies à quelques millénaires). La part du carbone qui rejoint les puits à long terme (séquestration) est estimée à 10 à 25 % du carbone total fixé par la plante, ceci représente 0,15 à 8,75 10⁶ tC a⁻¹ à l'échelle de la Méditerranée soit 0.5 à 20 % du carbone séquestré par l'ensemble des herbiers présents dans les océans.

En prenant en compte l'épaisseur moyenne de la mat (1 à 4 m), le carbone organique stocké est estimé entre 100 et 410 10³ gC m⁻² (Romero *et al.*, 1994 ; Mateo *et al.*, 2010 ; Serrano, 2011). Ceci représente 2,5 à 20,5 10⁹ tC à l'échelle de la Méditerranée, soit 11 à 89 % des émissions de CO₂ produites, par combustion d'hydrocarbures fossiles, par les pays méditerranéens depuis le début de la révolution industrielle (23 10⁹ tC in CDIAC, 2010). Sur le marché du carbone cette quantité séquestrée par les herbiers à *Posidonia oceanica* est évaluée entre 3 et 45 € m⁻², soit 17 à 250 fois plus que les forêts tropicales (MacCord & Mateo, 2010).

L'écosystème formé par *Posidonia oceanica* abrite une importante communauté d'organismes calcaires (Rhodobiontes et « invertébrés »). Il existe peu de données sur le dépôt de sédiments carbonatés issus de ces organismes (Serrano *et al.*, 2011). Les quelques données disponibles indiquent des valeurs comparables à celles enregistrées pour les écosystèmes coralliens. Si l'édification de la mat constitue un stockage important de carbone, les mécanismes de calcification constituent au contraire une source significative de CO₂ pour l'atmosphère (Smith & Gattuso, 2009). Le rapport entre le CO₂ émis et le CO₂ fixé serait de 0,6 (Ware *et al.*, 1992). Appliqué à l'herbier à *Posidonia oceanica*, la précipitation des carbonates générerait une émission de 28 à 83 gC m⁻² a⁻¹, soit une valeur comprise entre 0.7 et 4.2 10⁶ tC a⁻¹ à l'échelle de la Méditerranée.



Sinks and sources of carbon in *Posidonia oceanica* meadows.
Puits et sources de carbone au sein de l'herbier à *Posidonia oceanica*.

CO₂ EMISSIONS OFFSET BY *POSIDONIA OCEANICA* IN THE BALEARIC ISLANDS

Just like terrestrial forests, *Posidonia oceanica* seagrass meadows can fix and bury a significant proportion of atmospheric CO₂, helping to reduce greenhouse gases and thus contributing towards regulation of the planet's climate. The Balearic Islands in the Mediterranean Sea are surrounded by extensive and very healthy *Posidonia oceanica* meadows. Although there are many areas around the Islands where the meadows have not been mapped or where the information available is limited, the total area covered by *Posidonia oceanica* is estimated at around 67,000 hectares. Comparing this area with the exceptionally high carbon accretion rates in their long-term sink, the global accretion rate is estimated at 0.23 10⁶ tC a⁻¹. This value equals 0.84 10⁶ tCO₂ a⁻¹. When compared to the Islands' global CO₂ emissions, it can be estimated that *P. oceanica* meadows surrounding the Balearic Islands offset 8.7% of these emissions. The total stock accumulated equals 105 years of the Islands' CO₂ emissions. The store of carbon sequestered beneath the meadows (mats) is estimated at 420 10³ gC m⁻², which corresponds, for each kilometre of coast line, to an accumulation five times higher than the average recorded for the Mediterranean. On the global carbon market, this stock is valued at 4 billion euros, i.e. around 6 € m⁻². These estimates confirm the outstanding role of *Posidonia oceanica* in the Balearic Islands as a carbon sink, and their uniqueness within the context of the Mediterranean.

Adapted from MacCord & Mateo (2010).

Taking sinks of organic carbon into account (sequestration; estimated maximum 8.75 10⁶ tC a⁻¹) and sources of non-organic carbon (calcification; estimated maximum 4.2 10⁶ tC a⁻¹), *Posidonia oceanica* meadows seem to constitute a major sink of CO₂ in the Mediterranean. The estimates presented here are to be considered as departure points. They are susceptible of important variations as new data are made available and the conceptual frameworks of seagrass carbon sinks are refined.

	Mediterranean Flow	
	gC m ⁻² a ⁻¹	10 ⁶ tC a ⁻¹
Sink of organic C (sequestration)	6 to 175	0.15 to 8.75
Source from carbon precipitation (emission)	28 to 83	0.7 to 4.2
Balance	-147 to +77	-8.1 to +4.1

Table 1:

Estimates of the carbon sink and source associated to *Posidonia oceanica* meadows (estimated by Mateo and Serrano for this report. Full information is given in the extended version).

LES ÉMISSIONS DE CO₂ COMPENSÉ PAR *POSIDONIA OCEANICA* DANS LES ÎLES BALÉARES

Comme les forêts terrestres, les herbiers à *Posidonia oceanica* peuvent fixer et enfouir une part significative du CO₂ atmosphérique, permettant de réduire les gaz à effet de serre et contribuer à la régulation du climat de la planète. Les îles Baléares, en mer Méditerranée, sont entourées par des herbiers à *Posidonia oceanica* très étendus et présentant une forte vitalité. Bien qu'il y ait beaucoup de secteurs autour des îles où les herbiers n'ont pas été cartographiés et où les informations disponibles sont réduites, la surface totale couverte par *Posidonia oceanica* est estimée à environ 67 000 ha. En associant ces surfaces et le taux de fixation exceptionnellement important du carbone à long terme, la fixation globale est estimée à 0,23 10⁶ tC a⁻¹, soit 0,84 10⁶ tCO₂ a⁻¹. Comparé aux émissions de CO₂ de ces îles, les herbiers à *Posidonia oceanica* entourant les îles Baléares compensent 8.7 % de ces émissions. La totalité du stock accumulé équivaut à 105 ans d'émissions de CO₂ des îles. Le stock de carbone séquestré sous les herbiers (matte) est estimé à 420 10³ gC m⁻², ce qui correspond, pour chaque kilomètre de littoral à une accumulation cinq fois plus importante que la moyenne enregistrée pour la Méditerranée. Sur le marché global de carbone, ces stocks sont évalués à 4 milliards d'euros, soit environ 6 € m⁻². Ces évaluations confirment le rôle exceptionnel de *Posidonia oceanica* dans les îles Baléares comme puits de carbone et leur caractère unique dans le contexte méditerranéen.

Adapté de MacCord & Mateo, 2010.

En prenant en compte les puits de carbone organique (séquestration ; maximum estimé 8,75 10⁶ tC a⁻¹) et les sources de carbone inorganique (calcification ; maximum estimé 4,2 10⁶ tC a⁻¹), l'herbier à *Posidonia oceanica* apparaît comme un puits majeur de CO₂ à l'échelle de la Méditerranée. Il faut toutefois rester prudent car les valeurs dont nous disposons aujourd'hui sont encore préliminaires et mériteront d'être affinées.

	Flux méditerranéen	
	gC m ⁻² a ⁻¹	10 ⁶ tC a ⁻¹
Puits de C organique (séquestration)	6 à 175	0,15 à 8,75
Source liée à la calcification (émission)	28 à 83	0,7 à 4,2
Bilan	-147 à +77	-8,1 à +4,1

Tableau 1 :

Estimation des puits et des sources de carbone associés aux herbiers à *Posidonia oceanica* (d'après Mateo et Serrano pour ce document. Des renseignements plus précis sont indiqués dans la version longue).



Posidonia oceanica meadow.
Herbier à *Posidonia oceanica*.

Furthermore, beyond the values given above concerning the role of sinks or sources of carbon in *Posidonia oceanica* meadows, it seems clear that the essential interest of these formations lies in the accumulation, over long periods of time, of considerable quantities of carbon within the mat. Efforts should therefore focus primarily on the conservation of these reservoirs to avoid the carbon they contain being released into circulation.

D'autre part, au delà des valeurs avancées ci-dessus concernant le rôle de puits ou de source de carbone des herbiers à *Posidonia oceanica*, il apparaît évident que l'intérêt essentiel de ces formations réside dans l'accumulation, sur de longues périodes, de quantités considérables de carbone au sein de la matte. Les efforts devront donc porter prioritairement sur la conservation de ces réservoirs pour éviter une remise en circulation du carbone qu'ils contiennent.

Mixed meadow of *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa*.
Herbier mixte à *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa*.



Pinna nobilis in *Posidonia oceanica* meadow.
Pinna nobilis dans un herbier à *Posidonia oceanica*.



Conclusion

Mediterranean seagrass meadows reflect the history and biogeographical diversity of this particular sea. The many human pressures brought to bear on it today are likely to cause significant disruptions in the distribution and sustainability of these habitats.

Among these disruptions, climate change could lead to a general warming of the Mediterranean, with "meridionalization" or even "tropicalization" depending on the sectors, and to increasing frequency of extreme weather events. The rise in the average temperature of the sea water and its acidification (via dissolution of CO₂) would not be without consequence, both for the five species of marine Magnoliophyta present, and for the species associated with them.

Posidonia oceanica, the species most emblematic of the Mediterranean, exhibits relatively strong resilience to temperature, and the few regressions recorded seem to be related to weather events (thermal anomalies), either extreme or restricted to regions where summer temperatures are already very high. On the other hand, *Zostera noltii* and especially *Zostera marina* seem to be much more sensitive to the rise in sea water temperature, and for this last species several regressions have already been documented over the past few decades. In contrast, *Cymodocea nodosa*, a warm affinity species, and *Halophila stipulacea*, a Lessepsian species introduced into the Mediterranean in the late 19th century, seem rather to benefit from the warming of the Mediterranean.

The ecological characteristics of seagrasses found in the Mediterranean enable them to cover a broad spectrum of abiotic conditions, and when environmental conditions become unfavorable for one species, it can be replaced by another. However, while this replacement can occur with "indigenous" species, it can also be favorable to more opportunistic "introduced" species, or species with weaker structuring capacities, likely to cause deep changes in the communities.

The replacement of meadows composed of species of average or high structural complexity (*Zostera marina* and *Posidonia oceanica*) by meadows composed of warm affinity species but with lower structural complexity (*Cymodocea nodosa* and *Halophila*

Conclusion

Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée reflètent la diversité biogéographique et l'histoire de cette mer. Les pressions multiples exercées aujourd'hui par l'homme sont de nature à engendrer des bouleversements significatifs dans la répartition et la pérennité de ces peuplements.

Parmi ces bouleversements, les changements climatiques pourraient conduire à un réchauffement général de la Méditerranée, avec une « méridionalisation » voire une « tropicalisation » selon les secteurs, et à une augmentation de la fréquence des événements extrêmes. L'augmentation de la température moyenne des eaux et leur acidification (dissolution du CO₂) ne seraient pas sans conséquences pour les cinq espèces de Magnoliophytes marines présentes ni pour les espèces qui leur sont associées.

Posidonia oceanica, qui constitue l'espèce la plus emblématique de la Méditerranée, présente une résilience assez importante vis-à-vis de la température et les quelques régressions enregistrées semblent en relation avec des événements extrêmes (anomalies thermiques) ou restreintes à des régions où les températures estivales sont déjà très élevées. En revanche *Zostera noltii* et surtout *Zostera marina* semblent beaucoup plus sensibles à l'augmentation de la température des eaux, et pour cette dernière espèce plusieurs régressions ont déjà été rapportées depuis quelques décennies. Inversement *Cymodocea nodosa*, espèce à affinité chaude, et *Halophila stipulacea*, espèce lessepsienne introduite en Méditerranée à la fin du XIX^{ème} siècle, semblent plutôt bénéficier du réchauffement de la Méditerranée.

Les caractéristiques écologiques des Magnoliophytes marines présentes en Méditerranée leur permettent de couvrir un large spectre de conditions abiotiques et lorsque les conditions de milieu deviennent défavorables pour une espèce, elle peut être remplacée par une autre. Toutefois, si ce remplacement peut avoir lieu avec des espèces « indigènes » il peut aussi favoriser des espèces « introduites », plus opportunistes, ou des espèces présentant des capacités structurantes plus faibles de nature à déterminer des changements profonds dans les communautés.

stipulacea) would therefore have an effect on the diversity and role of the ecosystems associated with them. Furthermore, the rise in the temperature of the surface water of the Mediterranean leads to modification of the relative abundance of closely related species, to the benefit of those with the most "meridional" affinities, and favors the naturalization of alien species, particularly those originating from the Red Sea. This acceleration of the colonization process of the Mediterranean by Lessepsian species, which seems to be positively correlated with the warming of the waters, carries the risk of significant alteration of the functioning of Magnoliophyta meadows.

Among their many functions, seagrasses play a part in mitigating swells and waves, and protecting the shore from erosion. Thus, accumulation of *Posidonia oceanica* drift debris ("banquette") on the beaches provides very effective protection against erosion of the coast. The replacement of high biomass species (*Zostera marina* and *Posidonia oceanica*), of cold or temperate affinity, by smaller, warmer affinity species (*Cymodocea nodosa* and *Halophila stipulacea*) could lower the capacity for protection of the shore.

Like mangroves and salt marshes, seagrasses play a major role in the fixation and sequestration of blue carbon. In the case of *Posidonia oceanica*, primary production is estimated at between 45 and 542 gC m⁻² a⁻¹, and a significant proportion of fixed organic carbon (10 to 25%) is sequestered within the sediment (matte), constituting a long-term carbon sink (a few decades to several millennia). Inversely, biologically- or chemically-mediated carbonate precipitation, may provide the atmosphere with a significant source of CO₂ (estimated between 28 and 83 gC m⁻² a⁻¹).

Even though caution should still be exercised when looking at values currently available, the observation of organic carbon sinks (sequestration) and sources of non-organic carbon (calcification) seems to indicate that *Posidonia oceanica* meadows could be a major sink of CO₂. On the scale of the Mediterranean, the average quantity of fixed carbon could be in the region of eight millions tons per year.

Over and beyond these values, it seems evident that the essential interest of *Posidonia oceanica* seagrass lies in the accumulation, over long periods of time, of considerable quantities of carbon within the matte. Efforts should therefore focus primarily on conservation of these reservoirs to avoid the carbon they contain being released into circulation.

Ainsi, le remplacement d'herbiers d'espèces à complexité structurale moyenne ou forte (*Zostera marina* et *Posidonia oceanica*) par des herbiers d'espèces à affinité chaude mais à plus faible complexité structurale (*Cymodocea nodosa* et *Halophila stipulacea*) ne serait pas sans conséquence sur la diversité et le rôle des écosystèmes qui leur sont associés. D'autre part, l'augmentation de la température des eaux de surface de la Méditerranée génère une modification des abondances relatives d'espèces voisines, au profit de celles ayant les affinités les plus méridionales, et favorise la naturalisation d'espèces exotiques, en particulier les espèces originaires de mer Rouge. Cette accélération du processus de colonisation de la Méditerranée par des espèces lessepsiennes, qui apparaît positivement corrélé avec le réchauffement de ses eaux, risque de modifier de façon significative le fonctionnement des herbiers de Magnoliophytes.

Parmi leurs nombreuses fonctions, les herbiers jouent un rôle dans l'amortissement de la houle et des vagues et la protection du littoral contre l'érosion. Ainsi, l'accumulation de débris de *Posidonia oceanica* (banquettes) sur les plages offre une protection très efficace contre l'érosion du littoral. Le remplacement d'espèces à forte biomasse (*Zostera marina* et *Posidonia oceanica*), à affinité froide ou tempérée, par des espèces de plus petite taille, à affinité plus chaude (*Cymodocea nodosa* et *Halophila stipulacea*) pourrait réduire la capacité de protection du littoral.

A l'instar des mangroves et des près salés, les Magnoliophytes marines jouent un rôle majeur dans la fixation et la séquestration du carbone bleu. Chez *Posidonia oceanica*, la production primaire est estimée entre 45 et 542 gC m⁻² a⁻¹. De plus, une part importante du carbone organique fixé (10 à 25 %) est enfouie dans le sédiment (matte) et constitue un puits de carbone à long terme (quelques décennies à quelques millénaires). Inversement, les mécanismes biologiques ou chimiques de calcification y constituent une source significative (évaluée entre 28 et 83 gC m⁻² a⁻¹) de CO₂ dans l'atmosphère.

Même s'il faut encore rester prudent, au vu des valeurs disponibles à ce jour, la prise en compte des puits de carbone organique (séquestration) et des sources de carbone inorganique (calcification) semblent indiquer que l'herbier à *Posidonia oceanica* apparaît comme un puits majeur de CO₂. A l'échelle de la Méditerranée, la quantité moyenne de carbone fixée pourrait dépasser huit millions de tonnes par an.

Au delà de ces valeurs, il apparaît évident que l'intérêt essentiel des herbiers à *Posidonia oceanica* réside dans l'accumulation, sur de longues périodes, de quantités considérables de carbone au sein de la matte. Les efforts devront donc porter prioritairement sur la conservation de ces réservoirs pour éviter une remise en circulation du carbone qu'ils contiennent.

References

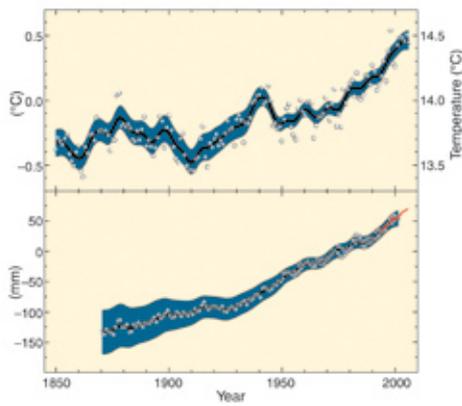
- Ben Maiz N., Shili A., 2007. Les peuplements phytobenthiques du Lac Nord de Tunis de 1926 À 2006. In: C. Pergent-Martini, S. El Asmi & C. Le Ravallec (Eds), "Proceedings of the third Mediterranean symposium on marine vegetation" Marseilles, 27-29 March 2007, RAC/SPA publ., Tunis: 247–249.
- Bernard G., Boudouresque C.F., Picon P., 2007. Long term changes in *Zostera* meadows in the Berre lagoon (Provence, Mediterranean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73: 617-629.
- Bianchi C.N., Morri C., 2000. Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin*, 40 (5): 367-376.
- Boudouresque C.F., 2004. Marine biodiversity in the Mediterranean: status of species, populations and communities. *Scientific Reports of Port-Cros National Park*, 20: 97-146.
- Boudouresque C.F., Ruitton S., Verlaque M., 2005. Large-scale disturbances, regime shift and recovery in littoral systems subject to biological invasions. In: V. Velikova & N. Chipev (Eds), Unesco-Roste/BAS "Workshop on regime shifts", 14-16 June 2005, Varna, Bulgaria: 85-101.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L., 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE publ., Monaco : 202 p.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Pergent G., Shili A., Verlaque M., 2009. Regression of Mediterranean Seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review. *Botanica Marina*, 52: 395-418.
- Canadell J.G., Le Quéré C., Raupach M.R., Field C.B., Buitenhuis E.T., Ciais P., Conway T.J., Gillett N.P., Houghton R.A., Marland G., 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104: 18866-18870.

Références bibliographiques

- Caye G., 1982. Etude de la croissance de la posidonie, *Posidonia oceanica* (L.) Delile, formation des feuilles et croissance des tiges au cours d'une année. *Tethys*, 10 (3): 229-235.
- CDIAC, 2010. Carbon Dioxide Information Analysis Center. <http://cdiac.ornl.gov>, 2010.
- Celebi B., Gucu A.C., Ok M., Sakinan S., Akoglu E., 2006. Hydrographic indications to understand the absence of *Posidonia oceanica* in the Levant sea (Eastern Mediterranean). *Biologia Marina Mediterranea*, 13 (4): 34-38.
- Charpentier A., Grillas P., Lescuyer F., Coulet E., Auby I., 2005. Spatio-temporal dynamics of a *Zostera noltii* dominated community over a period of fluctuating salinity in a shallow lagoon, Southern France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64: 307–315.
- Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., Kaschner K., Ben Rais Lasram F., Aguzzi J., Ballesteros E., Bianchi C.N., Corbera J., Dailianis T., Danovaro R., Estrada M., Frogia C., Galil B.S., Gasol J.M., Gertwagen R., Gil J., Guilhaumon F., Kesner-Reyes K., Kitsos M.S., Koukouras A., Lampadariou N., Laxamana E., López-Fé de la Cuadra C.M., Lotze H.K., Martin D., Mouillot D., Oro D., Raicevich S., Rius-Barile J., Saiz-Salinas J.I., San Vicente C., Somot S., Templado J., Turon X., Vafidis D., Villanueva R., Voultsiadou E., 2010. The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *PLoS ONE*, 5 (8): e11842.
- Den Hartog C., 1970. The sea-grasses of the world. *Verhandelingen der Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Afdeling Natuurkunde, Tweede Reeks*, 59 (1): 1-275.
- Duarte C.M., Middelburg J.J., Caraco N., 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2: 1-8.
- Elguindi N., Somot S., Déqué M., Ludwig W., 2011. Climate change evolution of the hydrological balance of the Mediterranean, Black and Caspian Seas: impact of climate model resolution. *Climate Dynamics*, 36: 205–228.

- Feagin R.A., Mukherjee N., Shanker K., Baird A.H., Cinner J., Kerr A.M., Koedam N., Sridhar A., Arthur R., Jayatissa L.P., Lo Seen D., Menon M., Rodriguez S., Shamsuddoha M., Dahdouh-Guebas F. 2010. Shelter from the storm? Use and misuse of coastal vegetation bioshields for managing natural disasters. *Conservation Letters*, 3: 1-11.
- Fritsch C., 1895. Über die Auffindung einer marinen Hydrocharidee im Mittelmeer. *Verhandlungen der kaiserlich-königlichen zoologisch-botanischen Gesellschaft in Wien*, 45: 104-106.
- Galil B.S., 2006. Species Factsheet: *Halophila stipulacea*. In: Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe (DAISIE), <http://www.europe-aliens.org>, 5th November 2006.
- Galil B., Zenetos A., 2002. A sea change – exotics in the eastern Mediterranean. In: E. Leppäkoski, S. Olenin & S. Gollasch (Eds) "Invasive aquatic species of Europe: Distributions, impacts and management", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 325-336.
- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse : 103p.
- Giorgi F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33: L08707, doi:10.1029/2006GL025734
- Green E.P., Short F.T., 2003. World atlas of seagrasses. University of California, Berkeley, Los Angeles & London: 298 p.
- Harmelin-Vivien M.L., 1982. Ichtyofaune des herbiers de Posidonies du Parc national de Port-Cros : 1. Composition et variations spatio-temporelles. *Travaux scientifiques du Parc national de Port-Cros*, 8: 69-92.
- Hughes A.R., Stachowicz J.J., 2004. Genetic diversity enhances the resistance of a seagrass ecosystem to disturbance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101: 8998-9002.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri R.K., Reisinger A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Koch E.W., Barbier E.B., Silliman B.R., Reed D.J., Perillo G.M.E., Hacker S.D., Granek E.F., Primavera J.H., Muthiga N., Polasky S., Halpern B.S., Kennedy C.J., Kappel C.V., Wolanski E., 2009. Non-linearity in ecosystem services: temporal and spatial variability in coastal protection. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7: 29-37.
- Lejeune C., Chevaldonné P., Pergent-Martini C., Boudouresque C.F., Perez T., 2010. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends in Ecology & Evolution*, 25 (4): 250-260.
- Li J., Wang M.W., Ho Y-S., 2011. Trends in research on global climate change: a science citation index expanded-based analysis. *Global and Planetary Change*, 77 (1/2): 13-20.
- MacCord F., Mateo M.A., 2010. Estimating the size of the carbon sink represented by *Posidonia oceanica* meadows along the coasts of the Balearic Island. Proyecto final de investigación, Master en Cambio Global, UIMP-CSIC, Spain : 35 p.
- Madsen J.D., Chambers P.A., James W.F., Koch E.W., Westlake D.F., 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444: 71-84.
- Marbà N., Duarte C.M., 2010. Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Global Change Biology*, 16 : 2366-2375.
- Marbà N., Duarte C.M., Cebrián J., Enríquez S., Gallegos M.E., Olesen B., Sand-Jensen K., 1996. Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline. *Marine Ecology Progress Series*, 137: 203-213.
- Mateo M.A., Sánchez-Lizaso J.L., Romero J. 2002. *Posidonia oceanica* 'banquettes': a preliminary assessment of the relevance for meadow carbon and nutrient budget. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 56: 85-90
- Mateo M.A., Cebrián J., Dunton K., Mutchler T., 2006. Carbon flux in seagrass ecosystems. In: A.W.D. Larkum, R.J. Orth & C.M. Duarte (Eds), "Seagrass: Biology, Ecology and Conservation", Springer, New York: 157-191.
- Mateo M.A., Renom P., Michener R.H., 2010. Long-term stability in the production of a NW Mediterranean *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadow. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291: 286-296.
- Mateo M.A., Romero J., 1997. Detritus dynamics in the seagrass *Posidonia oceanica*: elements for an ecosystem carbon and nutrients budget. *Marine Ecology Progress Series*, 151: 43-53
- Millot C., Candela J., Fuda J.-L., Tber Y., 2006. Large warming and salinification of the Mediterranean outflow due to changes in its composition. *Deep-Sea Research Part I*, 53: 656-666.
- Montefalcone M., Parravicini V., Vacchi M., Albertelli G., Ferrari M., Morri C., Bianchi C. N., 2010. Human influence on seagrass habitat fragmentation in NW Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86 (2): 292-298.
- Montefalcone M., Morri C., Peirano A., Albertelli G., Bianchi C.N., 2007. Substitution and phase shift within the *Posidonia oceanica* seagrass meadows of NW Mediterranean Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75: 63-71.
- Nellemann C., Corcoran E., Duarte C.M., Valdés L., De Young C., Fonseca L., Grimsditch G., 2009. Blue Carbon – A Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no
- Nienhuis P.H., Groenendijk A.M., 1986. Consumption of eelgrass (*Zostera marina*) by birds and invertebrates : an annual budget. *Marine Ecology Progress Series*, 29: 29-35.
- Novak A.B., Short F.T., 2010. Leaf reddening in seagrasses. *Botanica Marina*, 53: 93-97.
- Pareschi M.T., Boschi E., Favalli M., 2006. Lost tsunami, *Geophysical Research Letters*, 33: L18607, doi:10.1029/2006GL027790.

- Pergent G., Romero J., Pergent-Martini C., Mateo M.A., Boudouresque C.F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Marine Ecology Progress Series*, 106: 139-146.
- Pergent G., Djellouli A., Hamza A., Ettayeb K., Alkekli A., Talha M., Alkunti E., 2006. Etude des communautés végétales benthiques dans les lagunes côtières d'Ain Al-Ghazala et de Farwa (Libye). Centre d'Activité Régionale pour les Aires Spécialement Protégées : 64p + annexes.
- Pergent-Martini C., 2000. Protection des habitats d'herbiers de phanérogames marines de Méditerranée – Les études d'impacts en milieu marin. CAR/ASP Tunis et EqEL publ. : 1-52 + Annexes.
- Pergent-Martini C., Pasqualini V., Pergent G., Ferrat L., 2002. Effect of a newly set up wastewater-treatment plant on a marine phanerogam seagrass bed – a medium term monitoring program. *Bulletin Marine Sciences*, 71 (3): 1227-1236
- Peterson G., Allen C.R., Holling C.S., 1998. Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. *Ecosystems*, 1: 6-18.
- Plus M., Deslous-Paoli J.M., Dagault F., 2003. Seagrass (*Zostera marina* L.) bed recolonisation after anoxia-induced full mortality. *Aquatic Botany*, 77: 121-134.
- PNUE-PAM-CAR/ASP, 2009. Rapport sur le projet MedPosidonia, préparé pour le CAR/ASP par C. Rais, G. Pergent, R. Dupuy de la Grandrive & A. Djellouli. Neuvième réunion des Points Focaux Nationaux pour les ASP, Floriana – Malte, 3 – 6 juin 2009, CAR/ASP Publ., Document information UNEP(DEPI)/MED WG.331/Inf.11: 1-107 + ann.
- Rixen M., Beckers J.M., Levitus S., 2005. The Western Mediterranean Deep Water: a proxy for climate change. *Geophysical Research Letters*, 32: L12608, doi 10.1029/2005GL022702
- Romero J., Pérez M., Mateo M.A., Sala E., 1994. The belowground organs of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* as a biogeochemical sink. *Aquatic Botany*, 47 (1): 13-19.
- Romero R., Gayà M., Doswell C.A., 2007. European climatology of severe convective storm environmental parameters: A test for significant tornado events. *Atmospheric Research*, 83: 389-404
- Serrano O., 2011. Insights in the mat of *Posidonia oceanica*: biogeochemical sink and paleoecological record. PhD Thesis, Ecology Department, University of Barcelona, Barcelona: 38 p.
- Serrano O., Mateo M.A., Renom P., 2011 Seasonal response of *Posidonia oceanica* to light disturbances. *Marine Ecology Progress Series*, 423: 29-38.
- Short F.T., McKenzie L.J., Coles R.G., Vidler K.P., 2002. Seagrass-Net Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat. QDPI, QFS, Cairns: 56 p.
- Short F.T., Wyllie-Echeverria S., 2000. Global seagrass declines and effect of climate change. In: C.R.C. Sheppard (Ed.), "Seas at the millennium: an environmental evaluation". Pergamon, Elsevier, Amsterdam, 3: 10-11.
- Smith S.V., Gattuso J.P., 2009. Coral reefs. In: D. Laffoley & G. Grimsditch (Eds), "The management of natural coastal carbon sinks": 39-45.
- Terrados J., 1993. Sexual reproduction and seed banks of *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson meadows on the southeast Mediterranean coast of Spain. *Aquatic Botany*, 46 (3-4): 293-299.
- Touratier F., Goyet C., 2011. Impact of the Eastern Mediterranean Transient on the distribution of anthropogenic CO₂ and first estimate of acidification for the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research Part I*, 58 (1): 1-15.
- Vizzini S., 2009. Analysis of the trophic role of Mediterranean seagrasses in marine coastal ecosystems: a review. *Botanica Marina*, 52: 383-393.
- Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5> (accessed March 2011).
- Ware J.R., Smith S.V., Reaka-Kudla M.L., 1992. Coral reefs: sources or sinks of atmospheric CO₂? *Coral Reefs*, 11: 127-130.



**INTERNATIONAL UNION
FOR CONSERVATION OF NATURE**

IUCN-MED

Parque Tecnológico de Andalucía
Marie Curie, 22
29590 - Campanillas (Málaga), Spain
iucnmed@iucn.org
Tel +34 95 202 84 30
Fax +34 95 202 81 45
www.iucn.org/mediterranean

Core support to the IUCN Centre for
Mediterranean Cooperation is provided by:

