



© Shutterstock

Atelier de réflexion prospective MERMED

Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée

Rapport final

Coordination : Bernard Hubert et Mélanie Broin, Agropolis International

Equipe projet : Fabien Boulter, Agropolis International
Véronique Chagué, CNRS
Thomas Changeux, IRD
Denis Lacroix, Ifremer

Septembre 2014

Préambule

Ce document est le rapport final d'un atelier de réflexion prospective sur l'avenir de la mer Méditerranée face aux changements globaux (ARP MERMED), réalisé à la demande de l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR), dans le but de définir les domaines de recherche prioritaires qui permettront de développer les capacités d'anticipation et de gestion adaptative des sociétés méditerranéennes.

D'avril 2013 à septembre 2014, le Consortium MERMED a ainsi rassemblé, sous la coordination d'Agropolis International, 18 institutions françaises, étrangères et internationales ; et mobilisé 130 experts, issus de 10 pays (France, Italie, Espagne, Grèce, Algérie, Maroc, Tunisie, Egypte, Turquie, Belgique) et de 47 organisations.

Ce rapport, fruit du travail de ces 130 experts, présente ainsi les priorités de recherche identifiées, regroupées au sein de cinq grands thèmes :

- Comprendre le fonctionnement intégré du « système dynamique mer Méditerranée »
- Caractériser, évaluer et prévenir les risques liés au milieu marin pour les sociétés méditerranéennes
- Appuyer le développement d'activités durables en Méditerranée
- Evaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages
- Suivre les évolutions et promouvoir les capacités d'analyse prospective et les partenariats

La méthodologie de travail, les résultats de l'analyse prospective, la composition des groupes de travail et les références bibliographiques sont fournis en annexe.

Remerciements

En tant que coordinateur de cette étude, je tiens à remercier les 130 experts et leurs institutions de rattachement qui ont participé aux travaux et donné de leur temps. Une mention spéciale peut être faite aux 18 experts étrangers qui ont accepté de venir enrichir les approches des experts français et qui ont su parfaitement s'intégrer dans la dynamique des groupes de travail et des comités. Ce vaste ensemble de contributeurs actifs a ainsi permis, non seulement d'explorer un large champ de disciplines, mais aussi de structurer progressivement les thématiques étudiées pour aboutir à des recommandations robustes.

Bernard Hubert

Président d'Agropolis international

Coordinateur général de l'ARP-MERMED

Participants à l'étude

Composition du Consortium MERMED

Organisme	Sigle
1 Agropolis International	AI
2 Aix-Marseille Université	AMU
3 Bibliothèque d'Alexandrie	Bibalex
4 Bureau de recherches géologiques et minières	BRGM
5 Comité national des pêches maritimes et des élevages marins	CNPMEM
6 Centre national de la recherche scientifique	CNRS
7 Groupement inter-académique pour le développement	GID
8 Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer	Ifremer
9 Institut national de recherche halieutique (Maroc)	INRH
10 Inria - Inventeurs du monde numérique	Inria
11 Institut de recherche pour le développement	IRD
12 Plan Bleu - Environnement et développement en Méditerranée	Plan Bleu
13 Pôle Mer Méditerranée	Pôle Mer Méditerranée
14 Union internationale de conservation de la nature	UICN
15 Université de Montpellier 2	UM2
16 Université Dokuz Eylül - Izmir (Turquie)	Université d'Izmir
17 Université de Nice - Sophia Antipolis	UNSA
18 Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)	UPMC
19 Université du Sud - Toulon-Var	USTV

Liste des organisations partenaires

Organisme	Sigle
1 Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse	Agence de l'eau RMC
2 Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives	CEA
3 Cirad – La recherche agronomique pour le développement	Cirad
4 <i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i> (Italie)	CNR
5 Centre national de recherches météorologiques	CNRM
6 <i>Consejo Superior de Investigaciones Científicas</i> (Espagne)	CSIC
7 Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (Algérie)	DGRSDT
8 Ecole des Mines d'Alès	EMA
9 <i>Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile</i> (Italie)	ENEA
10 École nationale supérieure de techniques avancées	ENSTA-ParisTech
11 <i>Hellenic Centre for Marine Research</i> (Grèce)	HCMR
12 <i>International Atomic Energy Agency</i> (Monaco)	IAEA
13 Institut du développement durable et des relations internationales	IDDR
14 Institut national agronomique de Tunis (Tunisie)	INAT
15 <i>Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale</i> (Italie)	INOGS
16 Institut national de la recherche agronomique	Inra
17 Institut national des sciences et technologies de la mer (Tunisie)	INSTM
18 LittOcéan – Association pour le développement durable de la mer et du littoral	LittOcéan
19 MedPAN – Réseau des gestionnaires d'aires marines protégées en Méditerranée	MedPAN
20 Mercator Océan - Le centre français d'analyses et de prévisions océaniques	Mercator Océan
21 PhilMer - Expertise et conseil en gestion des Aires Marines Protégées	PhilMer
22 Université de Montpellier 3	UM3
23 Université de Gênes (Italie)	Université de Gênes
24 Université Abdelmalek Essaâdi – Tétouan (Maroc)	Université A. Essaâdi
25 Université Joseph Fourier (Grenoble)	UJF
26 Université de Liège (Belgique)	Université de Liège
27 Université Paris Diderot (Paris 7)	UPD
28 Université Paris-Est – Marne-la-Vallée	UPEM
29 Université de Perpignan – <i>Via Domitia</i>	UPVD

Liste des experts ayant participé à l'étude

Coordination : Bernard Hubert et Mélanie Broin (Agropolis International)

Equipe projet : Fabien Boulter (Agropolis International), Véronique Chagué (CNRS), Thomas Changeux (IRD), Denis Lacroix (Ifremer)

Liste des experts :

<i>Nom</i>	<i>Prénom</i>	<i>Organisme</i>	<i>Pays</i>	<i>Nom</i>	<i>Prénom</i>	<i>Organisme</i>	<i>Pays</i>
Andral	Bruno	Ifremer	France	Le Cozannet	Gonéri	BRGM	France
Arnaud	Nicolas	CNRS	France	Le Loc'h	François	IRD	France
Avellan	Christophe	Pôle Mer Méditerranée	France	Le Saout	Gwen	EMA	France
Arsouze	Thomas	ENSTA-ParisTech	France	Le Tellier	Julien	Plan Bleu	France
Ayata	Sakina-Dorothee	UPMC	France	Le Visage	Christophe	LittOcéan	France
Balouin	Yann	BRGM	France	Lebaron	Philippe	UPMC	France
Barroca	Bruno	UPEM	France	Leboulanger	Christophe	IRD	France
Barthelmebs	Lise	UPVD	France	Legendre	Louis	UPMC	France
Baudart	Julia	UPMC	France	Lellouche	Jean-Michel	Mercator Océan	France
Ben Khemis	Inès	INSTM	Tunisie	Leroux	Miriam	GID	France
Ben Souissi	Jamila	INAT	Tunisie	Lombard	Fabien	UPMC	France
Blayo	Eric	UJF	France	Magnan	Alexandre	IDDDRI	France
Boero	Ferdinando	CNR	Italie	Marcos	Marta	CSIC	Espagne
Boissery	Pierre	Agence de l'eau RMC	France	Masski	Hicham	INRH	Maroc
Bouchette	Frédéric	UM2	France	Metian	Marc	IAEA	Monaco
Brisset	Hugues	USTV	France	Michel	Edouard	CNRS	France
Cahu	Chantal	Ifremer	France	Migeon	Sébastien	UNSA	France
Cappato	Alberto	Université de Gênes	Italie	Migon	Christophe	UPMC	France
Chaboud	Christian	IRD	France	Moizo	Bernard	IRD	France
Chagué	Véronique	CNRS	France	Monaco	André	CNRS	France
Chami	Malik	UPMC	France	Mortier	Laurent	ENSTA-ParisTech	France
Changeux	Thomas	IRD	France	Mouillot	David	UM2	France
Charvis	Philippe	IRD	France	Mousseau	Laure	UPMC	France
Chatain	Béatrice	Ifremer	France	Norcy	Laura	Inria	France
Chevaldonné	Pierre	CNRS	France	Ollivier	Bernard	IRD	France
Claudet	Joaquim	CNRS	France	Pedrotti	Maria-Luisa	CNRS	France
Cochonat	Pierre	Ifremer	France	Petit de la Villeon	Loïc	Ifremer	France
Cury	Philippe	IRD	France	Pioch	Sylvain	UM3	France
Dabbadie	Lionel	Cirad	France	Person	Julie	Pôle Mer Méditerranée	France
Desdevises	Yves	UPMC	France	Pringault	Olivier	IRD	France
Dezileau	Laurent	UM2	France	Provitolo	Damienne	CNRS	France
Dimou	Michail	USTV	France	Rabouille	Sophie	CNRS	France
D'Ortenzio	Fabrizio	CNRS	France	Radakovitch	Olivier	AMU	France
El Moumni	Bouchta	Université de Tétouan	Maroc	Raimbault	Patrick	CNRS	France
Estournel	Claude	CNRS	France	Rambert	Patrick	Inria	France
Faget	Daniel	AMU	France	Rapaport	Alain	Inra	France
Fouilland	Eric	CNRS	France	Rey	Vincent	USTV	France
Francour	Patrice	UNSA	France	Reygondeau	Gabriel	UPMC	France
Galletti	Florence	IRD	France	Robert	Philippe	PhilMer	France
Gattuso	Jean-Pierre	CNRS	France	Robert	Samuel	CNRS	France
Géli	Louis	Ifremer	France	Ruellan	Etienne	CNRS	France
Georgopoulos	Dimitris	HCMR	Grèce	Ruti	Paolo	ENEA	Italie
Ghribi	Mounir	INOFS	Italie	Sabatier	François	AMU	France
Giraud	Jean-Pierre	Plan Bleu	France	Sacchi	Jacques	Ifremer	France
Grégoire	Marilaure	Université de Liège	Belgique	Sainte-Marie	Jacques	Inria	France
Gros	Philippe	Ifremer	France	Sauzade	Didier	Plan Bleu	France
Guennoc	Pol	BRGM	France	Schaffar	Alexandra	USTV	France
Guferi	Mokhtar	DGRSDT	Algérie	Sempéré	Richard	AMU	France
Guidetti	Paolo	UNSA	France	Serre	Damien	UPD	France
Guieu	Cécile	CNRS	France	Siegel	Anne	CNRS	France
Guilhaumon	François	IRD	France	Siokou-Frangou	Ioanna	HCMR	Grèce
Guillard	Hervé	Inria	France	Somot	Samuel	CNRM	France
Guiot	Joël	CNRS	France	Souche	Jean-Claude	EMA	France
Guizien	Katell	CNRS	France	Sous	Damien	USTV	France
Hébert	Hélène	CEA	France	Testor	Pierre	CNRS	France
Hénoque	Yves	Ifremer	France	Thomas	Yildiz	CNRS	France
Herrouin	Guy	Pôle Mer Méditerranée	France	Topin	Jean-Claude	GID	France
Idier	Déborah	BRGM	France	Tricot	Anne	CNRS	France
Irisson	Jean-Olivier	UPMC	France	Troussellier	Marc	CNRS	France
Jacob	Céline	CNRS	France	Tusseau	Marie-Hélène	Ifremer	France
Jedy de Grissac	Alain	UICN	Espagne	Vinchon	Charlotte	BRGM	France
Laabir	Mohamed	UM2	France	Webster	Chloé	MedPAN	France
Lacroix	Denis	Ifremer	France	Wendling	Bertrand	CNPMEM	France
Lami	Raphaël	UPMC	France	Yucel Gier	Guzel	Université d'Izmir	Turquie
Le Corre	Gildas	Ifremer	France	Zaki	Yehia	Bibalex	Egypte

Sommaire

Préambule	1
Participants à l'étude	3
Introduction	11
Partie 1 : Comprendre le fonctionnement intégré du « système dynamique mer Méditerranée »	13
I. Etudier les composantes dynamiques du milieu physique et comprendre leurs interactions.....	14
A. Connaître la physiographie et analyser la dynamique géophysique du bassin méditerranéen.....	14
B. Etudier le fonctionnement hydrométéorologique du bassin méditerranéen	15
C. Comprendre l'hydrodynamique du bassin et les processus de transferts sédimentaires	16
II. Explorer et analyser la structuration de la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes.....	19
III. Identifier et délimiter les écorégions à l'échelle de la Méditerranée	22
IV. Développer des modèles intégrés pour comprendre le fonctionnement dynamique du bassin méditerranéen	23
A. Améliorer les modèles physiques.....	24
B. Améliorer les modèles biogéochimiques.....	25
C. Améliorer les modèles de chaîne trophique supérieure.....	27
D. Vers une nouvelle génération de modèles intégrés du « système terre » régional en Méditerranée.....	27
Partie 2 : Caractériser, évaluer et prévenir les risques liés au milieu marin pour les sociétés méditerranéennes	29
I. Anticiper les risques de submersion et d'érosion des zones côtières	30
II. Optimiser les systèmes de surveillance et d'alerte tsunami.....	32
III. Approfondir les connaissances des sources, flux, devenir et impact des polluants en mer Méditerranée.....	33
A. Déchets solides	34
B. Contaminants chimiques « anciens »	34
C. Contaminants chimiques « émergents »	35
D. Apports continentaux de polluants chimiques lors des épisodes de crue en Méditerranée.. ..	35
E. Impacts de l'activité aquacole sur le milieu environnant	36
F. Devenir des contaminants en mer.....	37
G. Questions de recherches transversales.....	37
IV. Comprendre les processus en jeu dans l'introduction et la prolifération d'espèces.....	39
V. Caractériser les vulnérabilités des sociétés méditerranéennes face aux risques.....	41
VI. Développer les capacités d'adaptation et/ou de résilience des territoires littoraux et du milieu marin aux changements globaux.....	43

Partie 3 : Appuyer le développement d'activités durables en Méditerranée	47
I. Accompagner l'évolution des métiers de la petite pêche artisanale.....	48
A. Evaluer l'impact des petits métiers de la pêche et faire reculer les états de référence	49
B. Exploiter la biodiversité marine pour donner un avenir à la pêche côtière	50
C. Valoriser la richesse patrimoniale pour augmenter la résilience des petites pêches artisanales côtières.....	51
D. Inventer de nouveaux modes de gestion pour la petite pêche	52
E. Mieux connaître les usages récréatifs qui entrent en compétition avec la petite pêche ...	53
II. Soutenir une aquaculture méditerranéenne plus durable.....	54
A. Mettre en place une bonne gouvernance des systèmes aquacoles.....	55
B. Innover pour des systèmes de production durables	56
C. Sélectionner et améliorer les espèces élevées.....	57
III. Vers des biotechnologies "bleues" innovantes.....	58
A. Isoler et décrire les souches d'intérêt.....	59
B. Développer des technologies de pointe	61
C. Réduire les coûts de production et réaliser des économies d'échelle	62
D. Prendre en compte les aspects réglementaires	62
IV. Développer l'éco-ingénierie et le génie écologique pour réduire l'impact des activités et aménagements humains en Méditerranée	64
A. Générer les connaissances nécessaires au génie écologique	64
B. Mobiliser et encadrer les acteurs de l'éco-conception et de la co-conception.....	64
 Partie 4 : Evaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages	 67
I. Identifier les échelles spatio-temporelles de fonctionnement des écosystèmes en croisant distribution et connectivité des habitats.....	69
A. Identifier la communauté fonctionnelle des écosystèmes	70
B. Identifier les habitats des espèces formant la communauté fonctionnelle aux différents stades de leur cycle de vie	71
C. Identifier les transferts entre les habitats des espèces formant la communauté fonctionnelle.....	72
II. Identifier les échelles spatio-temporelles d'organisation et de structuration des usages et de leurs modes de gouvernance.....	74
A. Analyser la connectivité entre niveaux d'intervention, institutions, instruments et processus de régulation des ressources et des usages.....	74
B. Améliorer la connaissance des activités humaines et la caractérisation de leurs impacts	77
III. Evaluer de façon critique les mesures de gestion actuelles pour les améliorer..	80
A. Evaluer le dispositif des aires marines protégées	80
B. Analyser les causes d'échec ou de succès des mesures de gestion	81
C. Améliorer les mesures de gestion existantes à partir de leur évaluation.....	83

Partie 5 : Suivre les évolutions et promouvoir les capacités d'analyse prospective et les partenariats	85
I. Optimiser la collecte et le traitement des données	86
A. Multiplier les sources de données	86
B. Organiser la collecte des données au sein d'observatoires	89
C. Créer un réseau de zones ateliers	90
D. Développer des méthodes de traitement et d'analyse des données	93
II. Réaliser des exercices coordonnés de modélisation pour connaître l'état passé et anticiper l'état futur de l'océan	94
A. Coordonner les études des impacts futurs du changement climatique en mer Méditerranée	94
B. Ré-analyser les données anciennes pour connaître l'état passé de la mer Méditerranée	96
III. Développer des scénarios sur l'avenir des services écosystémiques fournis par la mer Méditerranée	99
IV. Renforcer la coopération internationale en matière de recherche scientifique sur la mer Méditerranée	102
Liste des acronymes	105
Références bibliographiques	107
Annexes	i

Introduction

Mer intercontinentale presque entièrement fermée, la Méditerranée s'étend sur environ 2,5 millions de km². Elle s'ouvre sur l'océan Atlantique *via* le détroit de Gibraltar et est reliée à la mer Noire par le Bosphore et, depuis 1869, à la mer Rouge par le canal de Suez. Située à la limite des plaques africaine et eurasiennne, elle est le siège d'une intense activité sismique et volcanique.

D'un point de vue physique, elle se divise principalement en deux bassins bien individualisés (Méditerranée occidentale et orientale), eux-mêmes subdivisés en nombreuses entités contrastées. Sous l'influence des grands fleuves qui s'y jettent (Pô, Rhône, Nil, Ebre...) et des différents courants dont elle est le siège, elle se caractérise par des transferts horizontaux et verticaux rapides, fortement dépendants des conditions météo-climatiques et soumis à une grande variabilité à toutes les échelles temporelles.

D'un point de vue biologique, la mer Méditerranée est identifiée comme l'un des « *hot spots* » de la biodiversité marine, abritant de très nombreuses espèces, dont un fort pourcentage d'endémiques. Lagunes littorales, marais maritimes, estuaires, deltas, côtes rocheuses et sableuses, herbiers, coralligènes, fonds meubles et rocheux, canyons, plateaux, montagnes sous-marines, sont autant d'habitats remarquables qui favorisent la diversité des organismes en Méditerranée.

D'un point de vue géopolitique, la mer Méditerranée représentait dans l'Antiquité un carrefour d'échanges commerciaux et culturels entre les peuples de la région. Elle constitue aujourd'hui un espace partagé par 23 pays riverains, traversé et exploité par ces pays et des tierces parties. C'est un espace disputé, avec des tensions entre les usagers et des compétitions sur les ressources. Néanmoins, sur l'ensemble des problématiques liées à la mer, les pays riverains sont liés par une « communauté de destin ». D'où la nécessité de mieux coopérer, à l'échelle de l'ensemble du bassin, en termes d'analyse et d'évaluation des ressources ; d'observation, de suivi et de contrôle ; et de gestion des ressources et des usages qui en découlent.

D'un point de vue humain, les pays riverains rassemblaient en 2011 une population de 475 millions d'habitants, dont un tiers sur le littoral et une forte proportion dans des « mégacités » côtières ou proches de la mer (Le Caire, Istanbul, Athènes, Rome, Barcelone, Marseille, Alger...). Depuis le littoral jusqu'au large, la mer Méditerranée est le siège de nombreuses activités : espace de navigation, exploitation de ses ressources vivantes ou minérales, mais aussi de ses particularités paysagères, culturelles et climatiques qui attirent chaque année sur le littoral méditerranéen plus de touristes que celui-ci ne compte d'habitants ! Elle procure également une grande diversité de services écosystémiques non marchands (nurseries pour les espèces exploitées, recyclage des éléments nutritifs, absorption et séquestration de CO₂ atmosphérique, filtration des substances toxiques, protection contre l'érosion des côtes...), dont dépendent la qualité de vie des populations riveraines et certaines de leurs activités économiques, comme la pêche, l'aquaculture, le tourisme...

On constate un renforcement de l'intensité et la fréquence des perturbations liées au changement climatique (augmentation de la température et acidification de l'eau, élévation du niveau de la mer...) et aux évolutions sociétales (émission de gaz à effet de serre, surpêche, augmentation des usages récréatifs, des pollutions chimiques, des invasions biologiques...). En conséquence, les services écosystémiques marins, qu'ils soient régulateurs ou fournisseurs, en sont affectés et le seront encore plus à l'avenir.

Dans une vision prospective à l'horizon des trente prochaines années, la recherche, l'innovation et la formation ont un rôle essentiel à jouer afin de fournir les connaissances nécessaires pour orienter et accompagner ces évolutions vers un avenir souhaitable. Cela ne peut s'envisager sans aborder les problèmes et les questions qui se posent en considérant l'ensemble du bassin méditerranéen.

Ce rapport présente ainsi les grandes questions de recherche prioritaires pour le bassin méditerranéen, issues de l'Atelier de Réflexion Prospective MERMED : « Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée : quelles recherches et quels partenariats ? », financé par l'ANR, et auquel ont participé 130 experts. Les questions de recherche ainsi mises en avant se déclinent selon cinq thèmes qui constituent les grandes parties de ce rapport :

- Comprendre le fonctionnement intégré du « système dynamique mer Méditerranée »
- Caractériser, évaluer et prévenir les risques liés au milieu marin pour les sociétés méditerranéennes
- Appuyer le développement d'activités durables en Méditerranée
- Evaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages
- Suivre les évolutions et promouvoir les capacités d'analyse prospective et les partenariats

Partie 1 : Comprendre le fonctionnement intégré du « système dynamique mer Méditerranée »

La mer Méditerranée constitue un espace original posant des défis scientifiques spécifiques.

Sa physiographie, héritée d'une activité géodynamique intense, est très contrastée au niveau des domaines continentaux côtiers, des littoraux, des marges et des bassins profonds et de leurs connexions. L'activité sismique et volcanique y est toujours très dynamique. A ce contexte géologique particulier, se superpose un fonctionnement hydrométéorologique complexe et à caractère encore largement imprévisible. Ces deux facteurs interagissent sur l'hydrodynamique et les transferts de divers types, en particulier sédimentaires.

Cette physiographie contrastée sur une surface relativement réduite crée une grande variété d'habitats connectés, qui accueillent une riche biodiversité marine, dont de très nombreuses espèces endémiques.

Ainsi, l'échelle spatiale restreinte de la mer Méditerranée, associée à sa forte structuration géologique, climatique et météorologique à méso-échelle et à sa riche biodiversité, en fait un terrain d'étude particulièrement pertinent pour la définition d'écorégions.

Par ailleurs, elle regroupe à la fois des écosystèmes oligotrophes (pauvres en phytoplancton, par exemple la mer Ionienne) à l'image de ceux rencontrés dans les océans ouverts et des écosystèmes côtiers plus productifs (par exemple le golfe du Lion), pour lesquels les enjeux socioéconomiques sont significatifs (risques d'effondrements et d'avalanches sous-marines, proliférations de plancton gélatineux sur le littoral...). Elle se caractérise également par une circulation thermohaline de grande échelle, ce qui a popularisé son image de « modèle réduit de l'océan global ». Cette circulation explique, dans une large mesure, la structure générale de l'écosystème qui présente une oligotrophie croissante d'ouest en est.

Or, le réchauffement climatique pourrait conduire à un affaiblissement drastique de la circulation thermohaline, avec des conséquences considérables sur les écosystèmes. Les zones littorales et côtières – y compris les zones lagunaires, écosystèmes d'importance majeure en Méditerranée – sont les plus fortement soumises à la pression anthropique, largement exploitées mais aussi couplées au milieu hauturier par une circulation générale faite de puissants courants de bord instables, favorisant les échanges entre ces milieux. Ceci exacerbe le caractère multi-échelle et les difficultés de l'observation et de la modélisation.

Enfin, les scénarios d'évolution tant climatique et environnementale, qu'économique et sociale sont d'une grande variété, et imposent à l'observation de long terme et à la simulation des défis que les systèmes d'observation et modèles ne peuvent pas relever à l'heure actuelle.

I. Etudier les composantes dynamiques du milieu physique et comprendre leurs interactions

Le fonctionnement physique du bassin méditerranéen est conditionné par une physiographie très contrastée au niveau des domaines continentaux côtiers, des littoraux, des marges et des bassins profonds et de leurs connexions. Cette physiographie est directement héritée d'une histoire géodynamique qui contrôle toujours étroitement aujourd'hui les caractéristiques géophysiques – et notamment sismologiques – de la mer Méditerranée. A ce contexte géologique particulier, se superpose un fonctionnement hydrométéorologique complexe et à caractère imprévisible. Ces deux facteurs interagissent sur l'hydrodynamique et les transferts de divers types, en particulier sédimentaires. Ces derniers sont aussi actuellement de plus en plus fortement impactés par les aménagements côtiers et les activités humaines. De nombreux défis scientifiques doivent être relevés pour mieux appréhender le fonctionnement du milieu marin méditerranéen d'un point de vue physique, dans ses différentes composantes et dans les interactions entre ces composantes.

A. Connaitre la physiographie et analyser la dynamique géophysique du bassin méditerranéen

Le bassin méditerranéen présente un contraste très marqué entre ses domaines oriental et occidental connectés par le seuil du détroit de Sicile. Dans ces deux domaines, les marges continentales alternent entre des morphologies (1) étroites et abruptes du fait d'un phénomène de reprise en compression, avec un plateau continental peu développé et une pente continentale escarpée, et une alimentation par de petits fleuves côtiers permettant le creusement de nombreux canyons alimentant de petits systèmes détritiques sableux profonds, et (2) larges du fait d'une subsidence thermique associée aux forts apports sédimentaires de grands fleuves (Rhône et Nil) qui ont permis le développement d'un vaste plateau continental, d'une pente continentale douce et d'épaisses accumulations détritiques argilo-silteuses profondes. Ces contrastes morphologiques génèrent un fort contrôle sur des phénomènes aussi variés que la distribution des zones de production et de plongement d'eaux profondes, sur la circulation thermohaline, ou plus localement sur la distribution des peuplements benthiques.

Situé dans le domaine de convergence Afrique-Eurasie, la Méditerranée est le siège d'une activité sismique importante, notamment en Méditerranée orientale dans la zone de subduction hellénique et vers l'est le long de la faille nord-anatolienne (en témoigne le séisme d'Izmit de 1999, d'une magnitude de 7.4 Mw, ayant fait au moins 50 000 morts). En Méditerranée occidentale, la sismicité, plus diffuse, est répartie sur de nombreuses failles encore très mal connues, notamment en mer (illustrée par le séisme « Ligure » de 1887 de magnitude 6.7 Mw, et celui de Boumerdès de 2003, d'une magnitude de 6.8 Mw, ayant fait 3 000 morts). Cette activité sismique peut être à l'origine de tsunamis régionaux destructeurs, tels ceux qui se sont déjà produits sur l'arc égéen (365, 1303) et qui menacent toutes les côtes de l'est méditerranéen jusqu'à la Sicile et l'Adriatique. A une échelle centennale, des événements plus locaux mais de plus haute fréquence peuvent induire des risques directs ou indirects pour les zones côtières (tsunamis locaux, érosion du plateau continental, etc.) : il s'agit des glissements et des avalanches sous-marines et des éruptions volcaniques, dont on retrouve la trace dans les séries sédimentaires. Les événements récents des glissements de l'aéroport de Nice en 1979 et du Stromboli en 2002 en sont des exemples frappants.

Au-delà du problème de l'aléa géologique, de nombreuses questions sur l'évolution géodynamique et la structure des marges sous-marines en Méditerranée restent également en suspens. La meilleure compréhension de la dynamique du bassin méditerranéen nécessite d'approfondir les recherches menées dans les domaines suivants :

- Afin de mieux appréhender les processus physiques en jeu avant, pendant et après la rupture sismique, il est nécessaire de développer et de **mieux coordonner au niveau international les réseaux géophysiques** (sismologique, géodésique, marégraphique, tsunami) **d'observation et d'alerte à terre et en mer** (voir partie 2 du présent rapport : « Caractériser, évaluer et prévenir les risques liés au milieu marin pour les sociétés méditerranéennes »). Ces observations permettent de caractériser en temps réel les séismes (rupture, mécanisme au foyer) et de cartographier les mouvements forts du sol afin de gérer au mieux la crise. En cas de séisme tsunamigénique, elles permettent d'améliorer les capacités de prédiction en temps réel des effets des tsunamis à la côte. Ce développement est d'autant plus critique dans les zones de déformation lente qui sont communes autour de la Méditerranée et dont les cycles sismiques restent méconnus.
- La **récurrence des séismes** sur les temps longs à partir d'**approches paléo-sismologiques** (les événements sismiques sont enregistrés dans les sédiments marins déstabilisés lors de l'accélération du sol) doit être évaluée : des travaux récents montrent qu'il existerait des supercycles avec des périodes de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'années, au cours desquelles la sismicité est élevée (libération d'énergie), suivies de périodes de quiescence (accumulation d'énergie).
- Il est également indispensable d'**analyser et de caractériser les grandes failles actives** (en particulier en mer : mer de Marmara, marges algérienne et ligure, zones de subduction hellénique et calabro-sicilienne...) en termes de géométrie, couplage, etc., afin d'intégrer ces informations dans les prévisions statistiques d'occurrence des grands séismes.
- Etude de la **déformation des marges** : les marges passives (interface croûte continentale-croûte océanique) permettent de retracer l'histoire de l'ouverture océanique. Formées en extension, elles peuvent subir une inversion structurale lorsqu'elles sont reprises en compression. Les modalités de cette inversion sont encore mal connues : la déformation va-t-elle ré-emprunter les failles héritées du *rifting*, va-t-elle plutôt se concentrer aux limites des grands domaines crustaux telles que la limite continent-océan, ou va-t-elle recréer son propre canevas de déformation ? Constituent-elles une zone de faiblesse qui va concentrer la déformation ?

B. Etudier le fonctionnement hydrométéorologique du bassin méditerranéen

En Méditerranée, les tempêtes génèrent à la fois de l'érosion du littoral et des inondations des plaines côtières. L'influence des marées étant faible sur une grande partie du bassin méditerranéen, ce sont les phénomènes de surcote marine qui prédominent. La dépression atmosphérique génère une élévation temporaire du niveau de la mer (effet de baromètre inverse), à laquelle s'ajoute une surcote liée au vent et aux vagues, souvent accentuée par une pente relativement forte de l'avant côte : à ce jour, les modélisations de la surcote restent difficiles en Méditerranée, du fait de l'existence de circulations générales (par exemple le

courant liguro-provençal) qui influencent significativement le niveau de la mer, mais ne sont pas prises en compte dans les modélisations de la surcote.

Les crues « éclair » typiques en Méditerranée, parfois concomitantes des tempêtes marines, ainsi que la subsidence au niveau des grands deltas (du Nil, du Rhône, etc.), jouent également un rôle non-négligeable sur le niveau marin relatif et l'inondation des plaines côtières, notamment au niveau des embouchures et des deltas, mais aussi sur les transferts sédimentaires vers les bassins profonds.

D'après le rapport 2014 du GIEC, le changement climatique aura très probablement pour conséquences une élévation du niveau de la mer (qui pourrait atteindre environ 1 mètre en 2100), une modification du régime hydrologique et des phénomènes de crue et une éventuelle modification du régime des tempêtes, même si celle-ci reste très incertaine à l'heure actuelle. Ces modifications probables des forçages ont des répercussions sur les aléas côtiers (voir partie 2).

Afin de mieux comprendre les phénomènes hydrométéorologiques et leurs conséquences en termes de submersion côtière, plusieurs voies de recherche sont à approfondir :

- Evaluer la **réurrence des submersions** dans le temps à partir de l'étude d'archives sédimentaires lagunaires (des travaux récents montrent qu'il existe des périodes d'augmentation des tempêtes et crues extrêmes au cours des derniers millénaires en lien avec les changements climatiques passés).
- Améliorer la compréhension de l'**interaction entre les différents aléas** (érosion/submersion : brèches, ouvertures de graus, transport éolien... ou crues fluviales/submersions marines).

C. Comprendre l'hydrodynamique du bassin et les processus de transferts sédimentaires

Du point de vue hydrodynamique, deux processus caractérisent notamment la Méditerranée : des transferts horizontaux rapides (interface terre-mer et circulation thermohaline) et des transferts verticaux (formation d'eaux profondes, plongées et *cascading* d'eaux froides, courants hyperpycniaux) qui régulent le renouvellement des eaux méditerranéennes. Ces transferts sont soumis à une variabilité forte à toutes les échelles temporelles : leur intensité, leur récurrence et leur impact sont très dépendants des forçages météo-climatiques.

La physiographie terre-mer contrastée des régions méditerranéennes est caractérisée par l'alternance de régions côtières basses ou montagneuses, de plates-formes sous-marines larges ou étroites, voire absentes. Dans ce dernier cas, le domaine émergé est alors directement connecté à la pente sous-marine et au bassin profond ainsi qu'en attestent les nombreux et parfois très vastes éventails sédimentaires profonds.

Les flux de matières, qu'ils soient terre-mer (fortement impactés par les activités humaines), côtier-large (transferts sédimentaires vers les têtes de canyon, puis vers la pente et le bassin profonds), ou côtier-côtier (transport latéral le long de la côte) sont ainsi fortement dépendants des forçages hydrométéorologiques et physiographiques. L'activité sismique peut aussi générer des instabilités sédimentaires et des transferts en masse significatifs pente – bassin et des courants de turbidité plus ou moins importants.

Sur les côtes basses, les flux de matière jouent un rôle important sur l'évolution du littoral et restent très mal décrits du fait des difficultés à obtenir des mesures *in situ* à différentes échelles spatio-temporelles.

Les flux éoliens et la construction ou le déplacement des dunes, qui présentent une protection contre les submersions mais sont impactées par les actions anthropiques, doivent également être considérés.

L'érosion des côtes basses méditerranéennes est souvent associée à des épisodes de tempête, mais les tendances d'évolution à long terme restent fortement dépendantes des flux sédimentaires, qui sont eux-mêmes fortement perturbés par les activités humaines : aménagements des rivières qui piègent les sédiments en amont, ouvrages de « défense contre la mer » qui interrompent les transits sédimentaires longitudinaux et transversaux. Les méthodes de défense douces, mises en place plus récemment, permettent quelquefois de restaurer *pro parte* ces échanges, mais ne sont pas pérennes.

Ces mécanismes structurent les fonds côtiers en unités sédimentaires caractéristiques des mers microtidales : cordon littoral, prodeltas, vases circo-littorales, vases bathyales. Ces unités sont la résultante du cumul des actions d'alimentation, de transport, de sédimentation et d'érosion. Elles sont des indicateurs des fonctions sources ou puits du système ; elles peuvent servir de cible pour suivre et quantifier les impacts environnementaux ; elles doivent servir de base préalable aux stations de suivis à court et long terme (voir partie 5 du présent rapport : « Suivre les évolutions et promouvoir les capacités d'analyse prospective et les partenariats »).

On signalera le rôle particulier des prodeltas, communs en zone infralittorale et dans les lagunes, aires de stockage sédimentaire, de concentration du carbone et des produits anthropiques dérivés des bassins versants, systèmes de résilience, auxquels sont inféodées des communautés benthiques et pélagiques spécifiques (qui sont bien identifiées dans certains domaines côtiers du nord de la Méditerranée et les zones deltaïques, y compris du delta du Nil).

Afin de mieux caractériser les processus hydrodynamiques et sédimentaires en Méditerranée, il est nécessaire de développer l'observation, l'analyse et la modélisation des phénomènes suivants :

- Suivre le **transport longitudinal et latéral des matériaux non-cohésifs** (notamment en utilisant des traceurs naturels et artificiels ou isotopiques et des mouillages instrumentés) et modéliser le transport sédimentaire à différentes échelles spatiales ; quantifier les flux d'échanges d'eau et de matière au cours des événements extrêmes météo-hydrologiques et les stocks sédimentaires littoraux.
- Modéliser la **génération des vagues** dans le contexte méditerranéen, c'est-à-dire en *fetch* limité et avec de fortes variations spatio-temporelles du forçage vent (instationnarité, gradients horizontaux, intensité, direction) ; la propagation et la transformation (déferlement, dissipation, réflexion, transferts harmoniques) de la houle depuis le large vers la zone littorale, en tenant compte de la grande variabilité bathymétrique et de la nature des fonds, en intégrant notamment le rôle des herbiers sous-marins.
- Observer et comprendre les **interactions hydrodynamiques** entre les niveaux, les vagues et les courants dans la zone littorale, en incluant la dynamique de la nappe de plage/aquifère côtier ; observer les réponses morphologiques et leurs rétroactions sur l'hydrodynamique.

Encadré 1 : Suivre les modifications des dynamiques physiques par les activités humaines

Les activités humaines peuvent être sources de perturbations physiques des milieux et des habitats côtiers et marins. L'artificialisation du littoral, au titre de la « défense contre la mer » ou de l'aménagement du territoire, modifie le transit sédimentaire *cross-shore* et *long-shore*, ainsi que la dynamique des courants littoraux. La modification sédimentaire (érosion ou sédimentation) peut en second lieu provoquer une modification des biocénoses (disparition par colmatage sous un ouvrage et/ou remplacement). La défense contre la mer s'est faite en « dur » au cours du 20^{ème} siècle, puis par des méthodes dites « douces » dans les dernières décennies (rechargement de plage, géotextiles).

La gestion des sédiments portuaires, pour leur aménagement ou leur entretien, par une activité ponctuelle ou périodique de dragage dans les ports et les chenaux de navigation, peut engendrer des modifications de la nature du fond et une remise en suspension des particules fines, modifiant temporairement les biocénoses. L'immersion en mer des sédiments dragués (clapage), est assez peu importante en Méditerranée. Néanmoins, selon qu'elle se situe dans un contexte plus ou moins dynamique, elle peut provoquer une modification de la turbidité dans la colonne d'eau et une sédimentation plus ou moins pérenne qui peuvent aboutir *in fine* à une modification de l'écosystème benthique. Les sédiments d'un certain nombre de ports sont chargés en contaminants (métaux lourds, hydrocarbures aromatiques polycycliques – HAP) dont le rejet en milieu marin peut entraîner une contamination de l'eau, du biote ou du sédiment.

Les plateformes continentales sont caractérisées principalement par leur couverture de sédiments meubles qui contient souvent des substances utiles : sables et graviers siliceux et calcaires, algues calcaires, sables minéralisés. En Méditerranée, l'activité minière d'exploitation des granulats conduite par faible profondeur d'eau est encore peu développée, mais la demande en matériaux de ce type ne peut que croître, notamment dans les pays du sud. L'extraction de granulats engendre une modification de la topographie et, le cas échéant, de la nature du fond, avec éventuellement une modification temporaire de la turbidité. Le procédé d'exploitation peut impliquer le rejet des sédiments fins, sur le lieu d'exploitation ou sur le trajet du navire.

Les mouillages d'attente à proximité des ports (notés sur les cartes de navigation du Service hydrographique et océanographique de la marine - SHOM) et les mouillages forains, soumis ou non à autorisation d'occupation, exercent sur le fond une pression ponctuelle qui peut provoquer une modification sédimentaire et de la turbidité. Les zones de mouillages se situent dans des zones abritées, également habitats privilégiés, particulièrement en Méditerranée, du fait de la présence des herbiers (essentiellement les posidonies). Ils exercent alors une pression directe sur l'habitat.

La pêche commerciale par chalutage au fond peut engendrer, selon l'outil, la période de chalutage et la nature du fond, l'abrasion d'un sillon plus ou moins pérenne. Elle affecte aussi directement l'habitat benthique par prélèvement et/ou arrachage.

Le transport maritime ou les travaux d'aménagement côtier provoquent des bruits, plus ou moins diffus et permanents. L'activité urbaine génère également un bruit d'ampleur variable ainsi que des pollutions lumineuses. Cette perturbation sonore (suivie dans le cadre de la DCSMM), mais aussi lumineuse, a vraisemblablement des impacts sur la faune marine, notamment sur les mammifères, les poissons, les oiseaux, les tortues... A ce jour, l'ampleur de cette perturbation, la nature des impacts et leurs processus sont assez mal connus.

Outre une amélioration de la collecte des données d'activités, il est nécessaire d'évaluer leurs modalités d'exercice en termes d'intensité et de zone d'influence et de disposer de données de contexte, sur l'état des écosystèmes et de la biodiversité et dans le domaine physique (hydrodynamique, nature des fonds, bathymétrie).

II. Explorer et analyser la structuration de la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes

La mer Méditerranée est identifiée comme l'un des « *hot spots* » de la biodiversité marine, abritant de très nombreuses espèces, dont un fort pourcentage d'endémiques. Lagunes littorales, marais maritimes, estuaires, côtes rocheuses et sableuses, herbiers, coralligènes, fonds meubles et rocheux, canyons, plateaux, montagnes sous-marines, couche mésopélagique, sont autant d'habitats remarquables qui participent au maintien de la diversité des organismes méditerranéens. Cette riche biodiversité procure aux sociétés méditerranéennes de nombreux services écosystémiques, qu'ils soient marchands ou de régulation.

Depuis quelques décennies, les pressions liées aux changements globaux s'intensifient, tant sur le plan local que global, au point que la remarquable biodiversité de la mer Méditerranée est très menacée, ainsi que le fonctionnement des écosystèmes et les biens et services qui leur sont associés. C'est au sein de la zone côtière que l'on peut observer la plus grande diversité d'habitats et que l'on retrouve les plus fortes diversités d'espèces connues. Or, comme partout ailleurs dans le monde, les habitats côtiers sont particulièrement menacés.

Encadré 2 : Fonctions et services rendus par les écosystèmes

Un système écologique fonctionne sur la base des interactions existant entre ses composantes. Généralement, une plus grande diversité de ces composantes permet au système de réaliser une plus grande diversité de fonctions par complémentarité fonctionnelle et d'assurer le maintien de ces fonctions *via* la redondance. C'est sur ces notions de redondance et de complémentarité que repose la résilience des systèmes naturels et leurs capacités à assurer des services écologiques sous environnements changeants et sous pressions anthropiques.

Lorsque l'homme est présent en tant que composante de ce système, il génère des interactions nouvelles entre les composantes initiales du système et ses propres activités. Il peut aussi générer ou supprimer des interactions selon les usages qu'il fait des composantes de ce système. A un stade plus avancé, il peut éteindre localement des espèces et donc éroder la diversité des fonctions essentielles au fonctionnement des systèmes et à leurs services.

L'UICN rappelle que le concept de biens et services écosystémiques est purement anthropocentrique : en tant qu'agent attribuant une valeur aux choses, l'homme peut traduire les structures et processus écologiques de base en entités dotées d'une certaine valeur. Selon la terminologie utilisée dans les publications relatives aux biens et services écologiques, les fonctions sont reliées à des services répartis en quatre catégories dont les services dits « supports », qui sont nécessaires pour la production de tous les autres services : approvisionnement (production de biens), régulation (contrôle des processus), culturels (services non matériels). Ces quatre types de services fournissent des bénéfices matériels et non matériels aux sociétés humaines.

Pour la mer Méditerranée, le Plan Bleu (Mangos *et al.*, 2010), à travers l'évaluation économique des bénéfices provenant de différents écosystèmes, identifie des inégalités très importantes entre les différents pays riverains de « *mare nostrum* » : 8 pays concentreraient près de 90% des bénéfices. Il est intéressant de noter que la majorité des bénéfices annuels seraient ceux issus de la fourniture d'aménités et de support récréatifs (hôtellerie, immobilier, tourisme) pour 17 milliards d'euros. La fourniture de ressources alimentaires ne représente qu'une faible partie des bénéfices (2,8 milliards d'euros).

Quand on évoque la biodiversité, celle qui s'impose à nous est celle perçue *via* le prisme du catalogue des espèces. L'inventaire taxinomique des espèces recensées en mer Méditerranée conduit à estimer une richesse d'environ 17 000 espèces, sans compter celles des procaryotes. D'autres facettes de la biodiversité méditerranéenne ont été explorées, notamment les caractéristiques phylogénétiques et fonctionnelles de certains organismes, comme les poissons, qui n'apparaissent pas systématiquement congruentes dans l'espace avec la diversité taxinomique, certaines côtes pouvant abriter de nombreuses espèces mais restreintes à quelques lignées phylogénétiques ou groupes fonctionnels. Cette non-congruence pose non seulement des questions fondamentales, mais a aussi des conséquences pratiques quant à la gestion et à la protection des différentes facettes de la biodiversité, la conservation des espaces avec les plus fortes diversités en espèces n'étant pas gage de préserver les autres facettes.

Tout autant essentielle au fonctionnement et à la résilience des systèmes écologiques, la diversité des interactions entre compartiments trophiques reste peu explorée. Les interactions entre organismes façonnent les équilibres géochimiques, trophiques, énergétiques des systèmes écologiques ; elles se sont développées à différentes échelles de temps et d'organisation du vivant, jusque dans les milieux les plus extrêmes, où les modifications de la composition des communautés d'organismes pourraient s'accélérer, au point que nombre de *taxa* et/ou groupes fonctionnels pourraient disparaître avant même d'avoir été répertoriés.

Il reste un long chemin à parcourir pour connaître et intégrer les rôles des interactions dans la compréhension des dynamiques spatio-temporelles de la biodiversité marine et du fonctionnement des écosystèmes.

Les questions de recherche qui en découlent sont les suivantes :

- Les **inventaires taxinomiques** restent encore incomplets (notamment en ce qui concerne les microorganismes, véritable « *terra incognita* ») et surtout l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle de la diversité de la plupart des compartiments biologiques sont inconnues. Ainsi, il est important de pouvoir disposer de données de référence sur les communautés de microorganismes, dont l'exploration est devenue plus accessible grâce aux techniques de séquençage massif (« *barcoding* ») pouvant déboucher sur la création d'une souchothèque méditerranéenne liée à des études de biogéographie (origine, aires de répartition, transfert des espèces...).
- **Identifier l'existence de « hot spots » congruents de diversité et d'interactions** avérées ou potentielles et caractériser les divergences ou convergences des différentes facettes de la biodiversité marine, afin de guider les choix de gestion et de protection de la biodiversité. La question des **espèces rares** et de leur rôle, au sein des communautés animales, végétales et microbiennes, se pose avec des incidences majeures quant au fonctionnement des écosystèmes et à leur priorité de conservation.
- Mieux connaître les **interactions** essentielles au maintien de la diversité des communautés, en particulier **entre microorganismes et macroorganismes**. Les études réalisées sur ce sujet sont trop souvent « macro-centrées », c'est-à-dire principalement analysées à travers les bénéfices ou les inconvénients que les macroorganismes retirent de leur relation avec les microorganismes. L'envers du décor est bien moins abordé : quels bénéfices ou inconvénients en retirent les microorganismes ? Quels mécanismes adaptatifs mettent-ils en jeu dans l'interaction avec les macroorganismes ? Les connaissances existantes ou à venir sur les rôles des interactions sont à intégrer dans l'analyse et la modélisation des effets des

changements environnementaux. Comment faire évoluer les modèles de simulation du devenir de la diversité en Méditerranée pour qu'ils prennent en compte ces interactions ?

- **Analyser et modéliser les relations entre diversité et fonctions** des principaux compartiments biologiques impliqués dans la fourniture de services écosystémiques issus des fonctions des écosystèmes marins côtiers et hauturiers, de surface et de fond. Si les liens entre fonctions et services sont évidents pour beaucoup d'entre eux, les liens entre les différentes diversités et les multiples fonctions sont bien moins connus.
- Etudier le rôle des différents groupes d'organismes participant au réseau trophique dans la **zone mésopélagique**, qui joue un rôle crucial entre la surface et les eaux profondes. Le cycle biogéochimique des éléments résulte de leur transfert entre les compartiments biologiques et non-biologiques. Les eaux superficielles fournissent les substances nutritives nécessaires à la production primaire, ensuite ces nutriments sont exportés vers les eaux profondes à travers le flux de particules organiques (et inorganiques) sous forme de neige marine.
- **Evaluer l'impact des activités humaines** (notamment la pêche) sur les têtes de canyon, sur le coralligène (2^{ème} « hot spot » de biodiversité en Méditerranée) et sur les herbiers, compte tenu de leur proximité à la bande côtière et de leur importance écologique en termes d'habitat.

Encadré 3 : Stockage du carbone et cycles biogéochimiques

Les océans agissent en tant que puits et réservoir de carbone en incorporant environ un tiers du CO₂ émis par l'activité humaine depuis le début de l'ère industrielle. La pompe biologique, dont le fonctionnement repose sur une diversité de processus, joue un rôle important dans la séquestration et le cycle global du carbone. Il est établi qu'une grande partie de la matière organique (particulaire et dissoute) exportée de la couche épipélagique vers le fond, est reminéralisée dans la couche mésopélagique (de 100 ou 200 m jusqu'à 1000 m de profondeur). Cette information repose sur l'analyse de données de pièges à sédiments mesurant les différences de flux de carbone organique particulaire à différents niveaux de la colonne d'eau. Cependant, il existe des nombreux éléments d'incertitude sur les mécanismes biologiques impliqués dans la consommation de carbone organique exporté dans cette zone et entre l'offre et la demande de carbone organique dans la zone mésopélagique.

La mise à disposition de zones mésopélagiques pouvant accueillir la vie aérobie est un service important fourni par la mer, il a été suggéré qu'à cause des changements globaux qui induisent une diminution de l'O₂ et une augmentation du CO₂, la respiration devient de plus en plus difficile pour les organismes aérobies. Une réduction de ce service va engendrer une diminution de la biodiversité affectant la composition des communautés et modifiant à terme la structure et le fonctionnement de l'écosystème mésopélagique.

En Méditerranée, la température de la zone mésopélagique ne descend pas en dessous de 13°C, les concentrations d'oxygène dissout y sont importantes (entre 160 et 200 µmol/kg) et le temps de résidence des eaux est estimé à 30 ans, ce qui rend cette mer très sensible aux pressions anthropiques qui croissent avec des changements très rapides et bien visibles (tropicalisation des écosystèmes par exemple).

Les données existantes sur la distribution et l'activité des procaryotes et du mésozooplancton dans cette zone sont relativement partielles et celles concernant les interactions trophiques sont encore plus rares.

Un effort scientifique est donc nécessaire pour étudier la structure, la diversité et le fonctionnement du réseau trophique mésopélagique (virus, procaryotes, protistes, mésozooplancton, micronecton...) afin de mieux comprendre et prévoir le fonctionnement de la pompe biologique de carbone en réponse aux changements de l'environnement mondial.

III. Identifier et délimiter les écorégions à l'échelle de la Méditerranée

L'échelle spatiale restreinte et la forte structuration géologique, climatique et météorologique à méso-échelle de la mer Méditerranée en fait un terrain d'étude particulièrement pertinent pour la définition d'écorégions, c'est-à-dire l'identification de régions homogènes, qui diffèrent des régions adjacentes, et dont les conditions environnementales et les assemblages spécifiques sont caractérisables et prédictibles.

L'écorégionalisation se base à la fois sur l'existence d'un grand nombre de données disponibles pour caractériser l'environnement et décrire la distribution d'un grand nombre d'espèces, mais aussi sur des outils de statistiques inférentielles. Il s'agit donc d'une méthode descriptive complémentaire à la connaissance fine du fonctionnement des écosystèmes (c'est-à-dire des communautés fonctionnelles qui le composent).

Un mode opératoire faisant appel à la notion d'écorégions semble bien engagé : grâce aux nombreux programmes européens passés et en cours, les écorégions sont bien identifiées dans les trois sous-bassins de la rive nord. Cette stratégie a été également proposée dès 2008 pour le chantier Méditerranée MERMEX¹ (The Mermex Group, 2011) et a abouti à la mise en place de différentes zones ateliers ou chantiers, dont la zone atelier ORME sur le golfe du Lion. La mise en réseau de ces zones ateliers permettrait la mutualisation des méthodes, des données, des modèles et des techniques pour une globalisation de l'approche au niveau de la mer régionale Méditerranée (voir partie 5). Les collaborations déjà établies dans ce contexte avec certains pays des rives sud devraient permettre d'étendre l'identification des écorégions à l'ensemble du bassin.

La définition d'écorégions offre un cadre scientifique pertinent pour la mise en œuvre de modèles de type méta-communauté ou méta-écosystème dans des environnements variés et pour la mise en place de stratégies d'observation (voir partie 5) et de gestion (voir partie 4 : « Evaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages ») des ressources marines. Par exemple, la caractérisation des unités fonctionnelles bio-sédimentaires typiques, dans chaque sous-région ou sous-système naturel périméditerranéen, peut constituer une base pour la mise en place de stratégies de gestion intégrée de zones côtières à la dimension spatiale correspondante.

¹ *Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment* – <http://mermex.pytheas.univ-amu.fr/>

IV. Développer des modèles intégrés pour comprendre le fonctionnement dynamique du bassin méditerranéen

Suite aux changements globaux, les masses d'eaux sont affectées dans leur circulation (courantologie) et les espèces qu'elles abritent dans leur physiologie (acidification), leur biologie (modifications de la phénologie), leur répartition (plus d'espèces thermophiles et/ou sténothermes) ou leur écologie (modifications des relations interspécifiques suite à l'arrivée d'espèces non-indigènes). La compréhension et la modélisation des modifications induites nécessitent le recours à une approche pluridisciplinaire et le développement de modèles globaux.

La zone méditerranéenne peut être considérée comme une zone atelier idéale pour développer et tester des modèles couplés/intégrés du système climatique régional, c'est-à-dire dans lesquels les différentes composantes du système interagissent entre elles. Parmi les composantes particulièrement importantes pour la région méditerranéenne, citons la chimie atmosphérique, les aérosols, l'atmosphère, les surfaces continentales, l'hydrologie, la biogéochimie marine, les échelons trophiques supérieurs, l'homme. En effet, la Méditerranée est le siège de nombreux phénomènes d'échelle régionale dans les différents compartiments du système (relief complexe, fort contraste terre-mer, nombreuses îles, circulation thermohaline régionale, détroits peu profonds, nombreuses rivières intermittentes de petite taille, cyclogénèse atmosphérique régionale, vents régionaux forts, précipitations intenses, sécheresse, canicule, croisement de différents types d'aérosols naturels et anthropiques, maximum d'ozone troposphérique, hyper-oligotrophie marine, sédiments, nombreuses espèces endémiques, espèces invasives, forte activité volcanique et tectonique, forte anthropisation). Ces différents phénomènes influencent d'une manière ou d'une autre l'habitabilité de la région méditerranéenne par l'homme. Leur modélisation et la compréhension de leur variabilité à toutes les échelles de temps et d'espace requiert des modèles régionaux dédiés, ce qui constitue un premier défi, et bien souvent le couplage de plusieurs de ces modèles pour aller vers des modèles régionaux intégrés du système climatique régional.

Un des défis de la recherche actuelle consiste donc à mettre au point des modèles qui, en se fondant sur les prévisions globales de réchauffement et des scénarios économiques, permettront d'en évaluer les impacts à l'échelle régionale. L'avènement d'une nouvelle ère en matière de collecte de données va aussi permettre de faire progresser de manière significative les modèles existants, en permettant notamment la collecte de données « sur mesure » (co-conception de la collecte), l'exploitation et la modélisation des données.

Au plan méthodologique, des modèles très divers sont mis en jeu pour répondre aux défis scientifiques et sociétaux à relever : modèles de circulation océanique et atmosphérique, de biogéochimie marine, de chimie atmosphérique, de ressources halieutiques, modèles liés à l'activité humaine (trafic maritime, pêche, activités touristiques balnéaires...), outils d'aide à la décision. Pour chacun de ces grands domaines de recherche, des modèles spécifiques ont déjà été développés et sont parfois exploitables scientifiquement, ou opérationnels pour des besoins sociétaux, au moins pour certaines régions de la Méditerranée. A titre d'exemple, EwE (*Ecopath with Ecotroph*²) représente actuellement l'un des modèles les plus aboutis en termes de fonctionnement des chaînes trophiques.

² <http://www.ecopath.org/>

Ainsi, à partir de ces modèles spécifiques et de leur couplage, des modèles plus complets et plus globaux vont pouvoir être développés, couplant les aspects physiques, océanographiques, biogéochimiques, biologiques et écosystémiques, à différentes échelles. Toutefois, chaque type de modèle prend généralement des formes différentes suivant l'échelle considérée : plus la résolution est élevée, plus on cherche à décrire finement les phénomènes, alors que certains effets sont agrégés et/ou paramétrés à plus basse résolution. Les questions d'interactions entre modèles hétérogènes et entre échelles sont donc cruciales pour permettre *in fine* une modélisation intégrée.

Par ailleurs, la Méditerranée est très fortement marquée par un gradient côte-large, avec des eaux côtières généralement eutrophes, ou du moins soumises à des rejets telluriques anthropiques et des eaux du large oligotrophes, moins impactées par les activités humaines littorales. Les modèles écologiques sont le plus souvent développés en zone côtière, alors que l'essentiel des modèles développés par la communauté océan-atmosphère le sont au large.

Les enjeux pour les modèles peuvent être ainsi regroupés en deux grandes catégories : (i) développer des modèles prenant en compte les dimensions physiques, climatiques, biogéochimiques, biologiques et écologiques et leurs multiples interactions et (ii) développer des modèles intégrant la zone littorale et les processus de transfert, tant au sein de la zone côtière que selon un gradient côte-large.

A. Améliorer les modèles physiques

Concernant l'**atmosphère, les rivières et la chimie atmosphérique**, les verrous qui relèvent de l'interaction de ces composantes avec la mer Méditerranée sont les suivants :

- Modélisation de l'impact des aérosols sur les flux radiatifs (solaire et infrarouge, prise en compte de la couleur de l'eau dans l'atténuation du flux solaire) et de leur dépôt comme source de nutriments pour la biogéochimie marine ; des flux turbulents (latents et sensibles) extrêmes en mer par vents forts (ex : mistral).
- Modélisation des eaux souterraines se déversant en mer ; de la quantité d'eau déversée par l'ensemble des fleuves se jetant en Méditerranée et de leur variabilité temporelle dans le bilan hydrique de la Méditerranée ; des effets anthropiques sur les débits des fleuves (irrigation, barrage) avec en particulier le défi de la modélisation du Nil.
- Modélisation de l'interaction entre la température de la mer, la couche limite atmosphérique marine et le nuage sur mer ; du cycle diurne de l'interface air-mer ; prise en compte des vagues et de la marée dans la modélisation des échanges air-mer.

Concernant l'**océan physique**, les défis à relever sont les suivants :

- Développement de la modélisation sub-meso-échelle et non-hydrostatique sur des régions et des processus cibles ; modélisation représentant explicitement la meso-échelle méditerranéenne (1 km de résolution spatiale) pour des échelles de temps longues (décennie et au-delà 20^{ème} siècle, scénario du 21^{ème} siècle).
- Modélisation des processus clés de la dynamique océanique : courant de bord, détroit, tourbillons, formation de masse d'eau par convection en pleine mer ou par *cascading*, champs de vitesse verticale, mélange vertical, dynamique haute fréquence de la couche de mélange, *overflow*, canicules océaniques, sècheresses océaniques.

- Compréhension par la modélisation des événements océaniques passés (*Eastern Mediterranean Transient*, *Western Mediterranean Transition*, *BiOS : Bimodal Oscillation* du bassin est, tendance des eaux de fond, impact océanique de la mise en place des barrages et de l'irrigation).
- Interactions Atlantique-Méditerranée, mer Noire-Méditerranée, mer Rouge-Méditerranée.
- Exploration de la possibilité des nouvelles grilles de calcul pour la modélisation du bassin méditerranéen ou des zones clés (zones côtières, détroits...) : grille non-structurée, grille zoomée, nouvelles coordonnées verticales, adaptation aux machines de calcul massivement parallèle.
- Etablissement de jeux de données de référence pour initialiser et évaluer les modèles.

B. Améliorer les modèles biogéochimiques

Les modèles d'écosystèmes planctoniques (ou biogéochimiques) les plus anciens ont connu des évolutions importantes dans les dernières années avec l'avènement de la génération multi-nutriments, multi-groupes fonctionnels et également le passage à une revendication de réalisme. En Méditerranée, divers programmes européens (par exemple SESAME³, PERSEUS⁴) ont permis la montée en puissance de quelques groupes modélisant le bassin méditerranéen ou des sous-bassins (Lazzari *et al.*, 2013, pour l'étude des impacts climatiques et anthropiques sur le bassin ; Macias *et al.*, 2014, pour établir des bilans de production primaire au niveau du bassin ; Auger *et al.*, 2014, pour l'impact de la convection sur la structure des communautés planctoniques dans le bassin nord-occidental).

Très récemment, l'urgence des défis liés au climat ou à la surpêche ont poussé les décideurs et la communauté scientifique à aller au-delà des modèles « thématiques » décrits plus haut vers les modèles « *End-To-End* » couplant bas et hauts niveaux trophiques. Même si cette approche est nécessaire, il semble important de rappeler que les modèles biogéochimiques qui traitent le premier maillon de la chaîne alimentaire doivent encore beaucoup gagner en réalisme. De ce point de vue, l'horizon s'éclaircit grâce à la révolution des capteurs en cours et certainement également grâce à la puissance de calcul qui permet d'envisager de travailler à haute résolution (au moins la méso-échelle) et de réaliser les études de sensibilité nécessaires à la calibration des modèles.

Les modèles biogéochimiques de type Eco3M ou PISCES, couplés à des modèles physiques, permettent un calcul des flux de matière dans les premiers échelons des écosystèmes marins côtiers et hauturiers. Ils doivent par ailleurs répondre à des questions de plus en plus complexes sur le fonctionnement du système, comme par exemple l'estimation des descripteurs de la bonne santé environnementale des eaux marines ou l'impact du changement climatique sur le fonctionnement de l'écosystème et notamment la séquestration du carbone atmosphérique. Cependant, la plupart des modèles biogéochimiques ne fournissent pas d'information sur un grand nombre de descripteurs comme la biodiversité, les espèces invasives, les « *Harmful Algal Blooms* » – HAB, ce qui parfois complique le dialogue avec les socioéconomistes et décideurs. Il faut donc développer des approches pour connecter la masse des informations fournies par les modèles biogéochimiques avec les descripteurs énumérés par l'Europe. Ce genre de connexions

³ *Southern European seas: Assessing and modelling ecosystem changes*

⁴ *Policy-oriented marine Environmental Research for the Southern European Seas* - <http://www.perseus-net.eu>

a été réalisé pour certains cas d'étude. Par exemple Ruiz *et al.* (2012) ont proposé une approche basée sur le développement de modèles de dynamique de populations de méduses paramétrés par des expériences en laboratoire forcés par des variables environnementales pouvant provenir d'un modèle couplé physique-biogéochimique.

Les modèles biogéochimiques doivent aussi permettre de formuler des recommandations quant à la gestion des zones marines. Le plus souvent, les recommandations qui peuvent être émises concernent la quantité de nutriments qui peut être déchargée par les rivières. La prédiction d'un seuil limite de décharge de nitrate, de phosphate ou de matière organique afin d'obtenir un état acceptable des eaux (encore à définir !) est un exercice périlleux qui demande au modèle une certaine capacité à prédire des niveaux seuils, ce qui nécessite des tests spécifiques de validation (par exemple, l'hypoxie des eaux en-dessous de 2 mg d'oxygène par litre). Avec l'avènement de l'océanographie opérationnelle, il est aussi intéressant de savoir comment l'assimilation de données peut remédier aux déficiences des modèles et identifier les besoins en données.

Le plateau continental et la zone côtière ont fait l'objet de nombreux efforts de modélisation. Dans ces régions, le couplage entre l'écosystème pélagique et benthique est fondamental. Cependant, dans la plupart des modèles existants, ce couplage est fortement simplifié voire ignoré. Des efforts doivent donc être poursuivis pour améliorer la représentation de l'écosystème benthique tout en gardant des temps de calculs raisonnables pour des simulations en 3D sur le long terme. La plupart du temps, l'impact du benthos sur ces échanges est paramétré de façon grossière, aussi est-il important de revoir la représentation des caractéristiques du benthos dans la formulation des échanges entre le sédiment et la colonne d'eau.

Différents niveaux de validation doivent être abordés en accord avec les objectifs de la modélisation. Ainsi, lors de la validation d'un modèle à grande échelle (par exemple, à l'échelle du bassin méditerranéen simulant plusieurs décennies, modélisation orientée « climat ») dont l'objectif est davantage de représenter des grandes tendances que de donner une information précise en un point donné, on comparera des statistiques estimées à partir des résultats du modèle et des observations. Par contre, dans le cas d'un modèle régional à plus haute résolution, une validation plus poussée pourra être menée, soit en adoptant une procédure de validation des grandeurs moyennes (modèle et observation) dans des sous-régions considérées comme cohérentes (par exemple identifiées par une analyse appropriée comme une analyse SOM – *Self Organizing Map*) ou aller vers une comparaison point par point du modèle et des observations en quantifiant l'erreur grâce à une série de statistiques d'erreurs (*bias, root mean square error, correlation*) pour lesquelles des seuils de qualité ont été définis et qui peuvent être synthétisées sur un diagramme de Taylor.

Pour les approches régionales, les stations fixes d'observation ont l'avantage de fournir des séries temporelles haute fréquence pour un large jeu de variables et, lorsqu'elles sont collectées sur plusieurs décennies, ces séries permettent d'obtenir un signal à long terme pour analyser la variabilité interannuelle voire inter-décennale. Cependant, la comparaison des résultats d'un modèle 3D avec des données ponctuelles dans l'espace est souvent très difficile. Une option est de recourir à une version 1D du modèle simulant la dynamique à l'endroit où les données sont collectées.

Ces exercices de validation devraient aboutir à des conclusions sur le type de variables biogéochimiques qui sont bien représentées (nutriments, groupes trophiques, boucle

microbienne) et celles qui sont plus problématiques. On pourrait alors identifier plus clairement les compétences des modèles biogéochimiques actuels en intégrant et comparant ces différents exercices de validation.

C. Améliorer les modèles de chaîne trophique supérieure

Les modèles de hauts niveaux trophiques se réfèrent aux mézozoaires nectoniques ou benthiques qui vivent au-delà de l'année. La durabilité des ressources marines exploitées et la conservation de la biodiversité sont deux objectifs de l'utilisation de ces modèles en Méditerranée. Le modèle ECOPATH⁵ a ainsi été largement utilisé (par exemple Banaru *et al.*, 2013, pour la chaîne alimentaire du Golfe du Lion et l'impact de la pêche). Si ce type de modèle est bien adapté à la description des flux d'énergie (carbone par exemple) à travers la chaîne alimentaire en condition stationnaire, sa capacité à représenter des ruptures liées à l'évolution des conditions environnementales ou à l'apparition/extinction d'espèces est plus douteuse. Par contre, les modèles de distribution d'espèces sont des outils majeurs pour la compréhension des effets des changements environnementaux sur la répartition géographique de ces espèces. Il s'agit généralement d'estimer la réponse des espèces aux paramètres physiques, biogéochimiques et biologiques caractérisant leur habitat.

Les connaissances existantes ou à venir sur les rôles des interactions entre organismes vivants et sur la connectivité des populations à différents stades de leur vie sont à intégrer dans l'analyse et la modélisation des effets des changements environnementaux :

- Comment faire évoluer les modèles de simulation du devenir de la diversité en Méditerranée pour qu'ils prennent en compte les **interactions entre organismes** ?
- Comment modéliser les modifications fonctionnelles avec l'**arrivée d'espèces herbivores** en Méditerranée occidentale (par exemple les poissons *Siganidae*), ou avec la **raréfaction des prédateurs** de haut niveau trophique (surpêche) ?
- Développer des **modèles de connectivité** (les modèles de génétique des populations peuvent être inclus) : dispersion des larves et/ou des adultes le long de la côte, ou entre bassins.

D. Vers une nouvelle génération de modèles intégrés du « système terre » régional en Méditerranée

Les premiers modèles couplés régionaux (océan-atmosphère puis océan-atmosphère-fleuves) ont été développés pour la Méditerranée à la fin des années 2000, d'abord en France puis en Italie (Somot *et al.*, 2008; Artale *et al.*, 2010 ; Dubois *et al.*, 2012). Aujourd'hui, une douzaine de modèles régionaux couplés océan-atmosphère existent pour l'étude de la région méditerranéenne et sont coordonnés dans l'initiative Med-CORDEX⁶. En France, c'est le projet ANR REMEMBER⁷ qui coordonne les trois groupes de modélisation français impliqués dans Med-CORDEX (deux à l'Institut Pierre Simon Laplace, un au sein du laboratoire mixte CNRS- Météo France CNRM-GAME). Même si de nombreux progrès restent à accomplir pour que ces modèles atteignent leur maturité (les GCM – *Global Circulation Models* – utilisés dans CMIP – *Coupled*

⁵ <http://www.ecopath.org/>

⁶ <http://www.medcordex.eu/>

⁷ Compréhension et modélisation du système climatique régional couplé pour la prévention des risques hydrométéorologiques en Méditerranée dans un contexte de changement global

model intercomparison project – ont 30 ans d'avance), ils ont le mérite de démontrer la faisabilité de la modélisation couplée régionale et l'intérêt scientifique de cette nouvelle génération d'outils.

D'autres couplages qui restent à développer et à tester semblent être extrêmement prometteurs pour l'étude des phénomènes régionaux méditerranéens, leur compréhension et leur prévision :

- couplage atmosphère-aérosols,
- couplage physique-biogéochimie,
- couplage biogéochimie marine-aérosols,
- couplage biogéochimie marine-chaine trophique supérieure,
- couplage biogéochimie marine-sédiments,
- couplage surface continentale-fleuves-biogéochimie marine,
- couplage homme-environnement.

En particulier, l'analyse des **couplages entre les compartiments océan et atmosphère** doit être approfondie pour permettre une meilleure compréhension de l'impact des dépôts atmosphériques sur la vie marine. La compréhension de ces couplages apportera également des éléments de réponse sur l'influence du forçage radiatif des aérosols sur la production primaire océanique. Par ailleurs, les études portant sur le **couplage « continent-océan »** en Méditerranée, avec l'appui de modèles de transport de sédiment, permettront quant à elles de quantifier les exports de matières en suspension rejetées par les fleuves en milieu littoral et de caractériser ainsi la qualité des eaux. Le devenir de ces exports dans la colonne d'eau et leur séquestration dans le fond du bassin sont importants à déterminer étant donné leur impact sur le cycle du carbone océanique. Une des attentes fortes concernant les modèles couplés physiques-biogéochimiques concerne leur capacité à séparer l'impact des différentes pressions agissant sur le système. Les approches pouvant être utilisées pour effectuer cette différentiation sont les bienvenues.

A terme, ces différents couplages devraient pouvoir mener à des modèles intégrés du système climatique régional, voire du système homme-climat régional.

Enfin, la **composante économique** pourrait être considérée. En effet, compte tenu de la forte densité urbaine des rives de la Méditerranée et de l'attrait constant des zones côtières pour les activités touristiques, l'économie générée est importante. Comment les modifications induites par le changement global affecteront ces activités économiques ?

Quel que soit le couplage mis en place, l'un des plus grands défis à relever par les modèles intégrés réside dans leur évaluation et plus spécifiquement l'évaluation de leurs interfaces. Les moyens et les stratégies de mesure adéquates restent souvent à inventer, promettant de belles interactions entre observation et modélisation.

Partie 2 : Caractériser, évaluer et prévenir les risques liés au milieu marin pour les sociétés méditerranéennes

Du fait de la physiographie de la transition terre-mer et des reliefs sous-marins, les littoraux méditerranéens ont la particularité d'être des espaces où les risques sont multiples, imbriqués et complexes. La concentration des populations et des activités sur les côtes méditerranéennes contribue à augmenter la vulnérabilité de ces espaces face aux risques. De plus, les perturbations, liées au changement climatique ou directement aux activités humaines, modifient la physique et la chimie de l'océan et la biologie des écosystèmes marins, mettant parfois en péril la pérennité des services écosystémiques rendus par la mer Méditerranée.

La relative stabilité du niveau marin depuis environ 8000 ans a permis la construction de littoraux meubles (cordons dunaires), ce qui a pu donner l'image d'une certaine stabilité à des régions pourtant évolutives. La vulnérabilité des littoraux aux phénomènes de submersion tend aujourd'hui à s'accroître du fait de deux mécanismes majeurs : (1) l'élévation du niveau marin, quelle que soit son origine : processus géodynamique de subsidence du sol *versus* élévation brutale et temporaire (dans le cas de tsunamis ou de surcote météorologique) ou plus lente et définitive (en relation avec le changement climatique) et (2) l'artificialisation toujours plus avancées des côtes, accélérant la propagation de l'inondation. Les phénomènes de submersion, d'inondation et d'érosion côtière vont ainsi s'accroître dans les décennies à venir, menaçant encore davantage les villes littorales et les îles de la Méditerranée.

Par ailleurs, cette forte anthropisation engendre à son tour des pressions sur les ressources littorales et les écosystèmes côtiers (surpêche, pollution du milieu marin, salinisation des nappes phréatiques côtières...). En particulier, les sources de pollution sont multiples (provenant des activités maritimes, côtières mais aussi terrestres) et l'état de pollution de la mer Méditerranée est particulièrement préoccupant. Le développement des activités humaines et les effets du changement climatique contribuent également à modifier la composition et la répartition des espèces dans le bassin méditerranéen, par l'introduction de nouvelles espèces, la modification des aires de répartition de certaines espèces, ou encore la prolifération d'espèces. Ces changements peuvent comporter un certain nombre de risques pour les populations et les écosystèmes.

L'ensemble de ces évolutions a des conséquences sur l'économie locale (risque de baisse des revenus du tourisme, de la pêche, en lien avec les conséquences des changements globaux), voire sur l'habitabilité de ces espaces (accroissement des populations les plus défavorisées dans les espaces à forts risques de submersion par exemple). Les densités des sociétés méditerranéennes côtières sont ainsi appelées à se modifier par des flux migratoires en lien avec les changements environnementaux, mais aussi en lien avec les différences de développement économique entre les pays riverains, voire les crises politiques engendrant des migrations massives.

I. Anticiper les risques de submersion et d'érosion des zones côtières

Le littoral méditerranéen, dans son *continuum* terre-mer, est le site de divers types d'aléas naturels, dont le moteur est géologique (sismique, sédimentologique) ou hydrométéorologique. Situé dans le domaine de convergence Afrique-Eurasie, le bassin méditerranéen est tectoniquement très actif (voir partie 1 : « Comprendre le fonctionnement intégré du 'système dynamique mer Méditerranée' ») et par conséquent fortement exposé aux aléas géologiques. Conjugués à la dynamique hydrologique du bassin (vagues, courants marins), ces aléas engendrent essentiellement des risques de submersion et d'érosion des zones côtières basses.

Tous ces événements peuvent interagir : les séismes Ligure en 1887 et de Boumerdès en 2003 ont généré un tsunami et les avalanches sous-marines consécutives à ces séismes ont été à l'origine de ruptures de câbles de télécommunication. Le tsunami de Messine de 1908 fit, avec le séisme dont il résultait, plus de 100 000 morts et compte parmi les cinq événements les plus dévastateurs de l'histoire. L'éruption et l'effondrement de Santorin a engendré un tsunami dévastateur sur tout le pourtour de la Méditerranée orientale et entraîné le déclin de la civilisation minoenne en Crète, en 1500 avant JC. Au cours du XX^e siècle, le nombre de morts officiellement recensé à la suite de séismes en Méditerranée dépasse 200 000. L'exemple du glissement de l'aéroport de Nice en 1979 illustre aussi l'impact tsunamigénique des mouvements de terrain sous-marins non co-sismiques, se déclenchant à faible profondeur d'eau et pour lesquels le temps de réaction n'est alors que de quelques minutes entre l'événement de rupture et la submersion. En fonction des zones du pourtour méditerranéen qui seraient maintenant affectées par de tels événements, le bilan – en vies humaines, en dégâts matériels et en impact économique – pourrait être très lourd du fait de l'accroissement de la population et de la concentration de l'activité économique dans la zone littorale.

Une meilleure connaissance des processus physiques en jeu avant, pendant et après la rupture sismique, ainsi que de la distribution spatio-temporelle des failles actives et des zones sédimentaires instables permettrait d'améliorer la prévision probabiliste de ces aléas et de leur conséquence en termes de tsunamis, et l'atténuation des retombées catastrophiques (pertes en vies humaines, pertes économiques...) (voir partie 1).

En plus des événements telluriques pouvant provoquer des tsunamis, les aléas hydrométéorologiques peuvent également être à l'origine de phénomènes de submersion marine, actuels et à venir (voir partie 1). Le changement climatique induira une élévation du niveau de la mer, une modification du régime hydrologique (ayant des répercussions sur les phénomènes de crues) et du régime des tempêtes. Ces modifications probables des forçages ont des répercussions sur les aléas côtiers. Sur les côtes basses de la Méditerranée où l'urbanisation gagne de plus en plus sur la mer, il résultera de l'élévation du niveau de la mer une perte progressive et permanente d'espace côtier par érosion, surtout dans les secteurs où la dynamique est contrainte par des aménagements, et des submersions temporaires liées aux surcotes de tempête qui entreront de plus en plus loin dans les terres. Par ailleurs, une plus grande fréquence des crues continentales augmentera les possibilités de concomitance des deux types d'inondations et l'exposition de la zone côtière. L'étendue des territoires exposés est ainsi appelée à fortement évoluer dans les décennies à venir.

Au-delà des inondations, ces modifications de l'aléa peuvent également entraîner une translation du biseau salé vers la terre et un déplacement de l'interface eau douce/eau salée, pouvant contaminer les captages d'eau douce. Si l'eau des aquifères côtiers n'est pas la ressource principale pour les rives nord de la Méditerranée, ce peut être un enjeu crucial dans de nombreux pays de l'est et du sud de la Méditerranée (ce problème est particulièrement préoccupant dans le delta du Nil).

Les phénomènes sédimentologiques jouent également un rôle important, bien que moins spectaculaire, sur l'évolution des zones côtières. Associés aux aléas hydrométéorologiques, ils sont à l'origine de phénomènes d'érosion, temporaire ou définitive, du littoral. Par ailleurs, les apports terrestres seront très vraisemblablement affectés par la modification du régime hydrologique continental liée au changement climatique. Les phénomènes d'altération mécanique et d'érosion des côtes rocheuses sont importants en Méditerranée (augmentation des causes météorologiques : par exemple, les précipitations intenses ; et hydrodynamiques : par exemple, les surcotes et les tempêtes), tandis que les mécanismes de régénération naturelle des plages à court ou long terme demeurent encore sous-investigués.

En plus de l'amélioration de la compréhension de l'ensemble de ces phénomènes et de leurs interactions (voir partie 1), des recherches spécifiques sont nécessaires pour améliorer la prédiction et la prévention des risques associés :

- Améliorer la **prévention contre les risques telluriques** (séismes, glissements sous-marins, tsunamis, éruptions volcaniques) en Méditerranée implique une approche intégrée à plusieurs échelles spatiales (locale, régionale et globale) et temporelles. Ceci nécessite l'acquisition de données spécifiques, sur le long terme ou lors de campagnes ponctuelles, à terre comme en mer (évaluation des transferts), avec des fréquences d'acquisition adaptées aux différentes thématiques et une acquisition en temps réel pour les systèmes d'alerte (voir point II ci-après).
- Afin de mieux identifier et gérer l'**aléa de submersion d'origine hydrométéorologique**, il faut comprendre régionalement les forçages (couplage atmosphère-mer) et les circulations des masses d'eau en Méditerranée en vue d'améliorer les modèles et d'anticiper l'occurrence des aléas hydrométéorologiques à l'échelle des écorégions (voir projet HYMEX⁸) et comprendre localement les interactions avec le modelé sous-marin qui pourra accentuer ou bien diminuer l'impact de la submersion.
- Améliorer la **modélisation des processus de surcote** nécessite également de mieux comprendre l'hydrodynamique couplée courants-vagues-niveaux en zone littorale, en tenant compte de l'ensemble des contributions (surcote barométrique, marée, vent, vagues, courants marins, précipitations et crues dans le bassin versant).
- Evaluer les **stocks sédimentaires littoraux et leurs évolutions spatio-temporelles** par les moyens géophysiques ; observer, sur le long terme, les variations des paramètres (tels que la pression de fluide, l'accélération du sol, etc.) et quantifier leur influence sur le déclenchement des instabilités sédimentaires.
- Améliorer la connaissance des processus de **propagation de l'inondation**.

⁸ Hydrological cycle in Mediterranean Experiment (<http://www.hymex.org/>)

II. Optimiser les systèmes de surveillance et d'alerte tsunami

Concernant les risques sismiques et associés, des initiatives existent au niveau multinational pour l'ensemble de la zone euro-méditerranéenne avec notamment : i) le Centre Sismologique Euro-méditerranéen (CSEM) ; ii) le Système d'Alerte aux Tsunamis pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée (SATANEM, NEAMTWS en anglais), infrastructure supervisée par la COI/UNESCO, qui fédère des centres nationaux d'alerte (à ce jour Turquie, Grèce, Portugal et France, avec le CENALT, CENTre d'ALerte aux Tsunamis qui est le centre français, piloté par le CEA); iii) les projets d'infrastructure européenne de recherche EPOS (*European Plate Observatory System*) et EMSO (*European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory*) pour les observatoires fond de mer. On citera également, pour la connaissance du domaine marin, le réseau MedGLOSS⁹ d'observation en temps quasi-réel des variations rapides du niveau de la mer (intégrable à un dispositif d'alerte aux tsunamis) mis en place par la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée (CIESM), de concert avec la COI/UNESCO ; enfin, les cartes de bathymétrie et d'imagerie des fonds méditerranéens, coproduites par l'Ifremer et la CIESM, sur la base de données multifaisceaux acquises par un consortium d'instituts de recherche d'une dizaine de pays.

Au niveau bilatéral, de nombreux programmes sont en cours pour la partie terrestre. Pour la partie marine, cependant, les programmes opérationnels d'acquisition de données, conduits en collaboration entre les pays des rives sud et nord de la Méditerranée, sont extrêmement rares. Pour le Maghreb, par exemple, on citera simplement les programmes de reconnaissance de la déformation active en mer et des instabilités sédimentaires associées au large de l'Algérie conduits par l'Institut Universitaire de la Mer, l'Ifremer et le Centre de Recherche Algérien en Astrophysique et Géophysique (CRAAG) ; ainsi que les programmes en cours pour l'étude de l'instabilité de la plateforme nord-ouest atlantique du Maroc (PROTIT et NOMADS). La dynamique engendrée par ces projets commence aujourd'hui à porter ses fruits, avec la prise de conscience par certains scientifiques de la nécessité d'une véritable politique de recherche en sciences de la mer, ciblée sur des préoccupations scientifiques nationales et s'appuyant sur des moyens à la mer adaptés.

Les enjeux concernant ce dispositif de surveillance et d'alerte sont les suivants :

- Mieux coordonner les réseaux sismologiques et géodésiques existants à terre afin de constituer un véritable **réseau d'alerte en temps réel**. En mer, des dispositifs d'alerte tsunami devraient être renforcés par des sismomètres fond de mer, au moins en partie temps réel, des marégraphes, des bouées GPS et des capteurs de pression (tsunami) au large.
- Développer les **dispositifs déployés à terre** (mesure des débits et des charges sédimentaires dans le réseau hydrographique) **et en mer** (mesure des flux dans les canyons et des paramètres **dans les colonnes sédimentaires** afin de fournir des éléments clés pour l'évaluation des transferts sédimentaires et des risques de submersion, et leur modélisation.
- Identifier les **enjeux de communication pour les systèmes d'alertes** et conduire des études visant la mise en œuvre opérationnelle de ces systèmes.

⁹ Monitoring Network System for Systematic Sea Level Measurements in the Mediterranean and Black Sea - <http://medgloss.ocean.org.il/>

III. Approfondir les connaissances des sources, flux, devenir et impact des polluants en mer Méditerranée

Les rives de la Méditerranée, en expansion démographique, sont l'enjeu d'intérêts touristiques, industriels, agricoles et aquacoles. Les activités humaines autour de cette région marine sont sources de nombreux déchets, polluants et perturbations : accumulation de déchets solides en mer et sur les rivages, contaminants chimiques, organiques et inorganiques issus des rejets continentaux, des activités marines ou d'accidents (un tiers du trafic maritime mondial transite par la Méditerranée !), pollution acoustique... Les villes côtières méditerranéennes sont de plus en plus peuplées (mégacités du Caire, d'Istanbul, d'Alger, de Marseille...), leurs rejets atmosphériques (*via* les transports, les incinérateurs) et marins (*via* les apports fluviaux, les stations d'épuration...) ou encore issus des activités touristiques et récréatives (baignade, plaisance, bateaux de croisière...) sont plus ou moins bien traités. Presque toute la partie nord est caractérisée par une signature anthropique marquée, très variable selon les saisons. La partie sud est davantage soumise à des apports naturels détritiques mais les émissions anthropiques provenant des zones urbaines y sont en forte expansion. A ce bruit de fond se superposent des événements accidentels, d'origine naturelle ou anthropique (pluies sahariennes, orages d'automne, lessivage des zones côtières lors des épisodes climatiques extrêmes, panaches d'incendies, etc.).

Les polluants affectent non seulement le milieu proche de leur point d'entrée (fleuve, zone urbaine, ports), mais ils atteignent aussi les zones hauturières par le biais de la circulation physique, des transports maritimes, des apports atmosphériques et de la concentration le long de la chaîne trophique. A cause d'une circulation très spécifique, le temps de résidence des eaux profondes méditerranéennes est très court et induit un impact pouvant être particulièrement rapide. Ces pollutions d'origines diverses contaminent ainsi l'eau et les organismes vivants. Ces différentes perturbations affectent en premier lieu l'équilibre des écosystèmes marins, pouvant atteindre des effets critiques lorsqu'elles se conjuguent entre elles et/ou s'ajoutent aux effets du changement climatique et aux autres activités anthropiques (urbanisation des côtes, altération d'habitats, etc.). Certains des composés rejetés, comme les métaux lourds, s'accumulent dans les organismes le long de la chaîne trophique, faisant peser des risques pour la santé des populations qui les consomment, l'homme se trouvant en bout de chaîne alimentaire.

Le besoin de connaissance de ces sources de pressions et des diverses perturbations qu'elles provoquent a été mis en avant au cours de la dernière décennie, lors de la mise en œuvre des directives européennes, plus particulièrement de la Directive cadre Eau (notamment dans le cas des eaux de transition, estuaires et lagunes, et côtières) et de la DCSMM ; l'objectif de ces directives étant d'atteindre ou de restaurer le « bon état » de ces eaux. C'est également l'une des préoccupations du Plan d'Action pour la Méditerranée, mis en place dans le cadre de la Convention de Barcelone. Enfin la table-ronde nationale sur la « biodiversité des mers et des océans », lors de la conférence environnementale de septembre 2013, a identifié ce besoin de connaissance dans sa feuille de route. Si l'on sait lier, de manière générique, les différentes sources connues de pressions et les perturbations qu'elles provoquent, il reste, à ce jour, de nombreuses lacunes à la fois sur les données et les processus d'impact, ainsi que sur les effets combinés ou les sources mal connues (lessivage des côtes lors des fortes pluies, relargage passif de polluants des zones sédimentaires polluées, etc.).

A. Déchets solides

Les macro-déchets constituent une catégorie de polluants qui a largement augmenté au cours de ces dernières années et que l'on retrouve jusque dans les grands fonds. En Méditerranée, l'essentiel de ces déchets proviendrait des activités touristiques (52%) et des incinérateurs (40%). Leur temps de dégradation est en général très long et se compte en plusieurs dizaines d'années. Après une longue progression en surface poussés par les courants, ils finissent par échouer sur les plages et les rochers. Certains, plus lourds, coulent et s'accumulent dans les creux de reliefs sous-marins, obstruant les écosystèmes profonds.

Ainsi, les déchets solides provoquent des impacts visuels nuisibles au tourisme, font obstacle aux activités de pêche, induisent des effets délétères sur la qualité des écosystèmes côtiers et profonds et affectent aussi de nombreuses espèces rares, emblématiques et protégées, telles que les tortues marines ou les petits cétacés. Le coût de leur enlèvement devient si important que de nombreux pays ne peuvent s'en débarrasser par manque de moyens financiers et techniques.

En ce qui concerne les déchets solides, la directive Déchets et la DCSMM imposent de les répertorier (littoraux, sur le fond ou flottants) et de les qualifier (macro ou micro-déchets). Si le constat de l'importance de ces déchets est en cours, il n'en reste pas moins à identifier précisément leurs sources, quantités et périodes majeures de rejets, leurs qualités physiques et chimiques, leurs routes de progression en fonction de l'hydrodynamique du milieu, leurs sites d'accumulation benthique et côtiers.

Il conviendra d'identifier les plus urgents à traiter en fonction de leurs origines et de leurs impacts, économiques notamment. De cette analyse et compte tenu des moyens de détection et de traitement, découleront les moyens prioritaires de lutte, à la fois préventive mais aussi de traitement direct, voire de recyclage. Ceci doit se traiter par une approche globale (avec des instruments juridiques et économiques adaptés) et à la base plutôt qu'en mer.

B. Contaminants chimiques « anciens »

Les polluants « anciens » regroupent des polluants organiques persistants et de forte bioamplification dans l'écosystème (polychlorobiphényles – PCB), des polluants très ubiquistes tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques – HAP, introduits par de nombreuses sources, des éléments métalliques ou semi-métalloïdes (mercure), des radionucléides... De nombreuses publications et données ont été accumulées sur ces contaminants, mais des modifications de leur apport et comportement sont à attendre dans le contexte du changement global. De plus, l'augmentation de la population, notamment dans les mégacités, implique des besoins accrus en eaux et en énergie, faisant apparaître de nouvelles sources (centrales nucléaires, usines de dessalement...). Le recours croissant au dessalement de l'eau de mer en Méditerranée s'accompagne non seulement d'un enrichissement du milieu en saumures, qui doit être pris en compte pour son impact sur les écosystèmes côtiers en considérant la circulation océanique, mais aussi de l'émission de produits chimiques potentiellement toxiques, tels que le métabisulphite de sodium (Portillo *et al.*, 2014).

Il est donc indispensable, dans le cadre d'une gestion durable de l'environnement, de mieux comprendre la magnitude et la variabilité temporelle des apports de contaminants chimiques, à diverses échelles de temps (événement, saison, interannuel, décennal). Par ailleurs, encore trop peu de travaux ont été menés sur le couplage entre le cycle de ces polluants et ceux des éléments nutritifs (carbone, phosphore, azote) – qui joue un rôle important dans les processus de bioaccumulation et de bioamplification – afin d'améliorer l'estimation des risques pour les consommateurs de produits de la mer. La contamination de la chaîne trophique est une question incontournable en Méditerranée car les processus mis en jeu conduisent à des concentrations extrêmement élevées, notamment en mercure et en PCB, dans des prédateurs supérieurs consommés par l'homme.

La mer Méditerranée est aussi riche de ressources minérales (notamment le pétrole et le gaz) dont l'exploitation, qui se développe en Méditerranée orientale, présente tous les risques de pollution par hydrocarbure et notamment par le méthane, avec un impact potentiel fort sur les écosystèmes profonds (d'autant plus qu'il s'agit d'un bassin quasiment fermé). Au-delà des études d'impact qui seront conduites de manière conventionnelle, il conviendra de mettre en place des systèmes d'observation et de mesures de séries temporelles pluridisciplinaires de l'état du milieu à l'échelle locale et régionale.

C. Contaminants chimiques « émergents »

Le développement de nouveaux procédés industriels basés sur de nouvelles ressources (par exemple les terres rares ou les éléments métalliques du groupe du platine, les nanoparticules) se traduit par l'évolution rapide de flux de « nouveaux » contaminants qui, jusqu'à présent, ne posaient pas de problème environnemental particulier, ou n'avaient jusqu'ici pas alarmé les autorités en charge du suivi environnemental ou de la santé.

D'autres substances, rarement listées dans les textes réglementaires, seront plus particulièrement prises en compte du fait de leur caractère émergent et de leur rémanence dans le milieu marin (produits vétérinaires et pharmaceutiques, parfums et cosmétiques, herbicides, perturbateurs endocriniens). La grande majorité des mesures des substances chimiques émergentes a été effectuée dans les rejets de stations d'épurations et dans les eaux de surface. Trop peu d'informations existent encore concernant la concentration de ces composés dans le milieu marin, leur comportement et leur devenir dans les différents compartiments (partition en phase dissoute et particulaire, spéciation, etc.). Ces polluants émergents sont nombreux mais beaucoup d'entre eux sont en quantités infimes, très difficiles à mesurer. Des méthodologies sont donc à développer pour faciliter et multiplier ces analyses.

Dans le cadre d'une gestion durable de l'environnement méditerranéen, il faut donc mettre en place des stratégies de mesures et des séries temporelles de référence pour les contaminants émergents, être capable de modéliser leurs flux et leurs dynamiques, afin de prédire leur comportement à l'échelle globale et leurs impacts sur les écosystèmes.

D. Apports continentaux de polluants chimiques lors des épisodes de crue en Méditerranée

Les travaux d'observation (par exemple : Wawrik *et al.*, 2004 ; Pujó-Pay *et al.*, 2006) ou de modélisation (par exemple, Lenhart *et al.*, 1997) de l'impact en mer des apports continentaux ont jusqu'à présent principalement concerné les apports par les fleuves majeurs et le plus souvent en régime normal. Or, de nombreux fleuves du pourtour méditerranéen présentent un régime typique avec des débits moyens faibles, ponctués par des crues dites « éclair », lors d'événements météorologiques convectifs brefs mais intenses et durant lesquels le débit est

souvent multiplié par dix (Estrela *et al.*, 2001). Dans ce cadre, les fleuves intermittents représentent un paradigme de ce régime typique dont pourtant seule l'hydrologie est pour le moment bien décrite (UNEP/MAP/MED POL, 2003). Par ailleurs, la région méditerranéenne est caractérisée par des événements climatiques extrêmes (orages violents, etc.) entraînant un lessivage important des zones côtières. L'urbanisation et le développement des zones bétonnées ne fait qu'accroître l'importance de ces apports.

Les apports continentaux de polluants chimiques, organiques ou encore de sels nutritifs, lors des crues « éclair » et des phénomènes de lessivage, sont encore trop rarement décrits (Tournoud *et al.*, 2006) et leur impact en mer souvent négligé. Par ailleurs, ces apports brutaux se caractérisent par leur forte charge particulaire (UNEP/MAP/MED POL, 2003), support de nombreux contaminants. A titre d'exemple, le cuivre, largement utilisé comme fongicide sur les bassins versants viticoles, peut s'avérer directement toxique pour la flore et la faune marine à forte dose (Flemming et Trevors, 1989), mais également à plus faible dose être intégré dans le réseau trophique marin et s'y accumuler.

Les changements climatiques entraîneront, entre autres, une augmentation du niveau de la mer et de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes (crues, orages violents et tempêtes) dont l'effet sur le transfert de polluants (cours d'eau, lessivage, etc.) et sur leur devenir dans le domaine côtier, doit aujourd'hui être mieux caractérisé. Ce type de travaux, initié sur un fleuve côtier intermittent des Pyrénées Orientales (la Baillaury) dans le cadre du programme CRUMED¹⁰, devrait s'étendre à d'autres fleuves du pourtour méditerranéen.

E. Impacts de l'activité aquacole sur le milieu environnant

L'aquaculture et la conchyliculture vont être amenées à se développer considérablement sur le pourtour méditerranéen (voir partie 3 du rapport : « appuyer le développement d'activités durables en Méditerranée »). Ces activités provoquent, dans le périmètre exploité, la production de matière organique en suspension, qui, selon le contexte hydrodynamique, se redépose au droit de l'exploitation et à sa périphérie, provoquant localement une augmentation de la sédimentation et de la turbidité, laquelle peut impacter la biocénose et modifier la teneur en matière organique de l'eau et du sédiment. Cet apport massif de matière organique sur de petites surfaces peut conduire dans certains cas à une hypoxie (particulièrement en périodes estivales lorsque les températures sont élevées) et à la mort des poissons. Les conséquences d'un tel apport de matière organique sur la structure des communautés microbiennes à proximité des zones d'élevage ne sont pas connues. Ce phénomène impacte par ailleurs les grands cycles biogéochimiques, en favorisant très certainement des métabolismes bactériens micro-aérobies, voire anaérobies.

La façon dont la matière organique disponible dans ces parcs d'élevage (nourriture excédentaire, fèces de poissons) modifie le fonctionnement microbien des cycles du carbone, du soufre et de l'azote en termes de processus oxydo-réductifs, dans des conditions météorologiques données, doit donc être étudiée. Par ailleurs, des marqueurs biologiques directement associés à ces zones d'élevage doivent être identifiés, afin d'en limiter la pratique d'un point de vue géographique. Dans le cadre de ces activités aquacoles, se pose également le problème de l'utilisation importante des antibiotiques, et de ses conséquences sur la dégradation microbienne de la matière organique dans la colonne d'eau et les sédiments marins.

¹⁰ Impacts des crues éclair méditerranéennes sur la zone littorale, usages viticoles et touristiques, 2008-2010, ECCO

F. Devenir des contaminants en mer

Certains polluants organiques comme les hydrocarbures ont fait l'objet de nombreuses études et il a été démontré qu'ils étaient facilement accessibles aux micro-organismes par des voies aérobies et anaérobies. D'autres polluants sont réputés comme étant difficilement biodégradables en anaérobiose, comme les organochlorés, favorisant ainsi leur accumulation dans les sédiments. Le devenir d'autres contaminants comme les antibiotiques, les herbicides, des fongicides, etc., dans l'environnement marin est encore très mal connu, tout comme leur impact environnemental et sanitaire.

Pour l'ensemble de ces composantes chimiques, minérales et organiques, il est donc important d'étudier, d'une part, dans quelle mesure elles peuvent être modifiées par les microorganismes en condition d'aérobiose et d'anaérobiose, avec un accent mis sur les zones sédimentaires situées à l'interface aérobie/anaérobie, où les processus de bio-minéralisation sont d'une grande intensité. D'autre part, il convient d'identifier les intermédiaires réactionnels de ces dégradations et de connaître leur degré d'innocuité vis-à-vis de l'homme. Par ailleurs, les contaminations multiples auxquelles sont soumis les sédiments ont des conséquences certaines sur la distribution des populations microbiennes, nécessitant une approche intégrée des réactions biotiques et abiotiques de transformation des contaminants.

G. Questions de recherches transversales

- Des questions se posent quant aux **effets des contaminants chimiques**, notamment les impacts directs ou secondaires (production de micropolluants) des déchets solides sur les écosystèmes, et les effets des polluants chimiques sur la reproduction et les stades de développement précoces des espèces et donc en lien avec la dynamique des populations. La mise au point et le recours à des bio-essais permettant d'évaluer et de comparer l'impact des contaminants sur des espèces cibles dans le cadre des programmes de surveillance et d'observation devraient être favorisés. Il existe également un fort besoin de compréhension et de modélisation des processus de perturbations, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques, ainsi que des interactions entre ces différents types de perturbations.
- En ce qui concerne les **pollutions chimiques**, une meilleure connaissance s'avère nécessaire, à la fois des **apports** (sources, flux, modalités de transfert, devenir en mer, hydrodynamisme) et de la **sensibilité des différentes zones de décharge** (les zones confinées comme les lagunes, les baies fermées, etc., étant beaucoup plus sensibles). Des zones ateliers permettraient de mesurer l'impact des apports (voir partie 5). Dans ce cadre, il serait notamment intéressant d'étudier les spécificités méditerranéennes en termes de dichotomie rive nord *versus* rive sud, apports massifs *versus* diffus, apports continus (mégacités) *versus* saisonniers (tourisme, crues), pollutions anciennes *versus* nouvelles...
- Développement d'**outils juridiques et économiques**: formulation de propositions juridiques et réglementaires nationales et internationales, applicables aux pays riverains, destinées à mieux encadrer et surveiller les sources de rejets (parfois localisés loin des sites d'observation et de contrôles nationaux). Evaluation du coût de la restauration des écosystèmes, définition des niveaux de responsabilité des pollueurs ainsi que leur implication financière dans la chaîne complète des traitements et de la dépollution (selon le principe « pollueur/payeur »).

Encadré 4 : Trouver des alternatives aux peintures antifouling

Le dépôt de salissures marines (ou fouling) sur les matériaux et équipements en milieu marin (ouvrages au large ou côtiers, navires, plateformes *off-shore*, installations aquacoles, équipements océanographiques, capteurs optiques) entraîne des effets néfastes pour de nombreuses applications. Leurs conséquences sont estimées à plusieurs milliards d'euros par an, comprenant les coûts de maintenance. Les opérations nécessaires pour éliminer les salissures des navires vont d'un simple lavage, qui peut être quotidien dans le domaine de la plaisance, jusqu'au carénage pour les marines marchandes et militaires, nécessitant l'immobilisation des navires. Tandis que l'impact environnemental du lavage est réduit grâce à l'utilisation de produits de lessivage biodégradables, celui du carénage est important à cause des peintures utilisées et des eaux résiduelles. Cette pollution ne cesse de croître depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, parallèlement au développement des flottes marchandes et de plaisance.

Les peintures anti-salissures à base de composés organostatiques (tributyl-étain - TBT), mises au point dans les années 60, ont été totalement interdites d'utilisation à partir de 2008, en raison de l'impact toxique avéré du TBT sur les mollusques et autres organismes marins non visés (Alzieu, 1998). Par la suite, l'utilisation de peintures et biocides à base de dérivés d'étain a eu pour effet le relargage de cuivre dans l'eau de mer, également source de préoccupations environnementales. Des biocides organiques d'origine naturelle ont été envisagés, entrant dans la composition de peintures actuellement commercialisées sous la dénomination de peintures auto-polissantes (*Self Polishing Coatings* - SPC). Toutefois, leur toxicité vis-à-vis d'organismes marins non visés a été mise en évidence par de nombreux auteurs (Kobayashi *et al.*, 2002). Ces dernières années, des peintures à faible énergie de surface (*Foul Release Coatings* - FRC), ont été développées (Terlizzi *et al.*, 2000). Les peintures FRC présentent l'avantage de ne pas relarguer de composés toxiques dans l'environnement. Des approches basées sur des surfaces structurées biomimétiques (revêtements à « effet lotus » ou « peau de dauphin », par exemple) sont explorées (Berntsson *et al.*, 2000 ; Carman *et al.*, 2006). L'influence de la nanotexturation et de la nanostructuration de surfaces de substrats est également étudiée (Genzer et Efimenko, 2006). L'objectif final vise dans tous les cas à diminuer la toxicité des différentes technologies vis-à-vis des organismes marins non visés. Le potentiel de développement de nouvelles alternatives de lutte contre le dépôt des salissures marines sur les structures immergées dans le milieu marin s'avère donc extrêmement important, aussi bien dans le domaine civil que militaire.

IV. Comprendre les processus en jeu dans l'introduction et la prolifération d'espèces

Parmi les perturbations d'origine anthropique affectant la mer Méditerranée, on constate une intensification de l'introduction accidentelle d'espèces non indigènes, *via* les eaux de ballasts, les bioalissures sur les coques de navires, le transfert d'espèces conchylicoles, les micro-déchets... Mais il ne faut pas oublier les introductions passives par le détroit de Gibraltar ou le canal de Suez (Otero *et al.*, 2013). Ainsi, toutes les deux semaines, une nouvelle espèce exotique est introduite en Méditerranée (Zenetos *et al.*, 2012), principalement d'origine tropicale (espèces lessepsiennes – de Mer Rouge – ou herculéennes – de l'Atlantique tropical). A ces flux entrant en Méditerranée s'ajoute actuellement un déplacement du bassin oriental vers le bassin occidental des très nombreuses espèces lessepsiennes entrées en Méditerranée orientale depuis l'ouverture du canal de Suez en 1869. La progression dans le nord et l'ouest du bassin occidental de ces espèces non indigènes est probablement favorisée par l'augmentation de température.

De plus, les changements globaux (intensification des apports continentaux, changement climatique) contribuent à modifier les paramètres environnementaux qui caractérisent les eaux côtières telles que la salinité, la température, la composition en sels nutritifs... Ces paramètres sont connus pour influencer le développement des communautés biologiques (phytoplancton, communautés microbiennes) et sur la répartition des espèces marines. Les changements récents indiquent une tendance à l'homogénéisation du *biota* méditerranéen et à la disparition des barrières biogéographiques du bassin, selon un processus de « méridionalisation ». En effet, des changements de dynamique de populations et d'aires de distribution d'espèces sont documentés depuis les années 80, essentiellement dans le nord-ouest de la Méditerranée : une conséquence directe du réchauffement est l'augmentation de l'abondance d'espèces thermotolérantes (notamment des espèces natives de Méditerranée essentiellement présentes dans l'est et le sud du bassin) et la diminution des espèces à affinité d'eaux froides (Francour *et al.*, 1994). Des effets sont également observés sur les populations bactériennes tels que le changement d'hôte, la prolifération au sein de l'écosystème, l'acquisition de facteurs de virulence, pouvant ainsi expliquer l'émergence ou la réémergence de microorganismes pathogènes non seulement pour l'homme, mais aussi pour les ressources biologiques (Boer *et al.*, 2009, Sapp *et al.* 2007).

Les introductions peuvent notamment concerner des microorganismes toxiques pour l'homme tels qu'*Ostreopsis* (microalgue libérant une toxine dangereuse pour les baigneurs) ou *Gambierdiscus toxicus* (microalgue responsable d'intoxications alimentaires suite à la consommation de poisson). Par ailleurs, les organismes, qu'ils soient ou non toxiques, peuvent fortement impacter l'écosystème et les services rendus (marées rouges, événements d'anoxie, algues toxiques rendant impropres à la consommation des stocks aquacoles entiers). A titre d'exemple, on peut citer les proliférations de méduses qui impactent de nombreux services environnementaux : frein aux flux de carbone vers le fond, diminution des pêcheries et des rendements d'aquaculture, nuisances causées aux industries côtières (par exemple les centrales nucléaires), déclin des activités touristiques. Or, à l'heure actuelle, les facteurs qui déclenchent ces apparitions d'organismes proliférants sont mal connus, et les dispositifs de détection et de suivi font défaut.

Néanmoins ces organismes représentent une source importante de matière organique qui pourrait être contrôlée, voir même exploitée dans certains cas. Les différentes possibilités d'atténuation des effets néfastes ou d'utilisation de ces biomasses devraient être explorées. Ainsi, les populations introduites de *Siganidae* (espèces lessepsiennes) enrichissent la pêche locale en Israël, au Liban, en Syrie et en Grèce. Toutefois, ces mêmes espèces ont totalement modifié les biocénoses en place et ont fait disparaître les grandes formations végétales.

Dans ce contexte, de plus amples investigations sont nécessaires pour mieux cerner l'évolution des communautés d'espèces au sein du bassin méditerranéen, ses conséquences sur la biodiversité et les services écosystémiques et les risques induits pour les populations humaines :

- Quelles sont les **voies et vecteurs majeurs d'introduction d'organismes** en Méditerranée ? Quel est notamment le rôle joué par les déchets solides dans le transport des espèces ?
- Etablir un **réseau d'observatoires de ces changements** : pour beaucoup d'espèces, de réelles lacunes d'observation et de connaissances persistent, et il n'est donc pas possible de se prononcer *a priori* sur leur caractère envahissant à plus ou moins long terme. De plus, c'est aux stades précoces d'introduction et d'établissement que les mesures (prévention et alertes précoces) sont les plus efficaces et rentables.
- Procéder, en ayant recours aux sciences participatives, à des études comparatives nord-sud de la Méditerranée des liens entre anthropisation/eutrophisation/oligotrophisation et le développement des espèces invasives et agents pathogènes (au sein de zones ateliers, voir partie 5).
- Dans le cas particulier des **espèces pathogènes pour l'homme**, quels sont les facteurs qui régulent la répartition, l'abondance, le comportement, la dynamique et la structuration génétique des populations ? Quels sont les mécanismes d'émergence de ces populations d'espèces pathogènes, en particulier les modalités de communication de cellule à cellule au sein des réservoirs environnementaux ? Quels sont les risques de voir émerger des microorganismes présentant une multi-résistance aux antibiotiques aux abords des zones d'aquaculture ?
- Quels sont les **impacts des espèces introduites sur les réseaux trophiques**, les interactions génétiques avec les espèces indigènes ? Quel sera l'avenir des services rendus par les écosystèmes face à ces différents organismes proliférants, que l'impact soit négatif (effet sur les habitats, les pêcheries, l'aquaculture, le tourisme et l'industrie) ou positif, pour peu que ces populations soient exploitables par la pêche, l'aquaculture, ou les biotechnologies marines ?
- Des questions **juridiques** autour de **l'introduction d'espèces exotiques** se posent : la législation actuelle est-elle satisfaisante (accord cadre en cours de rédaction pour une mise en œuvre à partir de 2016) ? Quelles modalités d'élaboration et de mise en œuvre du droit international sur les conventions type *Ballast Water Management Convention* (BWM) ? Quelles modalités de contrôle ? Quelles solutions techniques pour éviter le transfert d'espèces invasives lors des **opérations de ballastage/déballastage** (prophylaxie : traitements UV, électrolyse, filtration...) et faciliter leur détection ?

V. Caractériser les vulnérabilités des sociétés méditerranéennes face aux risques

Caractériser la vulnérabilité des sociétés littorales méditerranéennes aux risques d'origine naturelle et anthropique implique donc de considérer de multiples dimensions, en croisant parfois des disciplines très différentes jusqu'à la création de nouveaux savoirs transdisciplinaires, autour d'un objet commun (Godard, 1992 ; De Bechillon, 1997). Par ailleurs, la vulnérabilité doit être évaluée de façon prospective et itérative dans le temps en intégrant l'évolution probable des aléas, mais aussi celle des enjeux exposés. Ceux-ci sont en effet amenés à évoluer, ne serait-ce qu'en réponse à la mise en place de stratégies d'adaptation au risque et/ou de réduction des risques, mais aussi selon les tendances et les ruptures de la société et de son économie. Définir la vulnérabilité et les risques encourus par les sociétés constitue un défi majeur pour établir des scénarios réalistes permettant d'identifier et de proposer des solutions de mitigation ou d'adaptation adaptées, principalement focalisées sur des zones particulièrement sensibles.

Encadré 5 : Comment définir la vulnérabilité d'un territoire ?

Traditionnellement, la vulnérabilité d'un territoire à un aléa est abordée par la fonction vulnérabilité = intensité potentielle de l'aléa X valeur des enjeux exposés. Des études récentes insistent néanmoins sur la nécessité de caractériser la vulnérabilité d'un territoire aux risques naturels en appréhendant celle-ci de façon plus holistique et multidimensionnelle.

La notion de vulnérabilité d'un territoire peut être définie comme une fonction composite entre l'aléa et les enjeux exposés dans les différentes dimensions du territoire (dimensions physique, sociale, économique, écologique, culturelle, institutionnelle) ; chaque enjeu étant défini par sa vulnérabilité propre ou intrinsèque (sa fragilité et/ou sensibilité) et par sa vulnérabilité au regard de son exposition à l'aléa (dommages potentiels) (Birkman *et al.*, 2013). Cette vulnérabilité est pondérée par la capacité de réponse ou de réaction du territoire pour réduire ou s'adapter au risque. Cette capacité de réponse (positive ou négative) se traduit par des dispositifs de prévention, de préparation, par la capacité à gérer la crise et la capacité de reconstruction. Elle dépend ainsi des stratégies de gouvernance mises en place dans le territoire.

La survenance d'un évènement aléatoire peut provoquer des dommages qui seront plus ou moins importants selon ces différents paramètres. Ces dommages sont directs ou indirects (liés aux effets secondaires des premiers), tangibles (« marchands », quantifiables) ou intangibles (« non-marchands » et non quantifiables). Les politiques de prévision des aléas et des risques exigent une mesure des coûts monétaires globaux générés par ces dommages qui doit être mise en corrélation avec la probabilité de réalisation de l'aléa et, évidemment, les coûts des mesures préventives qui s'avèrent parfois élevés.

La mesure monétaire des dommages potentiels ou réels liés à la réalisation d'un aléa est l'un des outils de mesure de la vulnérabilité. Cette mesure est soumise aux contraintes de l'évaluation monétaire de l'environnement et des espaces naturels qui a connu un développement important au cours des dix dernières années, tant sur ses aspects théoriques que sur ses méthodes d'application. Les notions de valeur d'usage et de non-usage, de valeur intrinsèque d'un bien naturel ou d'un bien environnemental, sont aujourd'hui prises en considération par les économistes, sans qu'un consensus clair puisse se dégager : approche des prix hédonistes, approches contingentes par les coûts de déplacement, analyse multicritère, approches par les services rendus par les écosystèmes (*Millennium Ecosystem Assessment - MEA*, 2005).

La prise en compte de la probabilité de réalisation d'un aléa et de la vulnérabilité d'un territoire permet d'établir une classification des risques. Traditionnellement, un risque est qualifié de « majeur » si l'aléa est de forte intensité ou fréquent. Cette notion de risque majeur a évolué, durant les dernières années, pour décrire également les risques induits par le changement climatique dont les effets semblent irréversibles dans le court et moyen terme. Selon le rapport 2007 du GIEC, un risque est majeur s'il s'applique à une zone où des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont en présence ; il se caractérise alors par le nombre de victimes, un coût important de dégâts matériels et des impacts sur l'environnement.

Si la plupart des aléas en milieu littoral sont quantifiables ou au moins semi-quantifiables, il serait également fort utile de pouvoir quantifier la valeur des biens exposés à un aléa, afin de permettre des comparaisons et des hiérarchisations. Si des biens matériels sont quantifiables du point de vue monétaire, un certain nombre de biens naturels restent difficiles à quantifier, tels que la valeur d'une vie humaine, ou celle d'un écosystème. Le littoral méditerranéen est composé de territoires contrastés, de par leur configuration géologique (rocheux, sableux) mais aussi de par leur développement économique et social. Une **analyse des liens entre la vulnérabilité géologique, écologique et économique** qui peuvent accentuer les effets de propagation des dommages d'un aléa est nécessaire pour la mise en place de politiques de prévention et de correction qui prennent en considération ces différentes facettes. De même que l'est celle des effets d'échelle et de la dimension spatiale des conséquences d'un événement catastrophique : si certains aléas ont des effets purement locaux, d'autres ont des effets régionaux voire nationaux ; les échelles d'analyses ne sont pas les mêmes, ni les périmètres de l'action publique. Par ailleurs, même lorsque les effets directs de la réalisation d'un risque ne sont que locaux, des effets indirects peuvent apparaître dans les territoires plus ou moins voisins. La prise en compte des effets d'auto-corrélation et de dépendance spatiale dans la propagation des dommages et dans la mise en place d'une politique de prévention semble indispensable.

La **vulnérabilité des principaux services rendus par la mer Méditerranée** face aux futurs changements de l'environnement est actuellement inconnue et son impact économique sur les activités humaines n'est pas chiffré, de même que les coûts et les bénéfices d'actions potentielles de gestion de ces services. Or, ces éléments sont primordiaux pour sensibiliser les décideurs et provoquer de réelles politiques de gestion. La durabilité des services les plus importants est désormais remise en question du fait de leur nature même qui repose sur une consommation et/ou une transformation et/ou une altération des habitats, principalement côtiers mais pas seulement. Comment mesurer la vulnérabilité des services écosystémiques ? Levrel *et al.* (2014) soulignent l'intérêt de l'évaluation spatiale intégrée des services écosystémiques et des outils existants tels que les modèles multi-échelles (*Multi-scale Integrated Models of Ecosystem Services* – MIMES¹¹), les outils d'intelligence artificielle (*Artificial Intelligence for Ecosystem Services* – ARIES¹²) et InVEST¹³ (outil d'évaluation intégrée des services écosystémiques et des compromis), qui restent des instruments potentiellement utilisables pour la bonne gouvernance des territoires dans ce domaine.

¹¹ <http://www.afordablefutures.com/services/mimes>

¹² <http://www.ariesonline.org/>

¹³ <http://www.naturalcapitalproject.org/>

VI. Développer les capacités d'adaptation et/ou de résilience des territoires littoraux et du milieu marin aux changements globaux

Dans des contextes géopolitiques divers (zone sud et nord du bassin méditerranéen) et de pression anthropique croissante, l'avènement du changement climatique suscite de nombreuses interrogations (CIRCLE-Med, 2011) et des réactions diverses quant à sa perception et sa prise en charge, ce dernier ne constituant pas une priorité pour tous les pays.

Les espaces littoraux présentent la particularité d'être des espaces à risque où l'adversité côtoie l'aménité. Ainsi, malgré les fortes pressions, les risques et les prédictions parfois dramatiques relatives au devenir des espaces littoraux méditerranéens, ils continuent d'attirer toujours davantage de population urbaine.

Il convient de s'interroger sur les impacts des changements globaux, notamment sur les capacités des sociétés littorales à faire face à des risques encore mal connus, ainsi que sur les risques systémiques et multidimensionnels auxquels les sociétés humaines, les territoires et les écosystèmes vont être confrontés. Les analyses devront intégrer les évolutions de ces territoires, tant du point de vue socioéconomique (mode d'occupation du sol, structures démographiques, désir croissant des populations à vivre dans ces espaces, etc.) que géographique (évolution de la morphologie des zones côtières, artificialisation des espaces littoraux, etc.). Comment alors combiner cette sensibilité des espaces côtiers méditerranéens à la sensibilité des habitants, voire des touristes, où le plaisir constitue un puissant facteur d'attachement, voire d'action collective (Tricot et Lolive, 2013) ?

Ce constat d'ensemble impose de s'interroger sur les manières de préparer les réponses des sociétés littorales méditerranéennes aux défis des phénomènes naturels extrêmes et des changements globaux. Dans le contexte du changement climatique et des risques associés (événements extrêmes ou événements récurrents, risque géopolitique : mobilité, conflit sur la ressource, etc.), les événements catastrophiques ne peuvent plus être résolus uniquement *via* des solutions purement techniques, telles que l'édification d'ouvrages de défense pour se protéger de tempêtes et d'inondations (Quenault *et al.*, 2011) ou la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Des travaux ont d'ailleurs démontré les effets contre-productifs des ouvrages côtiers sur le transit sédimentaire et la défense du trait de côte. Des stratégies de résilience doivent donc être pensées pour réduire les risques de catastrophe, faire face au changement climatique et protéger les populations. Pour l'action publique, il ne s'agit pas de reconstruire des stratégies qui soient le pendant de celles mises en place pour réduire les vulnérabilités, mais d'anticiper la crise en construisant les piliers de la résilience, en inventant des futurs inédits, qui ne soient pas le seul retour aux conditions antérieures.

Les défis scientifiques et sociaux sont donc tout autant conceptuels, méthodologiques, stratégiques, que pratiques. L'enjeu est de penser le niveau opératoire de la résilience non plus au niveau technique, mais au niveau social et territorial, en prenant en compte les vulnérabilités, mais aussi les capacités d'action des sociétés à faire face, voire à « faire avec » ces nouveaux risques au sein des villes et espaces urbains méditerranéens. La question des risques et des menaces climatiques implique donc d'entreprendre des analyses plus systémiques afin d'appréhender la multiplicité des objets (les territoires littoraux et les écosystèmes côtiers méditerranéens, le multi-aléa, la gouvernance, etc.) et des interactions agissant à différentes échelles spatiales (de l'échelle planétaire aux échelles territoriales) et temporelles (du long terme au court terme).

- Les **politiques et actions visant à prévenir la dégradation environnementale et les risques naturels** font l'objet d'interrogations quant à leur rentabilité de court terme et leur efficacité de long terme. Les coûts liés aux dépenses d'investissement des grands projets de prévention des risques et de préservation de l'environnement sont souvent sous-estimés, tandis que les bénéfices sont difficiles à calculer, non seulement à cause des effets secondaires de ces projets, mais aussi à cause d'une difficulté d'évaluer le coût réel de la réalisation d'un risque. A mesure que des options d'adaptation sont élaborées (par exemple : le nouveau guide méthodologique des plans de prévention des risques côtiers prenant en compte des scénarios d'élévation du niveau de la mer), il devient nécessaire d'évaluer ces mesures d'adaptation. Quelles sont les initiatives méditerranéennes et euro-méditerranéennes visant un développement équilibré des zones côtières et l'amélioration de la résilience des territoires face au changement climatique ? Quelle est l'échelle géographique de ces projets et politiques ? Comment ces politiques peuvent être mises en place dans des zones caractérisées par des régimes de propriété et d'occupation du sol différents ? Quels succès et écueils ces initiatives ont-elles jusque-là connus en matière de mise en œuvre sur le terrain ? L'analyse coût/bénéfices donne rarement des résultats satisfaisants à ces échelles de temps (plusieurs décennies). **Il est donc nécessaire d'élaborer d'autres méthodes d'évaluation des mesures d'adaptation.**
- Par ailleurs, la nécessité d'**atténuer le changement climatique** s'appuie sur le fait qu'il n'est pas possible de s'adapter à tout type de changement climatique ; les seuils à partir desquels l'adaptation devient difficile ou très coûteuse restant mal connus. Existe-t-il des seuils à partir desquels les effets du changement climatique deviennent très coûteux ? D'une telle ampleur que les options d'adaptation actuellement envisagées deviennent inopérantes ? Et quelles combinaisons de seuils de nature variée (écologiques, économiques, sociaux, etc.) sont à considérer ? Quels « services climatiques » doivent être développés pour favoriser les études multidisciplinaires pour l'adaptation, puis l'adaptation elle-même ?
- Comment articuler, organiser et gérer les stratégies prenant en compte à la fois des risques connus et des risques incertains, ayant des dynamiques temporelles distinctes, mais aussi les préoccupations de développement urbain durable et les usages ? Quels processus et acteurs sont à l'œuvre et pour quels bénéfices concrets ? Quels leviers et barrières à la résilience relèvent de dimensions comportementales (comportements humains en situation de catastrophes, rapports sociaux, migrations, effets de solidarité, etc.) ?
- Analyse de la **résilience des systèmes écologiques et sociaux** notamment en termes de structure, c'est-à-dire de diversité et d'interactions : comment cette diversité permet de maintenir un niveau de fonctionnement face aux changements environnementaux ? Comment la perte de certaines composantes et d'interactions associées peut être compensée ou non par des composantes redondantes ? Peut-on identifier des signaux précoces de transition critique ? Comment utiliser les connaissances sur la résilience des systèmes complexes pour favoriser la redondance et la complémentarité dans les systèmes les plus menacés ?

Encadré 6 : Quels sens la résilience prend-elle au plan des risques et du changement climatique et au regard des notions de vulnérabilité et d'adaptation?

Bien que le terme de résilience¹⁴ ait fait son apparition dans le domaine des risques et catastrophes dès les années 70 (White et Haas, 1975 ; Mileti, 1999), ce concept y a véritablement été consacré en 2005, lors du « Cadre d'Action de Hyogo pour 2005-2015 : pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes ». Il s'agit là du principal instrument que les États membres des Nations unies ont adopté pour réduire les risques de catastrophe. Mais avant d'être un concept en vogue dans les cindyniques, la résilience a été utilisée dans différents champs disciplinaires (métallurgie, écologie, psychologie notamment). De par cet effet de transfert entre les sciences, ce concept revêt un caractère polysémique, ce qui le rend parfois difficile à cerner. Cet aspect s'est renforcé du fait de son appropriation par deux communautés scientifiques : celle du risque (dont l'UNISDR¹⁵ qui participe à la stratégie de réduction des catastrophes dans le cadre de Hyogo) et celle du changement climatique (dont le GIEC). Ces acteurs ont contribué à rendre plus étroit le lien entre adaptation aux changements climatiques et gestion des risques de catastrophe : ce point est sans doute le plus remarquable par rapport aux politiques climatiques d'atténuation ou de réduction des émissions de gaz à effet de serre, davantage axées sur l'amélioration des performances énergétiques et du confort de vie. Notons également que ce rapprochement politique des acteurs de l'adaptation au changement climatique et ceux de la gestion des risques et des catastrophes, s'est traduit par une implantation, voire une traduction, des concepts de vulnérabilité et de résilience dans le cadrage conceptuel de l'adaptation. Cependant entend-on de la même chose par adaptation aux risques de catastrophes et adaptation aux changements climatiques ?

Bien que le concept soit désormais incontournable dans le domaine de l'adaptation aux changements climatiques, dans le champ de la recherche comme dans celui des politiques publiques, les différentes acceptions de la résilience ne sont pas toujours compatibles et suscitent des débats parfois virulents qui touchent tant les réflexions conceptuelles que les modalités opératoires de cette notion. Si la résilience est très largement considérée comme une des caractéristiques souhaitables des systèmes sociaux et territoriaux, des sociologues et géographes ont également souligné le fait que la résilience n'est pas *de facto* une réponse appropriée (Perrow, 1986 ; Quenault, 2013) : elle dépend de l'objet étudié, de sa complexité et des échelles d'analyse retenues. Un enjeu fort consiste donc à définir un cadre qui permettra de dépasser ces conflictualités scientifiques, de manière à favoriser un rapprochement des sphères scientifiques et décisionnelles, ce au bénéfice d'une mise en œuvre plus proactive de stratégies de réduction des risques actuels et futurs.

La résilience étant un concept assez récent en gestion des risques, peu de travaux ont été publiés concernant son analyse méthodologique. Le plus souvent, les études sont empiriques, réalisées à différentes échelles et portent sur des systèmes aussi distincts qu'un pays, une ville, une communauté humaine, un individu ou une entreprise. En l'absence de cadre méthodologique commun, les comparaisons pour évaluer les territoires résilients sont donc difficiles. De plus, dans la majorité des recherches, la difficulté de mettre en œuvre une démarche de résilience opérationnelle apparaît clairement (O'Rourke, 2007). Quelques rares tentatives ont été essayées avec les modèles stylisés du Cycle adaptatif (Walker *et al.*, 2004), de Panarchy (Gunderson et Holling, 2002) et avec la méthode proposée par le groupe de recherche *Resilience Alliance*¹⁶. Dans la réalité, ces modèles sont rarement utilisés par les chercheurs et les institutionnels.

¹⁴ « Resilience is the ability to prepare and plan for, absorb, recover from, and more successfully adapt to adverse events. Enhanced resilience allows better anticipation of disasters and better planning to reduce disaster losses – rather than waiting for an event to occur and paying for it afterward » National Academy (2012).

¹⁵ United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction

¹⁶ <http://www.resalliance.org/workbook/>

Partie 3 : Appuyer le développement d'activités durables en Méditerranée

La mer Méditerranée, depuis le littoral jusqu'au large, est le siège de nombreuses activités basées sur l'exploitation de ses ressources minérales (granulats, minerais, hydrocarbures), vivantes (des micro-organismes jusqu'aux vertébrés) ou spatiales (espace de navigation, tourisme, résidentiel littoral, réseaux, installations maritimes permanentes). La mer pourvoit également à une grande diversité de services écosystémiques non marchands (nurseries pour les espèces exploitées, recyclage des substances chimiques, absorption de CO₂ atmosphérique dans les eaux de surface et séquestration de carbone dans les profondeurs marines, filtration et recyclage des substances toxiques, contrôle de l'érosion des côtes...). Les activités humaines en elles-mêmes, en expansion, mais aussi les effets du changement climatique, génèrent de nombreuses perturbations du milieu et des écosystèmes marins (surexploitation par la pêche, dégradation des habitats, pollutions multiples...), qui remettent en cause la pérennité d'une partie des services écosystémiques rendus par la mer Méditerranée.

Il existe deux principales voies pour atténuer les risques encourus par les systèmes écologiques et sociétaux : la mitigation et l'adaptation. La mitigation vise à la réduction des pressions anthropiques sur les systèmes naturels. Par exemple en ce qui concerne les forçages climatiques, il s'agit de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'adaptation se réfère aux processus qui peuvent être mis en œuvre pour diminuer la vulnérabilité des systèmes en fonction d'un niveau d'exposition observé ou attendu.

Ainsi, la mise en œuvre de stratégies d'adaptation nécessite de prendre en compte, au niveau des aménagements et des activités, l'interaction entre les conditions du milieu (changeantes), les services (pour plusieurs mal identifiés et encore peu compris) et leur utilisation durable (par des populations riveraines en forte croissance et, pour certaines, en mutation sociale, économique et politique). Cette vision, relativement nouvelle en Méditerranée, requiert des recherches et des dispositifs innovants, s'appliquant tant à des activités traditionnelles qu'à des secteurs émergents : à côté des secteurs économiques conventionnels (tels que la pêche, la conchyliculture, la construction navale, les ports et la logistique, le pétrole et le gaz, le tourisme côtier et la protection du littoral), le potentiel de « croissance bleue », basé sur l'exploitation des ressources marines moins conventionnelles, est considérable (aquaculture, biotechnologies marines, énergies renouvelables marines, mesures et moyens de surveillance à la mer, industrie de la croisière et du loisir, minéraux marins...).

Parmi les secteurs traditionnels, celui de la **pêche artisanale** mérite une attention particulière en termes d'accompagnement scientifique et politique, du fait de son importance économique et sociale majeure en Méditerranée, et en raison des menaces qui pèsent sur la pérennité de cette activité et des revenus qu'elle procure aux populations qui en dépendent. Parmi les secteurs en plein essor, **l'aquaculture et les biotechnologies marines** vont poursuivre leur progression dans les décennies à venir, et nécessitent des recherches pour développer le potentiel de ces secteurs tout en assurant leur durabilité. Enfin, l'innovation en matière **d'éco-conception et d'ingénierie écologique** offre des perspectives prometteuses pour réduire l'impact des activités humaines sur le milieu marin.

I. Accompagner l'évolution des métiers de la petite pêche artisanale

A l'exception des grandes compagnies de pêche industrielle exploitant des ressources océaniques (mais participant directement ou indirectement à l'économie des pays auxquels elles appartiennent), l'essentiel de la pêche méditerranéenne est artisanale. Elle est composée, d'une part, de flottilles dédiées à des métiers spécialisés, alimentant une production répondant à la demande d'un marché interrégional et, d'autre part, de flottilles utilisant diverses techniques pour satisfaire de façon opportuniste une demande très localisée, réduite et très versatile. Les premières nécessitent des moyens techniques et financiers importants (qui n'autorisent pas une grande polyvalence), les secondes n'imposent que des moyens parfois très rudimentaires. La hauteur des moyens fixe les rayons d'action de chacun : aux techniques mobiles l'étendue des grands plateaux continentaux et aux techniques statiques les zones littorales étroites et les accores non chalutables.

Les flottilles de métiers non spécialisés dites de « petits métiers » sont en fait souvent celles des futurs « primo entrants » vers les métiers du large ; les patrons pêcheurs littoraux, ambitionnant un niveau de vie plus élevé, désirent naturellement s'éloigner du rivage et faire l'acquisition d'un navire plus important. Les jeunes marins préfèrent quant à eux (au moins pour un temps) embarquer sur des chalutiers ou des thoniers dans l'espoir d'un travail mieux rémunéré et plus régulièrement payé. La hausse du coût de l'énergie, qui a durement impacté la rentabilité du chalutage et des grands thoniers, tend à réduire aujourd'hui cet écart d'attractivité.

Il serait erroné, autrement qu'à des fins d'analyse, d'établir en Méditerranée un cloisonnement formel entre les deux formes d'exploitation. Si la pêche côtière polyvalente représente, sociologiquement, une pépinière pour la pêche au large, cette dernière constitue aujourd'hui un élément structurant, pour l'ensemble de la filière et de son économie.

L'absence de ressources profondes (à l'exception des quelques pêcheries crevettières), la surface limitée des plateaux continentaux, la faible productivité des eaux méditerranéennes comparées aux eaux atlantiques, a limité plus rapidement qu'en Atlantique cette expansion vers le large qui fait de la pêche méditerranéenne essentiellement une activité de pêche fraîche et en majorité journalière. Intimement liées aux ressources, qu'elles ont contribué à façonner (notamment par la sélection qu'elles opèrent sur la composition en espèces), à maintenir et parfois à mettre en péril, les pêches côtières occupent une place prépondérante au sein du secteur halieutique méditerranéen. Parmi celles-ci, les petits métiers tiennent une place numériquement prédominante. Formées d'embarcations de petit tonnage faiblement motorisées, ne dépassant pas en général 12 mètres de longueur, ces « *small-scale fisheries* » emploient une grande variété de techniques de pêche. Elles sont orientées vers la capture d'une centaine d'espèces démersales et d'un nombre plus réduit d'espèces pélagiques. Dans un contexte d'incertitude sur l'avenir de ce secteur d'activité, et alors que 60 % des espèces étudiées apparaissent aujourd'hui surexploitées, les questions de la réactivation et du soutien de ce secteur halieutique sont aujourd'hui posées. Dans les faits, ce pourcentage régulièrement mentionné peut cependant susciter des interrogations. Les Etats de l'Union européenne, qui sont à l'origine de ces évaluations scientifiques de la ressource, ont en effet d'abord fait porter leurs études sur les espèces les plus importantes du marché, celles qui avaient un intérêt communautaire ; or la

production des petits métiers dépend d'un bon nombre d'espèces dont les stocks essentiellement locaux n'ont été que peu ou pas étudiés.

Dans le cadre de la Stratégie Europe 2020, le Fond européen pour les Affaires maritimes et la Pêche – FEAMP – 2014-2020 fixe parmi ses objectifs prioritaires « le renforcement de la compétitivité des navires pratiquant la petite pêche côtière »¹⁷. On peut légitimement s'interroger sur cette formulation et sur les objectifs soulignés par les institutions communautaires. Cette stratégie semble en effet vouloir s'attacher plus à l'outil de travail qu'à l'ensemble du métier ; de plus, le problème de l'industrie halieutique ne saurait se réduire à de simples critères de compétitivité, la capacité à être économiquement viable à long terme étant désormais déterminante.

Les métiers liés au secteur de la pêche sont aujourd'hui en crise. Ils doivent surmonter de multiples défis : concurrence d'usages sur l'espace maritime, concurrence au niveau de la mise sur le marché, réduction des stocks de certaines espèces, détérioration des écosystèmes côtiers, deltaïques ou lagunaires sous l'effet de la pression anthropique et des rejets industriels ou urbains. Les modifications liées aux changements globaux (augmentation de la température moyenne de l'eau, acidification, impacts des espèces invasives) représentent des menaces supplémentaires pour le maintien d'une activité de petite pêche côtière.

La nécessité de définir les normes d'un développement soutenable de l'activité halieutique en Méditerranée impose désormais l'adoption d'approches scientifiques intégrées, afin de mieux prendre en compte les données biologiques, historiques et humaines qui conditionnent le maintien, l'adaptation et la diversification de ces activités. Plusieurs pistes doivent être explorées, dans le cadre d'une approche résolument écosystémique.

A. Evaluer l'impact des petits métiers de la pêche et faire reculer les états de référence

La mesure de l'impact des pêches côtières doit être tentée sur une durée pluriséculaire, afin d'analyser ses effets sur les écosystèmes, les capacités de résilience de ces derniers, et les modalités d'adaptation des communautés aux fluctuations de la ressource et aux changements sociétaux, économiques et politiques. Les **approches historiques** sont indispensables pour évaluer correctement le recul des états de référence retenus actuellement par rapport à la situation passée.

Cette analyse doit être faite en considérant l'évolution divergente des façades sud, nord et orientales de la Méditerranée et notamment les différences de capacité d'échanges entre ces façades et leurs arrière-pays. La connaissance technique des gestes anciens, aujourd'hui en partie effacés de la mémoire collective des communautés, et la localisation passée de certaines pêcheries (madragues, bordigues, maniguières, chrafi, etc.) doivent faire l'objet d'un travail d'inventaire à l'échelle de la Méditerranée. Ces éléments doivent être intégrés dans les politiques d'aménagement des littoraux (protocole de gestion intégrée des zones côtières – GIZC), afin que ces dernières n'aboutissent pas à la disparition d'espaces potentiellement ré-exploitable par les pratiques halieutiques traditionnelles.

Une des caractéristiques profondes de l'activité des petites pêches méditerranéennes est leur forte dépendance à la disponibilité des ressources côtières. Disposant de moyens d'intervention

¹⁷ http://www.partenariat20142020.fr/les_thematiques.html

réduits, voire rudimentaires, la pêche côtière n'a pas la possibilité de répondre de façon concurrentielle à la demande ciblée et de masse des marchés régionaux et nationaux, comme peuvent le faire des métiers à plus forte capacité de capture et à plus grand rayon d'action. La stratégie des petits métiers de la pêche côtière consiste donc en une adaptation du choix des techniques de capture aux **variations saisonnières de l'abondance des espèces présentes** dans les zones de pêche. Jusqu'à présent, seul un très petit nombre de ces espèces ont bénéficié d'études portant sur leur biologie ou leur état d'exploitation.

B. Exploiter la biodiversité marine pour donner un avenir à la pêche côtière

L'étude et la valorisation par les pêches côtières des espèces exotiques devenues envahissantes et des espèces endémiques encore non exploitées doivent faire l'objet de programmes spécifiques. Ces actions entrent dans le cadre de la stratégie régionale de lutte contre la bioinvasion et l'application des conventions internationales (Barcelone) et des directives européennes (« *Good Environmental Status* »). La mise en œuvre de réseaux de suivi et d'échantillonnage, associant professionnels des pêches, biologistes et halieutes, doit permettre une connaissance en temps réel de la diffusion des espèces non indigènes dans l'ensemble des pays riverains. La reconstitution de ces rythmes de propagation, croisée avec une modélisation prenant en compte les effets des changements globaux et les impacts des transports maritimes, permettra d'anticiper l'arrivée d'espèces allochtones sur les portions littorales encore les moins affectées. Les potentialités offertes au maintien et au développement de la pêche côtière par ces espèces invasives doivent être explorées, dans les domaines de l'alimentation et des biotechnologies. Si les analyses physico-chimiques ou organoleptiques de ces espèces ne peuvent être réalisées que dans le cadre de programmes de recherche pilotés par des institutions scientifiques, les questions de la maîtrise démocratique de ces ressources, et des modalités de leur exploitation, sont d'ores et déjà ouvertes. Ces ressources potentielles devront cependant être évaluées avec circonspection, selon une vision à long terme (car ces changements sont relativement rapides à l'échelle de l'évolution naturelle des écosystèmes) en tenant compte des conséquences sur les espèces concurrentes ou associées et sur la viabilité économique des procédés identifiés.

Il convient ainsi d'élaborer des propositions pratiques permettant aux petits métiers de maîtriser la capture des espèces endémiques ou allochtones encore non exploitées, par des programmes de reconversion partielle (quelle formation professionnelle, quels engins de pêche, quelles espèces cibles ?). Cette implication des secteurs les plus modestes dans les nouvelles activités ne doit pas se limiter à une simple fonction de pêche. Elle doit s'accompagner, particulièrement sur la rive sud du bassin, d'un contrôle local ou d'une association des communautés de pêche aux plus-values générées par les éventuelles activités de transformation des produits. Dans le cas d'une utilisation alimentaire directe (produits bruts ou faiblement transformés), les circuits courts de distribution doivent être privilégiés. A titre d'exemple, le crabe invasif *Libinia dubia*, particulièrement présent depuis quelques années dans le golfe de Gabès, où il entrave gravement les activités traditionnelles de pêche, présente un réel potentiel d'exploitation (chair et chitine).

C. Valoriser la richesse patrimoniale pour augmenter la résilience des petites pêches artisanales côtières

Les petites pêches artisanales côtières semblent avoir généralement mieux répondu aux changements environnementaux (saisonniers ou à longue périodicité) que les pêcheries spécialisées du semi-large. Ces changements induisent des variations de la composition spécifique des écosystèmes exploités, auxquels les pêcheurs s'adaptent par des modifications de leurs techniques de capture. Cette adaptation implique une capacité culturelle et économique de maîtrise d'un éventail de techniques suffisamment large. Il faut aujourd'hui évaluer jusqu'à quel point cette flexibilité a permis dans le passé une adaptation des petites pêches côtières aux changements naturels. Définir aussi les limites de ces adaptations, si l'on considère que la plupart de ces artisans n'avaient pas, à l'image de la situation actuelle, les capacités financières et humaines permettant de maintenir un parc important de matériel, tandis que les tentatives de mutualisation des moyens de production n'ont pas toujours eu le succès espéré. En revanche, ces pêcheries de petits métiers ne semblent pas avoir mieux résisté que les pêches de semi-large aux changements sociétaux (recherche de l'amélioration de la qualité de vie par l'augmentation de la rente, le repos, les vacances), ou économiques (ouverture des marchés amenant la concurrence de produits similaires mais à bas prix).

Bien que plus importante que par le passé, la demande en produits frais (créneau commercial de la petite pêche) s'est considérablement restreinte à quelques espèces (les mieux connues du grand public), contraignant les pêches de petits métiers à concentrer leur effort sur celles-ci pour rentabiliser leur activité, entraînant par là-même une fourniture excessive de ces espèces cibles pour les marchés locaux, un accroissement des rejets (souvent d'espèces commercialisables) et dans certains cas une surexploitation des ressources littorales.

Mieux adaptées pour répondre aux cibles d'un marché ouvert aux importations et aux échanges, les pêcheries spécialisées ont organisé leur commercialisation, notamment autour des réseaux de criée, structurant par là-même l'ensemble de la production, donc celle de la petite pêche. En France, malgré la fermeture des criées de Port de Bouc ou de Port-Vendres, les petits métiers des ports voisins subsistent, répondant à une double sollicitation : celle de la demande locale et celle d'une distribution dopée par l'activité touristique.

Mettant en œuvre des pratiques anciennes, le plus souvent transmises de générations en générations, les pêches côtières représentent un conservatoire du patrimoine maritime doté d'une valeur culturelle, mais ouvrant aussi des potentialités nouvelles de développement associées à l'adaptation de pratiques anciennes au contexte nouveau de l'état de l'exploitation des ressources littorales.

Cette diversification des activités offre de vraies perspectives notamment sur la rive sud du bassin, la persistance de nombreuses pêcheries fixes ayant contribué sur certaines côtes (golfe de Gabès par exemple) au maintien de paysages spécifiques. Le développement du pécaturisme, en s'appuyant sur la richesse du patrimoine culturel des pêches méditerranéennes, apparaît comme une voie possible pour une diversification des sources de revenus au sein des familles de pêcheurs dans le contexte d'une économie saisonnière touristique appelée à se renforcer également sur la rive sud. Tel qu'il a été initié, notamment en Italie à l'occasion de la mise en valeur des madragues du golfe ligure, il apparaît comme fortement générateur de richesses pour les économies locales.

La question fondamentale est de savoir **comment le secteur de la petite pêche peut bénéficier de retombées économiques** jusqu'à aujourd'hui essentiellement captées par le seul secteur touristique. Selon quelles formes entrepreneuriales ? Quels financements ? Pour quelles structures d'accueil et de découverte, devant être contrôlées par les acteurs eux-mêmes (hébergement, restauration, vulgarisation des opérations de pêche par des éco-guides locaux) ?

Partout, une évaluation de la valeur des services rendus par la pêche côtière doit être mise en œuvre, qui doit replacer ce secteur au sein d'une analyse écosystémique (valeur de la veille environnementale, de la collaboration avec les laboratoires de recherche, du maintien d'une gastronomie liée aux produits de la mer, rôle dans l'attractivité touristique des ports de pêche, calcul des emplois induits, etc.).

D. Inventer de nouveaux modes de gestion pour la petite pêche

Ce type de pêcheries est souvent considéré comme durable. On le présente généralement comme générateur d'un faible impact écologique sur les ressources et les milieux. Dans les faits, beaucoup de pêcheries de petits métiers sont affectées par une exploitation excessive de juvéniles, mais aussi par l'utilisation d'arts traînants sur des habitats sensibles (posidonies). L'impact de la pêche côtière sur la ressource comme sur l'ensemble de l'écosystème reste très mal connu, à l'instar de son importance économique. Celle-ci a souvent été considérée comme négligeable, ce qui explique que les petits métiers n'aient pas bénéficié d'une attention soutenue dans le cadre des politiques nationales de développement. Les administrations de tutelle, reconnaissant toujours l'importance sociale des communautés de pêche, leur ont historiquement laissé une large latitude dans la gestion de leurs activités.

Malgré sa richesse et sa diversité, cette catégorie apparaît au final mal prise en compte par l'administration. De plus, elle est souvent mal représentée par ses pairs, et par conséquent peu protégée face aux crises successives et aux changements d'orientations politiques et économiques. A la différence des autres pêcheries professionnelles, la petite pêche côtière semble trop complexe pour pouvoir faire l'objet d'une stratégie globale de gestion et bénéficier de politiques publiques adaptées à ses spécificités. Le raisonnement gestionnaire a toujours privilégié les approches plutôt mono-spécifiques par « espèce » ou par « technique », plus directement applicables aux pêcheurs spécialisés, industriels ou semi-industriels. Ces démarches sont de nature à rassurer les gestionnaires aux niveaux des suivis scientifiques, des évaluations techniques et de la mise en œuvre des réglementations. Cependant, cette tendance ne peut s'avérer pertinente pour les pêcheries polyvalentes, pourtant majoritaires, ciblant une multitude d'espèces au moyen de techniques tout aussi variées. Elle s'avère aussi erronée dans le cas des pêches industrielles ou semi-industrielles, puisque le ciblage sélectif des captures a conduit l'essentiel des diagnostics et des stratégies de suivis scientifiques à se concentrer sur quelques espèces (merlu, rouget, crevette blanche, etc.) sans vraiment prendre en considération la question des prises accessoires commercialisées ou rejetées, du moins jusqu'aux années 90.

Pendant longtemps, les pêches artisanales ont été gérées localement par des institutions traditionnelles (*Cofradías* espagnoles, prud'homies françaises...), qui visaient une gestion à la fois durable et démocratique des territoires de pêche sous leur responsabilité. Bien qu'encore présentes, ces institutions sont aujourd'hui confrontées à la double difficulté de leur conformation au cadre européen de la gestion des pêches et d'une certaine perte de légitimité locale. En France, certaines prud'homies sont ainsi restées très actives et respectées tandis que d'autres ne jouent plus de rôle significatif.

Le modèle de gestion général promu par la Politique Commune de la Pêche (PCP), largement dominé par des formes de régulations adaptées à des pêcheries spécialisées, basé sur le contrôle de la capacité (tonneaux de jauge brute – TJB ; kilowatt – KW) et de la production (totaux admissibles de capture – TAC et quotas individuels) est souvent refusé et incompris par les pêcheurs « petits métiers » qui tiennent à conserver la polyvalence de l'exploitation et sont favorables à une régulation avant tout fondée sur le contrôle de l'effort de pêche et des mesures techniques (caractéristiques des engins de pêche). Enfin, l'extension des aires marines protégées en Méditerranée est un réel enjeu pour la pêche artisanale. Les pêcheurs artisans peuvent être associés à ces politiques de conservation et en tirer profit sous la forme de quasi-labellisation de produits de pêche durable. Le lien entre la mise en place d'aires marines protégées et la pêche apporte des exemples très intéressants « gagnants-gagnants », au profit de la préservation de la biodiversité et des pêcheurs locaux, qui voient les stocks de poisson augmenter en bordure de réserve et qui sont mieux informés des bonnes et mauvaises pratiques. Dans d'autres cas, les actions de conservation sont surtout subies et considérées comme favorisant d'autres activités (tourisme) au détriment de la pêche.

Alors que la généralisation des politiques de conservation et la réforme de la politique commune des pêches sont des tendances lourdes qui vont s'imposer à l'ensemble des formes de pêche, il paraît donc judicieux de se questionner sur les formes de régulation qui seront les plus adaptées à l'avenir pour la pêche artisanale, garantissant le maintien de sa polyvalence tout en se conformant aux principes de la pêche durable. Le maintien et l'adaptation des institutions de gestion locale semble en conséquence un enjeu d'avenir pour ce secteur encore d'importance pour l'économie et l'identité des territoires côtiers.

E. Mieux connaître les usages récréatifs qui entrent en compétition avec la petite pêche

La petite pêche doit faire face à la concurrence que lui opposent les usages récréatifs de la mer, en constante progression sur la rive nord comme sur la rive sud de la Méditerranée. Le développement de ces usages, plus ancien sur la rive nord, varie énormément selon les situations socio-économiques des pays de la rive sud, mais ils sont voués à se généraliser en lien avec l'urbanisation littorale. En drainant une part importante de la population, les villes vont concentrer ces usages et exacerber la concurrence avec la petite pêche, tant au niveau du partage de la ressource halieutique que de l'occupation de l'espace dans les ports et sur les lieux de pêche. Des propositions de régulation et d'encadrement doivent être élaborées, afin de protéger la ressource, mais aussi de préserver l'activité des petits métiers de la pêche.

Les pêches maritimes de loisir à pied, du bord, en bateau ou sous-marine, connaissent aujourd'hui un très fort accroissement en Méditerranée. Leur part dans les captures est généralement mal connue, mais elle peut se révéler très importante, même si les quantités individuelles de captures sont faibles, tant les effectifs de pêcheurs en jeu sont considérables. La diversité de ces pratiques va demander le développement de méthodes adaptées à chacune d'entre elles pour établir des estimations sérieuses.

A côté de ces activités de pêche de loisir qui ont un impact direct sur la ressource, il existe toutes sortes d'autres activités récréatives susceptibles d'avoir un impact sur la petite pêche, comme la navigation de plaisance, la plongée sous marine, et les nombreux sports nautiques qui ne cessent de se renouveler (jet ski, surf, windsurf, kite surf, paddle...). Il importe de bien connaître également ces activités et leurs interactions avec la petite pêche.

II. Soutenir une aquaculture méditerranéenne plus durable

Au cours du siècle écoulé, l'aquaculture est devenue une activité majeure sur le plan économique en Méditerranée, avec le développement pionnier de la conchyliculture pendant la première moitié du XX^e siècle, puis celui de la pisciculture marine à partir des années 1970. Aujourd'hui, les productions aquacoles des pays riverains de la Méditerranée dépassent les captures liées à la pêche, atteignant 1 663 000 tonnes en 2008 (dont les deux-tiers proviennent d'Égypte), ce qui représente une augmentation de 89% par rapport à 1995. L'emploi lié à la production aquacole méditerranéenne et aux activités connexes a pu être estimé à 133 000 emplois permanents pour la période allant de 2005 à 2010 (Sacchi, 2011). Les espaces de développement sont des lagunes ou des étangs, au large (cages flottantes) et à terre en système intensif recirculé.

L'image du poisson d'élevage reste ambiguë, notamment pour des espèces emblématiques comme le bar/loup (*Dicentrachus labrax*) et la daurade royale (*Sparus aurata*) en raison de craintes, pas toujours infondées, sur la qualité des élevages et les impacts sur l'environnement *lato sensu*. Mais les normes et les réglementations dans le contrôle du secteur n'ont cessé de se renforcer au cours des dernières années. La culture de mollusques bivalves (comme les moules, huîtres, palourdes...) bénéficie quant à elle d'une image positive, mais est confrontée pour certains secteurs à des crises de surmortalités liées à différents agents pathogènes. De plus, des efflorescences d'algues toxiques, comme *Alexandrium catanella*, contaminent les coquillages et peuvent conduire à des interdictions de vente.

Aujourd'hui, l'aquaculture méditerranéenne se caractérise par une diversité de modèles et d'espèces, les principaux systèmes de production méditerranéens étant les suivants :

Pour les poissons : écloseries à terre, cages de grossissement en mer, embouche à partir d'individus capturés dans le milieu naturel (par exemple le thon).

Pour les coquillages : élevage à partir de naissains naturels (en majorité pour les huîtres, et en totalité pour les moules) ou de naissains d'écloserie (pour les huîtres). Le grossissement est réalisé en lagunes ou en mer. Pour certains coquillages, les écloseries supportent une activité d'ensemencement du milieu naturel pour permettre la pêche (cas des palourdes dans le golfe de Gabès).

La production des crustacés, macro-algues et micro-algues¹⁸ est actuellement faible.

En 2008, la consommation moyenne *per capita* de produits aquatiques dans les pays riverains de la Méditerranée était de 18,6 kg/hab. Six pays se situaient au-dessus de cette moyenne, l'Espagne (40 kg/hab.), la France (35 kg/hab.), Malte (30 kg/hab.), l'Italie (24 kg/hab.), la Croatie (23 kg/hab.) et la Grèce (21 kg/hab.). Dans les pays du sud, la consommation annuelle moyenne n'atteint que 9 kg/hab. Les données d'exportations et d'importations pour l'année 2008 donnent une balance commerciale négative pour l'ensemble des pays méditerranéens, d'environ 8,1 millions d'euros, correspondant à un déficit de 2,1 millions de tonnes (Sacchi, 2011).

¹⁸ Les micro-algues sont traitées dans le point III

Une enquête, réalisée par AQUAMED¹⁹ sur le futur de l'aquaculture méditerranéenne à l'horizon 2030, prévoit une augmentation de la production de 1 à 4% par an, dominée par le bar et la dorade, et une diversification avec l'élevage du thon, du maigre, du turbot, des carpes, des tilapias, des espèces herbivores et des algues. Elle prévoit une évolution des systèmes de production pour s'adapter à la demande sociale et environnementale, avec la production de poissons et mollusques en mer ouverte, en circuits recirculés et en systèmes multi-trophiques intégrés. L'aquaculture de repeuplement devrait également augmenter.

Concevoir un usage des biens et des services de la mer Méditerranée contribuant au développement durable de l'aquaculture consiste à encourager un usage responsable et durable des services mobilisés (qualité de l'eau, production de juvéniles/naissain, etc.), tout en optimisant la fourniture des services bénéfiques (aliments, substances d'intérêt, patrimoine culturel, etc.) et/ou qui garantissent la résilience des écosystèmes marins méditerranéens (par exemple l'aquaculture extractive est un puits de carbone).

La principale difficulté de la mise en œuvre de cette approche tient à la complexité des interactions écologiques et sociales. Mobiliser ou soutenir un bien ou un service impacte directement ou indirectement de nombreuses autres composantes du socio-écosystème, pas toujours dans un sens bénéfique, ni nécessairement de manière linéaire et/ou réversible. Une approche intégrée de type écosystémique, qui privilégie les chaînes d'impact courtes et bénéfiques quand cela est possible, est nécessaire pour mieux appréhender les nouveaux usages (FAO, 2010).

A. Mettre en place une bonne gouvernance des systèmes aquacoles

Quand on parle de priorités pour l'aquaculture méditerranéenne, on s'interroge en premier lieu sur les conditions **socio-économiques, de management et de gouvernance** qui détermineront son développement durable et son futur à l'horizon 2030. Une analyse prospective devra permettre d'établir des scénarios, d'évaluer les enjeux de sécurité alimentaire au nord et au sud de la Méditerranée, de localiser les zones de production, de déterminer les modèles économiques (privatisation *versus* cogestion, consommation locale *versus* exportation, etc.) et techniques (espèces, circuits semi-recirculés, recirculés ou *off-shore*, etc.). Cela nécessitera également, pour prévenir les conflits d'usage, le développement de nouveaux outils et méthodes de cogestion raisonnée et démocratique des socio-écosystèmes méditerranéens au sein desquels l'aquaculture sera amenée à se développer.

Si de nombreuses menaces planent toujours sur ce secteur – pollution, conflits d'usage, pratiques illégales, érosion de la biodiversité, salinisation de terres basses, etc. (Courteau, 2011) – les expériences positives restent peu connues et les principes qui ont guidé leur réussite sont encore trop peu enseignés aux niveaux pertinents : écoles, instituts, ministères, agences régionales, syndicats de producteurs, médias et même grand public. Pourtant, divers programmes, notamment européens, ont été déployés avec succès depuis quelques années comme AQUAMED (Marino *et al.*, 2013) dont l'objectif est de développer des moyens pour (1) rendre la connaissance produite par les scientifiques accessible aux acteurs de l'industrie et de la gouvernance et à la société et (2) obtenir des retours de ces différents acteurs vis-à-vis de la recherche. Cette approche doit être complétée par un travail collectif sur les formes optimales de gouvernance afin d'aller vers une harmonisation des bonnes pratiques et la dissémination des réussites en mobilisant notamment les outils mis au point par des programmes européens comme PERSEUS²⁰ ou PEGASO²¹.

¹⁹ Projet européen du 7^{ème} Programme Cadre visant à mettre en place une plateforme multi-acteurs sur la recherche aquacole pour le développement durable de l'aquaculture méditerranéenne (<http://www.aquamedproject.net/>)

²⁰ Policy-oriented marine Environmental Research for the Southern European Seas (<http://www.perseus-net.eu/site/content.php>)

²¹ People for Ecosystem-based Governance in Assessing Sustainable development of Ocean and coast (<http://www.pegasoproject.eu/>)

B. Innover pour des systèmes de production durables

La durabilité des activités imposera de concevoir des **aliments aquacoles innovants**. Cela nécessitera d'identifier les conditions d'emploi et les bénéfices nutritionnels de matières premières alternatives aux farines et huiles de poissons, disponibles localement et obtenues de manière durable : ingrédients végétaux terrestres, algues, levures, champignons et protéines d'organismes unicellulaires (bactéries ou micro-algues), co- ou sous-produits agricoles, insectes, etc. Les conditions climatiques – et en particulier d'ensoleillement – dans les pays du bassin méditerranéen, se prêtent particulièrement bien au développement de ces nouvelles matières premières, en particulier celles provenant de la culture d'organismes autotrophes.

Dans un paysage méditerranéen remarquable par sa biodiversité et ses services écosystémiques, mais aussi menacé par différents types de changement locaux, comme la pollution, et globaux, comme la rareté de l'eau douce, le réchauffement des eaux, la modification du trait de côte, **l'intégration des systèmes aquacoles dans leur environnement** prend une importance particulière. Des technologies innovantes, basées sur la conception et l'amélioration de systèmes économiquement viables et écologiquement performants dans les différents contextes méditerranéens deviennent cruciales. L'aquaculture ne conservera un espace de développement en Méditerranée que si elle sait s'intégrer dans des espaces déjà empruntés pour de multiples activités : pêche, navigation, tourisme, nautisme, sécurité, urbanisation, industrie, extraction pétrolière ou gazière... (Ipemed, 2008 ; Ecorys, 2012). Dans plusieurs sites, d'excellents travaux ont été menés en utilisant des recommandations de divers organismes ayant travaillé sur la durabilité de cette activité comme l'UICN (2007, 2009) ou l'université Dokuz Eylul à Izmir (Yucel Gier *et al.*, 2010).

L'enjeu est ici de promouvoir le développement d'une aquaculture en équilibre, voire en synergie, avec les autres activités existantes ou planifiées (Cahu et Antoine, 2008). Un bon exemple est donné par le golfe de Gabès en Tunisie, où se côtoient presque toutes les activités classiques de la Méditerranée, notamment l'extraction minière (phosphates), pétrolière, gazière, la pêche, l'aquaculture, le tourisme (Djerba) et l'urbanisation (Sfax, Gabès...). Ces questions concernent tout particulièrement :

- La polyculture extensive qui permet d'exploiter de manière optimale les différentes ressources alimentaires disponibles.
- Les systèmes d'élevages intégrés multi-trophiques qui associent des espèces aquacoles extractives à des élevages piscicoles.
- Les systèmes d'élevage en recirculation à bas coût d'énergie qui permettent de traiter les rejets.
- Les fermes en mer ouverte (*off-shore*) et/ou dans des milieux récepteurs capables d'assimiler les matières organiques issues des élevages sans entraîner d'impacts négatifs sur l'écosystème local.

C. Sélectionner et améliorer les espèces élevées

Il est enfin inconcevable de promouvoir de nouveaux systèmes sans disposer des animaux qui leurs sont adaptés. Cet aspect sera crucial pour la culture des bivalves, espèces particulièrement sensibles aux stress environnementaux. Dans les espaces côtiers ou lagunaires où ils sont cultivés, les bivalves sont exposés à des micro-organismes apportés par le bassin versant, aux pathogènes potentiels présents dans le milieu ou à des efflorescences algales toxiques. De plus, dans ces écosystèmes de faible inertie, ils sont confrontés à des changements rapides de température et de salinité et exposés à des xénobiotiques d'origine anthropique. La culture d'espèces et de souches adaptées au climat méditerranéen sera une voie de recherche primordiale pour limiter le stress des animaux et le développement des pathogènes. Concernant les poissons, il s'agira de (1) favoriser le développement de souches respectant les trois fondamentaux de la durabilité (globalement performantes dans un contexte de changement climatique, sobre dans l'utilisation des intrants et minimisant les rejets) ; ceci concerne dans l'immédiat les espèces phares de l'économie méditerranéenne comme le loup et la dorade, mais également à terme toute espèce nouvellement domestiquée, et (2) pour les espèces émergentes, favoriser celles qui permettront de limiter les importations de stocks ou d'espèces exogènes aux zones d'élevages et/ou à la Méditerranée. Enfin, pour les deux catégories et dans un souci d'innocuité vis-à-vis de la biodiversité autochtone, il s'agira de réduire leur capacité de survie ou de reproduction dans le milieu naturel (stérilisation) pour limiter les interactions entre les espèces élevées, qu'elles soient natives ou non, et les populations sauvages.

Ces objectifs seront atteints par **une meilleure compréhension des mécanismes qui sous-tendent l'adaptabilité des organismes élevés et leur développement sexuel** et notamment :

- L'architecture génétique des caractères de productivité, de santé et de bien-être, d'efficacité alimentaire et/ou d'adaptation aux aliments alternatifs contenant des proportions réduites de farines et d'huiles de poissons.
- La description des mécanismes physiologiques et génétiques à la base du déterminisme du sexe, de la reproduction et des capacités de survie.
- La détermination des bases biologiques de la domestication (sur stocks fermés) : ce point concerne plus particulièrement les espèces émergentes (citées en introduction) et d'une manière plus globale toutes celles dont les stocks sont mis à mal par la surpêche en Méditerranée et dont l'élevage pourra être maîtrisé.
- Des approches d'ingénierie microbiologique pourront éventuellement permettre d'adapter le système digestif de certains poissons élevés à la consommation d'aliments d'origine végétale.

III. Vers des biotechnologies “bleues” innovantes

Les services écosystémiques fournis par les environnements marins sont bien moins étudiés que leurs équivalents terrestres. Il y a à cela deux raisons. La première est d'ordre culturel : historiquement, des activités comme la pêche et la conchyliculture sont profondément ancrées dans les traditions des pays méditerranéens, contrairement à l'utilisation d'autres ressources marines, telles que les algues. Le deuxième aspect est d'ordre technique, lié aux difficultés d'observation, d'échantillonnage ou d'exploitation des ressources maritimes.

La recherche et l'exploitation de nouvelles ressources marines, devenues essentielles pour faire face à l'accroissement démographique, sont désormais facilitées par les avancées techniques récentes. Durant la dernière décennie, l'intérêt pour les nouvelles ressources marines s'est rapidement accru, notamment en raison des enjeux énergétiques, au premier rang desquels la nécessité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Ainsi, le premier projet européen de production de biocarburants à partir d'algues a été lancé dans les années 2000 (projet ANR Shamash²²), tandis qu'au même moment se formait un consortium regroupant agences nationales, entreprises et collectivités territoriales, avec comme objectif d'élaborer un livre blanc sur les énergies marines : l'Initiative partenariale nationale pour l'émergence des énergies marines (IPANEMA).

Mais les services potentiellement rendus par les écosystèmes marins vont bien au-delà de la seule fourniture d'énergie. L'Europe présente un fort potentiel de développement en matière de « biotechnologies bleues », axées sur les ressources vivantes et renouvelables marines, dans de nombreux domaines d'application. On peut notamment citer :

- l'utilisation d'organismes et de microorganismes marins, ou partie de ceux-ci, comme matière première (par exemple pour la production d'aliments, de carburants, de matériaux ou de composants bioactifs) ;
- l'utilisation de produits extraits ou dérivés des organismes marins ;
- le développement en laboratoire de produits issus de la connaissance des procédés ou des propriétés des organismes marins (dont les produits obtenus à partir d'ADN par génie génétique ou biologie synthétique) ;
- la génération de produits catalysés par les organismes marins ;
- la fourniture de services écosystémiques (par exemple des biocapteurs, des procédés de bioremédiation, de réduction d'émission de CO₂, d'ingénierie écologique...).

La disponibilité et la durabilité des ressources marines peut être affectée par les effets directs et indirects du changement climatique (augmentation de la température et acidification de l'eau, risque de déséquilibres dans la composition spécifique des communautés...) et par les impacts des activités humaines : pollutions *in situ* (effluents des bateaux, des ports, rejets d'aliments, d'excréments et de déchets par les fermes aquacoles) ; pollutions d'origine continentale (inondations et déversements fluviaux) ; perturbations des écosystèmes à cause de la surpêche ; concentration de composants toxiques ou de polluants dans la biomasse algale ou animale.

²²<http://www-sop.inria.fr/comore/shamash/>

Par ailleurs, davantage de connaissances fondamentales devront être acquises et certaines barrières technologiques devront être levées pour permettre le développement durable des biotechnologies marines :

- une meilleure connaissance et compréhension des environnements marins, de leur biodiversité et des capacités de résilience des services qu'ils fournissent (dont l'absorption de CO₂), ainsi que des espèces invasives et de leur valeur ajoutée potentielle pour les populations du pourtour méditerranéen ;
- l'identification et l'isolement de nouvelles espèces ou souches et le développement de collections ouvertes (Ulukan, 2011), grâce aux méthodes d'isolement innovantes à haut débit ;
- le développement de nouveaux outils génomiques pour l'identification des voies métaboliques ;
- la conduite de travaux en laboratoire pour explorer et améliorer les propriétés physiologiques des souches et le développement d'approches de modélisation pour analyser, optimiser et prédire l'efficacité des processus et les rendements ;
- le développement de procédés de production rentables et le couplage des systèmes de production et de traitement des eaux usées.

A. Isoler et décrire les souches d'intérêt

Choisir les souches les plus appropriées selon l'exploitation envisagée constitue la première étape du processus et un élément déterminant : elles doivent naturellement produire des hauts niveaux de molécules cibles tout en étant robustes, à croissance rapide et capables de s'adapter aux conditions d'exploitation prévues. L'isolement et l'identification de nouvelles souches devraient procurer une plus large gamme de choix possibles ; les recherches expérimentales sur leur potentiel de croissance et de production de composants valorisables aideront ensuite à mettre en évidence les organismes les plus adaptés à chaque processus.

Les difficultés liées à l'accès aux ressources marines et à leur identification pourraient être résolues par le développement de méthodes efficaces de culture de microorganismes marins, dont les microalgues, les actinomycètes, les champignons et bactéries marines, qui n'ont pour l'instant pas encore été cultivés. Des approches génomiques et métagénomiques permettront de s'affranchir de la nécessité de cultiver les souches originelles, en utilisant de nouveaux hôtes microbiens capables de synthétiser de nombreux composés en conditions de culture industrielle.

Les espaces marins méditerranéens offrent une grande diversité d'habitats (lagunes, estuaires, côtes rocheuses ou sableuses, mer ouverte) qui abritent une riche diversité d'organismes microbiens, d'intérêt économique potentiel, comme en témoigne l'installation sur le littoral méditerranéen d'entreprises privées prospectant les espèces marines (Greensea ou Pierre Fabre, par exemple). Le climat méditerranéen est particulièrement favorable aux microorganismes à croissance rapide, permettant la découverte de nouvelles espèces originales telles qu'*Ostreococcus tauri*, la plus petite cellule eucaryote, présentant un fort intérêt biotechnologique.

Encadré 7 : Ressources et services susceptibles de se développer significativement dans les vingt prochaines années

Depuis l'origine de l'humanité, la nature contribue à fournir aux humains des traitements contre les maladies et des sources de médicaments. Les biotopes marins, couvrant près des trois quarts de la surface de la planète, constituent potentiellement un gisement de telles molécules actives. Les produits naturels d'origine marine jouent ainsi un rôle croissant dans la recherche biomédicale et le développement pharmaceutique, soit directement en tant que médicaments, soit comme structures de base pour la synthèse chimique de molécules biomimétiques (Molinski *et al.*, 2009).

Bien que de nombreux produits naturels d'origine marine aient déjà fait l'objet d'essais cliniques (Newman et Cragg, 2004), on a assisté ces dernières décennies à une diminution du taux d'identification de nouveaux composés à partir de macro-organismes marins. Ceci a conduit les pharmacologues à se tourner davantage vers des ressources moins étudiées, telles que les champignons, les algues ou les bactéries marines, vaste réservoir de diversité métabolique encore à exploiter pour faire face à une demande croissante de composés actifs pour les cosmétiques, les médicaments, les produits de chimie fine et les produits de soins personnels fonctionnels (Andersen et Williams, 2000).

Les **phototrophes unicellulaires** (principalement microalgues et cyanobactéries) représentent l'essentiel de la production primaire des systèmes aquatiques et la moitié de la production primaire planétaire. Ces organismes ont l'avantage d'avoir une plus grande efficacité photosynthétique que les organismes phototrophes terrestres (Wijffels *et al.*, 2010), allant de pair avec des taux de production de biomasse supérieurs à ceux des plantes. De plus, leur production ne mobilise pas de terres agricoles ni d'eau potable. Leur plasticité métabolique facilite le contrôle de la bioproduction de molécules spécifiques (par exemple des acides gras, des pigments, des antioxydants, des protéines, des glucides...) et leur culture dans des milieux spécifiques (bioréacteurs, lagunes d'élevage) permet une maîtrise de la production et une récolte en continu. Enfin, le climat méditerranéen est particulièrement adapté à la culture de microalgues à grande échelle. Ces organismes sont donc de bons candidats pour la production de biocarburants, même si de nombreuses contraintes techniques doivent encore être levées pour atteindre une production économiquement viable. L'exploitation des organismes phototrophes unicellulaires peut être étendue à une variété d'autres domaines environnementaux et économiques, tels que la santé, la cosmétique, l'alimentation humaine et animale, la capture de CO₂...

Les **microorganismes** (bactéries et champignons) représentent une autre source prometteuse de produits naturels, en permettant la production de grandes quantités de métabolites secondaires à un coût raisonnable, par culture à grande échelle et fermentation des organismes sources. Pour s'adapter et survivre en milieu marin, ces microorganismes produisent parfois des métabolites secondaires bioactifs uniques d'un point de vue structurel, qu'on ne retrouve pas chez leurs homologues terrestres (Bhakuni et Rawat, 2005). Les récentes avancées des technologies « omiques » permettent d'explorer ce potentiel au sein de la riche biodiversité de la mer Méditerranée. Cependant, la maîtrise de la culture de ces organismes constitue encore un enjeu majeur pour le futur.

Les **macroorganismes** restent une source importante de biocomposés destinés à différents usages, allant des composants alimentaires (comme l'agar extrait des macroalgues) aux usages industriels et médicaux (tels que le sang et la chitine de limule, utilisés respectivement pour la production de tests bactériologiques et de matériel de suture). D'autres organismes marins originaires de la mer Méditerranée sont utilisés pour le développement de nouveaux usages à partir de biocomposés marins tels que les polysaccharides et les chitines. A titre d'exemple, des méduses sont d'ores et déjà récoltées pour produire du collagène, de la fibrilline et de la mucine, entrant dans des applications cosmétiques et médicales. L'exploration de nouveaux usages à partir de macroorganismes susceptibles de devenir prépondérants dans le futur devrait être encouragée.

B. Développer des technologies de pointe

La complexité de la culture d'organismes vivants demande des recherches multidisciplinaires, pour relever le défi d'élaborer des processus à énergie positive. Des approches fondamentales et appliquées, combinant des disciplines de terrain, de laboratoire et de modélisation, doivent être encouragées. Notamment, des études de photophysologie et d'écophysologie devraient se révéler particulièrement pertinentes.

Les rendements de production de biomasse en conditions industrielles dépendent fortement de l'efficacité des processus photosynthétiques. Dans cette réaction d'oxydoréduction contrôlée par la lumière, le CO₂ ambiant est capté et transformé en biomasse, en produisant de l'oxygène. Le rendement photosynthétique maximal atteint en culture algale est de l'ordre de 4–5% seulement (Masojidek *et al.*, 2013), des recherches innovantes sont donc nécessaires pour, d'une part, mieux exploiter l'énergie solaire non utilisée et, d'autre part, réduire les coûts de production.

En environnement naturel, les rendements photosynthétiques peuvent être facilement évalués par fluorimétrie PAM (*Pulse Amplitude Modulated*). Bien que des progrès aient été récemment accomplis pour relier transport d'électrons et fixation du carbone (Napoleon *et al.*, 2012), il reste du chemin à parcourir pour comprendre pleinement les liens entre ces deux processus et être en mesure de les intégrer dans les modèles de productivité.

Lorsque l'on explore l'efficacité photosynthétique de souches sélectionnées, les études sont généralement menées sur des cultures exposées à la lumière blanche, ce qui diffère notablement des conditions d'exposition des systèmes de culture à échelle industrielle en extérieur. Des différences d'efficacité photosynthétique risquent donc de se produire lors du changement d'échelle, en passant du laboratoire au pilote industriel.

L'influence de l'hydrodynamique est telle que, que ce soit en bioréacteur (Posten, 2009) ou en bassin (Bernard *et al.*, 2013), le régime lumineux auquel sont soumises les algues est sujet à de fortes variations. L'influence conjointe des conditions de forçage hydrodynamique et d'éclairement sur la croissance doit être mieux cernée. En particulier, la mise en œuvre de modèles hydrodynamiques 3D constitue l'un des obstacles à surmonter. De telles études permettront de mieux comprendre les liens entre productivité et conditions d'agitation du milieu. Dans les cultures industrielles, en bassin notamment, une telle information aiderait grandement à définir la vitesse de rotation optimale à appliquer aux roues à aubes.

De la même manière, d'autres facteurs environnementaux tels que la température ou la disponibilité en éléments nutritifs jouent également un rôle important sur les réponses physiologiques des cultures, à court et moyen terme. La disponibilité en nutriments, par exemple, gouverne la synthèse de pigments et affecte de ce fait la réponse photosynthétique. Comprendre comment les fluctuations de l'environnement physico-chimique affectent le fonctionnement physiologique est particulièrement important pour maintenir des conditions de croissance optimisant un processus (production de sucres ou de lipides, par exemple), en maximisant la productivité tout en minimisant l'énergie nécessaire au fonctionnement du système. Ceci est particulièrement vrai dans le contexte du climat méditerranéen, hautement variable.

Si l'accumulation de biomasse constitue un pré-requis pour la production de produits valorisables, les procédés en aval, tels que la récolte, l'extraction des composés cibles, le recyclage de l'eau, etc., peuvent également présenter des problèmes de rendement, d'efficacité énergétique et d'impact environnemental.

C. Réduire les coûts de production et réaliser des économies d'échelle

Le développement de procédés industriels basés sur les biotechnologies marines, préservant la biodiversité et l'équilibre des écosystèmes, est un enjeu majeur des décennies à venir pour les pays méditerranéens. Une meilleure connaissance de la dynamique de ces écosystèmes est nécessaire, aux échelles correspondant aux procédés envisagés.

En ce qui concerne les cultures conduites en milieu terrestre, les futurs développements devront concilier surfaces disponibles (par exemple : étangs naturels, marais salants et salines...) et proximité des sources d'eau salée, des usines de traitement des eaux, des industries émettrices de CO₂... L'impact que pourraient avoir des telles cultures industrielles sur les zones humides avoisinantes est encore méconnu.

Pour une amélioration de leur rentabilité, les biotechnologies bleues devront se doter d'approches communes, multidisciplinaires, pour tester des modes de production innovants permettant l'accroissement des rendements et/ou la réduction des coûts de production, tout en satisfaisant aux évaluations d'impact environnemental et aux analyses de cycle de vie. Réduire les coûts d'opération implique une bonne connaissance de la physiologie cellulaire pour optimiser l'énergie introduite dans le système. La sensibilité des souches sélectionnées à la température et à la lumière peut limiter la production durant certaines périodes de l'année, imposant ainsi des contraintes supplémentaires à la rentabilité globale du système. L'amélioration des procédés doit être recherchée à toutes les étapes de production, *via*, par exemple, la mise au point de dispositifs de culture innovants, la réutilisation des déchets, l'accroissement de la fraction utile de l'énergie solaire... Des solutions telles que le couplage de systèmes autotrophes et hétérotrophes, permettant une diminution des déchets et des gains énergétiques, sont à prendre en considération.

La plupart des études sur les procédés sont réalisées à l'échelle du laboratoire, dans des conditions étroitement contrôlées. Des tests à des échelles plus vastes constituent une étape indispensable avant de passer à l'industrialisation ; cependant, la représentativité des conditions obtenues en phase pilote reste un des obstacles à franchir. Des études de modélisation peuvent s'avérer particulièrement adaptées pour explorer des scénarios de production plausibles, et aider ainsi à la formulation de stratégies de production et décisionnelles.

D. Prendre en compte les aspects réglementaires

Actuellement, le développement de quelques activités industrielles devance l'élaboration des réglementations appropriées. Par exemple, la culture de cyanobactéries et les procédés associés, principalement situés sur la côte méditerranéenne française, souffre d'un manque de contrôle et de caractérisation sur des bases légales (par exemple en ce qui concerne la récolte ou les modes de production, ou les procédures pour obtenir un label biologique). Des efforts communs devront être déployés pour permettre la mise au point de standards et de réglementations dans ce domaine. Dans la mesure où de plus en plus de PME se lancent dans l'exploitation des

biotechnologies bleues, des partenariats avec les laboratoires de recherche, incluant le nécessaire transfert de technologie, devront être encouragés.

Gardant à l'esprit que les bénéfices issus de l'exploitation des organismes méditerranéens, qu'il s'agisse d'exploitation de longue date ou d'organismes récemment découverts, tombent dans le champ du protocole de Nagoya ; le défi pour le futur est donc de favoriser les biotechnologies bleues innovantes tout en respectant les objectifs de partage des bénéfices. Un tel équilibre peut s'avérer difficile à atteindre pour des applications industrielles. La question de la brevetabilité des organismes, par exemple, est loin d'être simple, rendant particulièrement complexe l'application du protocole de Nagoya.

IV. Développer l'éco-ingénierie et le génie écologique pour réduire l'impact des activités et aménagements humains en Méditerranée

A. Générer les connaissances nécessaires au génie écologique

L'ingénierie écologique marine et le génie écologique vont être amenés à se développer. L'ingénierie écologique peut être définie comme l'utilisation, le plus souvent *in situ*, parfois en conditions contrôlées, de populations, de communautés ou d'écosystèmes dans le but de modifier une ou plusieurs dynamiques biotiques ou abiotiques de l'environnement dans un sens réputé favorable à la société et compatible avec le maintien des équilibres écologiques et du potentiel adaptatif de l'environnement. Le génie écologique regroupe les activités d'étude et de suivi, de maîtrise d'œuvre et les travaux favorisant la résilience des écosystèmes et s'appuyant sur les principes de l'ingénierie écologique. Cette dernière se développe rapidement en tant que filière émergente sur le milieu côtier. Cette démarche implique l'intégration de différentes disciplines. Elle s'est principalement développée en milieu continental, mais devrait faire l'objet d'efforts de développement en zone méditerranéenne car celle-ci, « *hot spot* » de biodiversité, subit des contraintes particulièrement fortes. La finalité de ce domaine est de trouver un équilibre pérenne entre le maintien des usages et/ou activités anthropiques et la préservation de la biodiversité.

La généralisation des approches basées sur l'ingénierie écologique amène de nombreuses questions, dont les réponses dépendent fortement du milieu géographique et en particulier des spécificités du milieu méditerranéen : quels sont les mécanismes qui amènent des différences dans le peuplement des habitats naturels et artificiels, comment les identifier et comment les maîtriser ? Dans quelles mesures un ouvrage artificiel peut-il créer un nouvel habitat et un nouvel écosystème favorable aux espèces ? Quel est l'effet du peuplement des habitats artificiels sur les habitats naturels environnants et sur l'apparition d'espèces exotiques ?

B. Mobiliser et encadrer les acteurs de l'éco-conception et de la co-conception

L'accroissement de la population et sa concentration sur les côtes, le développement de l'activité économique en bord de mer Méditerranée, la protection contre l'érosion marine associée aux enjeux climatiques, la maintenance des ouvrages existants, la meilleure prise en compte des enjeux écologiques, vont nécessiter de nombreux aménagements maritimes qui ne feront pas appel aux mêmes techniques de construction en réhabilitation, en neuf portuaire ou en génie côtier.

Aujourd'hui encore, la construction d'ouvrages portuaires ou d'aménagements côtiers répond essentiellement à des fonctions techniques ou de protection du littoral, avec un objectif de maîtrise des coûts. De plus, la situation actuelle des marchés publics en matière d'aménagements côtiers ne permet pas une prise en compte suffisante de l'innovation : la tendance lourde est encore de retenir les offres les moins-disantes. Cependant cette situation évolue rapidement, tant en France que dans beaucoup de pays développés, sous l'influence de deux leviers :

- le renforcement réglementaire favorable à la protection de la biodiversité côtière et des écosystèmes littoraux dans les travaux d'aménagement ainsi qu'à la restauration des fonctionnalités naturelles ;

- l'engagement volontaire des parties prenantes (Etats, institutions, acteurs économiques), en lien avec les principes du développement durable, qui peuvent affecter ce secteur d'activités.

Ce second levier est – et sera à l'avenir – le plus important car les maîtres d'ouvrages et les maîtres d'œuvre voient, dans l'intégration des « briques » écologiques dans les projets, la façon d'éviter des retards dans les plannings voire des interdictions de travaux au cours du processus d'obtention des autorisations, notamment lors de la phase des enquêtes publiques.

Afin de promouvoir ce type de démarches, les pistes suivantes doivent être approfondies :

- Développer une **réflexion critique en aménagement des territoires côtiers** incluant la dimension écologique, créer des partenariats pour des projets vertueux : comment minimiser ou inverser l'impact écologique des aménagements côtiers, des infrastructures dédiées à de nouvelles filières ou besoins pour un environnement donné en concevant ces ouvrages avec une approche intégrée et réaliste ? Comment prévoir et quantifier *a priori* les effets positifs (y compris financiers) de l'éco-conception en comparaison d'une conception classique ? Comment optimiser la co-conception d'aménagements à usages multiples ?
- Analyse stratégique de **la mobilisation des acteurs** (maîtres d'ouvrages essentiellement publics, maîtres d'œuvres industriels, bureaux d'étude, laboratoires) dans les aménagements côtiers en France et dans les pays méditerranéens, ainsi que les interrelations entre ces acteurs et les approches « marché » actuelles et à venir, au vu des aspects réglementaires et de développement durable favorables à la filière :
 - Existe-t-il un engagement volontaire des politiques publiques en matière de protection des écosystèmes et de développement durable ? Comment les décideurs publics affichent-ils leur volonté en matière de développement durable et de responsabilité sociétale dans leurs principales déclarations de politiques publiques applicables à la problématique littorale ?
 - Y a-t-il un engagement volontaire au niveau de l'offre ? Notamment, y a-t-il des commandes vers des prestataires de travaux spécialisés en génie écologique côtier par rapport à une mise en œuvre « *business as usual* » des chantiers ?
- Quels sont les **moyens juridiques** d'encadrement des aménagements littoraux pour une construction dite « responsable » ? Actuellement, l'indépendance des législations sectorielles a pour effet de ne pas encourager, d'un point de vue juridique, une architecture intégrée et davantage en harmonie avec les objectifs de qualité paysagère côtière. La communauté méditerranéenne pourrait se voir proposer la création d'un label « côte bleue » mettant en valeur la requalification écologique des aménagements ou la démarche d'éco-conception.

Encadré 8 : Eco-conception : principes et mise en œuvre opérationnelle

L'éco-conception se définit comme le processus intégré au sein de la conception et du développement, qui vise à réduire les impacts environnementaux et à améliorer en permanence la performance environnementale des produits tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie.

Il existe une littérature relativement abondante impliquant cette approche dans le cas des constructions entièrement dédiées au repeuplement rapide telles que les récifs artificiels²³ (Baine, 2001), sa prise en compte dans les projets d'infrastructures maritimes est récente (Bulleri et Chapman, 2010). Cependant, seule une publication traite spécifiquement la question avec une vision conceptuelle générale et expose également un projet « réel », illustrant la faisabilité technique de ce nouveau modèle d'ingénierie (Firth *et al.*, 2014). Nous pouvons néanmoins noter quelques actions et réalisations récentes qui abordent ce problème :

Le projet européen THESEUS²⁴, dont un des aspects visait à optimiser les ouvrages de défense côtière tout en conservant la biodiversité (Pioch *et al.*, 2011), le projet ECOSHAPE²⁵ (De Vriend et Van Koningsveld, 2012), qui a permis de développer des éco-bétons dans des ouvrages de type brise-lame dans le port de Ijmuiden au Pays-Bas, ou encore la compagnie israélienne SeArc (*Seascape architecture*) qui propose des éco-bétons²⁶.

La filière du génie écologique côtier en Méditerranée dans une approche de développement durable – GECMEDD – émerge rapidement depuis 2010. Celle-ci s'inscrit dans l'évolution du contexte politique, réglementaire et sociétal de la prise en compte de la biodiversité et des services écosystémiques au niveau national comme aux niveaux européen et international. Un ensemble de textes communautaires encadre les enjeux et évolutions réglementaires : Convention de Barcelone, Directive cadre sur l'Eau (DCE), Directive Habitats, faune et flore (DHFF), Directive Oiseaux (DO), Directive cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM), Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC), Stratégie européenne du Développement durable (préservation de la biodiversité marine et terrestre et de la qualité des milieux). A l'appui de l'émergence de cette filière en France, une dizaine de projets sont en cours dans des contextes divers, labellisés par le Pôle Mer Méditerranée et co-financés par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse.

L'éco-conception peut s'appliquer à bien d'autres domaines pour réduire la pollution et les impacts des activités humaines en mer Méditerranée (réduction des pollutions sonores et lumineuses, prévention du transport d'espèces exotiques, nouveaux procédés de dépollution...), mais des mesures d'ordre réglementaire sont nécessaires pour stimuler la R&D dans ce domaine et l'adoption de telles démarches par les donneurs d'ordre.

Enfin, une autre évolution est à souligner : l'intégration de fonctions supplémentaires dans les ouvrages côtiers ou plus au large, en plus de la fonction principale (co-conception) : par exemple la production d'énergie renouvelable (récupération de la houle, pompes à chaleur eau de mer...), les systèmes aquacoles, les récifs artificiels...

²³ projet RECIF, Programme européen de coopération transfrontalière INTERREG IV A, <http://www.recif-project.eu>

²⁴ *Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate* - <http://www.theseusproject.eu/>

²⁵ « *Building with Nature* » - <http://www.ecoshape.nl/>

²⁶ <http://www.econcretetech.com>

Partie 4 : Evaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages

La mer Méditerranée est un espace partagé par de nombreux pays riverains, traversé et exploité par ces pays et des tierces parties. C'est encore un espace disputé, avec des tensions entre les usagers et des compétitions sur les ressources biologiques. Cette exploitation et ces tensions associées sont vouées à croître dans le futur, avec l'augmentation de la population autour du bassin. Malgré la longue histoire des pratiques d'exploitation mais aussi de gestion de ces ressources par les civilisations méditerranéennes, la mise en œuvre opérationnelle et l'efficacité des mesures de gestion actuelles apparaissent souvent déficientes, quand elle sont évaluées (par exemple, gestion largement monospécifique des pêcheries, disposition sous-optimale des Aires Marines Protégées – AMP). Qui plus est, ces évaluations sont difficiles et donc rares, en particulier dans certaines zones de la Méditerranée. Il est donc impératif d'identifier les points forts et les points faibles des dispositifs de gestion actuels en Méditerranée, dans le but de les améliorer. Pour ce faire, il faut commencer par multiplier les évaluations afin de fournir des points de référence, quand ils n'existent pas encore, ou de quantifier le changement des systèmes par rapport à des points de référence passés.

Les mesures de gestion de l'espace méditerranéen sont souvent délimitées dans l'espace. Cela s'explique par une certaine praticité : il est plus facile de contrôler un espace géographique défini, telle qu'une AMP par exemple. Cette spatialisation est également le reflet de la spatialisation de la gouvernance : la Méditerranée est divisée entre les Etats, les régions, les zones économiques, etc. Il semble cependant qu'un facteur primordial de l'efficacité des mesures de gestion soit la compatibilité de leur échelle spatiale avec celles des usages et des ressources qu'elles tentent de réguler. Ces constats suggèrent des opérations de recherche par étapes, avec une focalisation sur l'aspect spatial.

Il faut **définir les échelles de structuration spatiale et temporelle de la biodiversité, des habitats et du fonctionnement des écosystèmes**. Sans cette connaissance de base, l'évaluation est impossible.

En parallèle, il faut **recenser et cartographier les usages que les populations riveraines font de ces écosystèmes et la gouvernance qu'elles y exercent**. Ces données sont également indispensables à l'évaluation des dispositifs existants.

Enfin, il faut **analyser de façon critique les mesures de gestion actuelles, notamment au regard de la congruence des échelles de structuration des ressources, des usages et de la gouvernance**. Cette analyse a vocation à identifier les raisons du succès ou de l'échec des dispositifs de gestion et à proposer des améliorations. Ces améliorations ne pourront être pertinentes que si elles prennent en compte les changements globaux auxquels est soumise la Méditerranée.

Les sciences naturelles sont appelées à contribuer à l'évaluation des performances environnementales des mesures de gestion vis-à-vis des objectifs affichés. Les sciences économiques et sociales sont sollicitées pour analyser les effets et conséquences des mesures de gestion sur les activités concernées et, plus largement, sur les sociétés. L'éclairage des sciences politiques et juridiques pourra mettre en lumière, à travers une approche empirique, l'articulation et les portées des dispositifs de gouvernance et des instruments de gestion, en croisant échelles opérationnelles, d'observation et d'analyse. Toutefois, sachant que les cadres de l'action en mer des Etats riverains de la Méditerranée ne sont pas encore devenus ceux d'une gouvernance scientifique écologique (même en matière de pêche), et restent toujours ceux issus des raisonnements usités en droit de la mer (gouvernance juridique), il convient de compter avec ceux-ci.

Un projet de recherche idéal couvrirait l'ensemble des étapes de cette démarche, associant les expertises des sciences biologiques, économiques, sociales, juridiques, etc. Cependant, le manque de connaissance est suffisamment important dans chacun des domaines pour que des projets de recherche plus « disciplinaires » pertinents puissent être développés dans chacun des points cités ci-dessus.

I. Identifier les échelles spatio-temporelles de fonctionnement des écosystèmes en croisant distribution et connectivité des habitats

La durabilité du fonctionnement d'un écosystème repose sur la persistance d'au moins une partie des espèces et des habitats qui le composent, formant un sous-ensemble que l'on peut nommer la communauté fonctionnelle. Les fonctions écosystémiques qu'assure cette communauté fonctionnelle sont souvent celles que l'homme exploite (aussi appelées services écosystémiques) et dont le maintien est l'objectif des mesures de gestion. Sans même parler d'exploitation, ces fonctions sont nécessaires au maintien de l'écosystème lui-même, le cadre de gestion peut alors être purement destiné à la conservation.

En amont de toute pression d'usage, la persistance d'une espèce implique qu'elle puisse accomplir un cycle de vie complet en maintenant son abondance (renouvellement générationnel). En milieu marin, la plupart des espèces présentent un cycle de vie complexe, occupant des habitats distincts à différents stades de leur vie.

L'exemple typique est fourni par les espèces benthiques et démersales dont les adultes sont relativement sédentaires et inféodés à un habitat, plus ou moins fragmenté et dont les larves sont dispersées dans la colonne d'eau. Ce sont principalement ces larves qui assurent alors la connectivité entre les populations adultes fragmentées. Même dans le cas d'espèces plus mobiles à l'âge adulte (poissons pélagiques, mammifères marins, etc.) la reproduction est souvent inféodée à un habitat, dit alors « habitat essentiel ». Dans tous les cas, la survie des larves dépend elle aussi de l'existence et de l'accessibilité d'un habitat pélagique favorable.

Ainsi, les échelles spatio-temporelles du fonctionnement d'un écosystème peuvent être définies par les échelles des habitats successifs occupés, au cours de leur cycle de vie, par les individus des espèces formant la communauté fonctionnelle et les échelles des transferts d'individus entre ces habitats (connectivité), permettant le maintien de cette communauté. L'identification des échelles spatio-temporelles du fonctionnement d'un écosystème repose donc sur trois piliers :

- l'identification de la **communauté fonctionnelle d'un écosystème**, ce qui nécessite à la fois des connaissances sur le fonctionnement de ces communautés (composition spécifique, relations trophiques) et sur leur distribution spatio-temporelle (écorégionalisation, voir partie 1) ;
- l'identification des **habitats des espèces** formant la communauté fonctionnelle aux différents stades de leur cycle de vie ;
- l'identification des **transferts d'individus entre ces habitats** (connectivité) ;

et sur l'intégration de ces trois piliers dans des modèles démographiques mécanistiques pour évaluer la persistance de ces communautés fonctionnelles et éventuellement tester l'impact de plusieurs scénarios de conservation.

A. Identifier la communauté fonctionnelle des écosystèmes

Tout d'abord, la définition même de la communauté fonctionnelle d'un écosystème est duale et recouvre à la fois :

- la communauté fonctionnelle définie *a minima* par les espèces (et leur abondance relative) qui doivent être présentes pour que la communauté persiste dans le temps (démographiquement) ;
- la communauté fonctionnelle définie de façon plus élargie par les espèces qui doivent être présentes pour que l'écosystème continue à assurer les fonctions qui lui sont propres à un niveau satisfaisant (notion de « *Good Ecosystem Health* » de la DSCMM, « *Ecosystem Approach* » – EcAp – du Plan d'Action pour la Méditerranée et « *Ecosystem Health Index* »).

Dans les deux cas, il est nécessaire de définir une approche à la fois conceptuelle et méthodologique afin de définir ces communautés fonctionnelles en pratique.

Cependant, ces deux définitions de la communauté fonctionnelle reposent sur une analyse de la composition des assemblages d'espèces. Malgré certains efforts récents, les inventaires spatialisés de l'abondance des espèces et des habitats ainsi que les modèles conceptuels de fonctionnement des écosystèmes font défaut. Ils constituent pourtant une première étape indispensable afin d'identifier les communautés fonctionnelles des écosystèmes marins.

En matière de **collecte de données**, l'accent doit en particulier être mis sur les zones sous-échantillonnées, c'est-à-dire :

- la zone mésopélagique ;
- les fonds à grande profondeur ;
- les fonds côtiers de substrats durs ;
- le bassin levantin (bassin est) ;
- les zones à proximité des côtes méridionales (d'Afrique du Nord) ;
- les groupes taxonomiques sous-échantillonnés, en particulier ceux correspondant à des espèces non-exploitées ou difficiles à échantillonner (les espèces planctoniques par exemple).

L'inventaire de la biodiversité est indispensable pour permettre une gestion à visée conversationniste. En effet, la Méditerranée est caractérisée par une forte biodiversité (7% de la biodiversité marine globale ; Bianchi et Morri, 2000), un fort endémisme (17 000 espèces à haut degré d'endémisme selon Coll *et al.*, 2010) et la présence de nombreuses espèces patrimoniales pour les populations (telles que le mérout, le thon rouge, les gorgones, les herbiers de posidonies, etc.). La collecte des données doit reposer sur des stratégies d'observation spatialisées multi-échelles permettant d'identifier les échelles spatiales des communautés fonctionnelles.

Concernant la mise en place de modèles conceptuels de fonctionnement des écosystèmes, les travaux futurs pourront se baser sur ceux récemment mis en œuvre par la communauté française dans le cadre de la DCSMM. Cette méthodologie repose sur une démarche transversale, regroupant l'ensemble des acteurs (scientifiques, experts et utilisateurs). Elle propose des modèles conceptuels pour chaque écosystème (défini ici comme un habitat : coralligène, herbier de posidonie, pelagos, substrat meuble, grotte). Elle permet de noter ces écosystèmes, d'évaluer

les pressions anthropiques qu'ils subissent, et de recenser les paramètres utilisés. A chaque étape du processus, la variabilité spatiale et temporelle est prise en considération. La mise en place du système d'évaluation de la structure et du fonctionnement des compartiments biologiques (choix des paramètres, indice de confiance...) repose sur les connaissances des experts scientifiques, mais dépend également de la pondération de chaque compartiment dans le modèle. Le modèle est ensuite évalué pour différents secteurs géographiques. Ce type d'approche écosystémique pourrait donc être encouragé, en particulier en se basant sur des écorégions (voir partie 1) et non plus sur des habitats.

Enfin, le manque de modèles conceptuels pour décrire le fonctionnement des écosystèmes est principalement dû à un manque de connaissance des **traits d'histoire de vie** minimum (l'espérance de vie ou le taux de survie, le taux de fécondité, le succès du recrutement, la fréquence de la reproduction et l'âge de la maturité sexuelle) et sur les **interactions fonctionnelles entre espèces**. Dans le milieu marin, ces traits sont encore inconnus pour la grande majorité des espèces non exploitées, ce qui constitue un verrou initial à toute évaluation du fonctionnement. L'estimation de ces traits d'histoire de vie pour des espèces cibles doit donc aussi être encouragée et soutenue, en particulier si elle a lieu dans un cadre conceptuel précis (par exemple pour la mise en place de modèles démographiques spécifiques).

Afin d'identifier les communautés fonctionnelles des écosystèmes, trois verrous ont donc été identifiés : (i) le manque de méthodologies pour identifier les communautés fonctionnelles, (ii) le manque de données spatialisées, (iii) le manque de modèles conceptuels pour décrire le fonctionnement.

B. Identifier les habitats des espèces formant la communauté fonctionnelle aux différents stades de leur cycle de vie

Une fois les communautés fonctionnelles identifiées, il faut caractériser les habitats des différents stades de développement des espèces formant ces communautés et décrire leur localisation spatio-temporelle. Ceci nécessite alors deux étapes : définir ce qu'est un habitat et mesurer la qualité de cet habitat.

En effet, l'étape de définition d'habitat n'est pas triviale dans le cas général. La définition d'un habitat est certes relativement simple pour des zones côtières et pour les phases sédentaires (zone facile d'accès, stade de vie facilement observable et cartographiable). En revanche, la définition d'habitat devient ardue (bien que primordiale) pour les espèces non-sédentaires et pour la phase larvaire planctonique des espèces sédentaires. L'un des problèmes centraux est alors la définition d'habitats pélagiques.

Afin d'identifier ces différents habitats, il est donc nécessaire de prendre en compte les caractéristiques et spécificités des différents milieux. Ceci pourrait par exemple reposer sur la régionalisation benthique (entreprise par exemple depuis longtemps *via* la cartographie des habitats benthiques de substrats meubles) et sur la régionalisation pélagique (seulement beaucoup plus récemment abordée par la communauté scientifique).

Pour la régionalisation benthique, on distingue habituellement substrat dur et substrat meuble. L'habitat substrat meuble est actuellement spatialement bien décrit (carte sédimentologique) et caractérisé à partir de l'enrichissement organique (nombreuses études reliant inventaires d'espèces et teneur en matière organique). En revanche, pour l'habitat substrat dur, la

caractérisation est qualitative (coralligène, roche, éboulis) et ne repose sur aucun concept explicatif reliant l'habitat à un groupe d'espèces. Ceci provient d'un manque de descripteurs adaptés aux substrats durs et de la sous-exploitation des cartographies spatiales disponibles. Pour la régionalisation pélagique, les données satellitaires permettent de distinguer des régions contrastées dans la partie superficielle de la colonne suivant des paramètres physiques (température et salinité) et biogéochimiques (turbidité et pigments). Cependant, l'association entre ces caractéristiques et la présence de cortèges d'espèces reste à développer, pour les espèces pélagiques comme pour les stades furtifs d'espèces associées à des habitats benthiques au stade adulte. Ainsi, il paraît nécessaire d'aborder la question de la régionalisation pélagique sous l'angle combiné spatio-temporel, au moins à l'échelle saisonnière. Il n'en reste pas moins qu'une réflexion méthodologique reste à mener sur le caractère suffisant des descripteurs physiques et biogéochimiques disponibles *via* l'imagerie satellitaire et l'utilisation de données issues de modèles couplés physique-biologie pourrait être encouragée. Enfin, l'habitat pélagique comprend également une zone profonde non accessible par la télédétection et pour laquelle une stratégie d'observation de ces mêmes paramètres caractéristiques doit également être réfléchie.

Afin d'identifier les habitats successifs des espèces au cours de leur cycle de vie, trois verrous ont donc été identifiés : (i) l'absence d'évaluation de la pertinence des descripteurs des masses d'eau comme descripteurs d'habitats pélagiques, (ii) l'absence d'évaluation de la pertinence des descripteurs de la nature des fonds comme descripteurs de l'habitat benthique de substrats durs, (iii) l'absence de stratégie d'observation pour la définition des habitats mésopélagiques.

C. Identifier les transferts entre les habitats des espèces formant la communauté fonctionnelle

Enfin, le troisième pilier indispensable pour permettre l'identification des échelles spatio-temporelles du fonctionnement d'un écosystème consiste en l'identification des transferts entre les habitats, c'est-à-dire la quantification de la connectivité et de sa variabilité spatio-temporelle. Ceci implique donc l'identification des voies de transferts (transport passif ou actif dans la circulation marine, localisation spatio-temporelle, caractérisation du comportement larvaire) et la quantification des flux transférés.

Compte tenu de la nature microtidale de la mer Méditerranée, les sources de variabilité du transport dans la circulation marine sont multiples, principalement d'origine météorologique et climatique. Ainsi, il apparaît judicieux d'appréhender la connectivité *via* des emboîtements d'échelles, de l'échelle du bassin à l'échelle locale, afin d'identifier l'échelle régionale à laquelle une rupture de connectivité s'opère, définissant l'emprise du fonctionnement en métapopulation d'une espèce distribuée sur un habitat fragmenté. L'identification de ces échelles régionales à l'intérieur desquelles la connectivité est plus forte que les échanges avec le reste du bassin repose sur une approche interdisciplinaire, croisant la connaissance de la régionalisation météorologique et hydrodynamique en Méditerranée et des filtres au sein des cycles de vie des différentes espèces formant la communauté fonctionnelle. Les approches multi-espèces de la connectivité sont encore très rares, mais la combinaison de plusieurs méthodes (moléculaire, modélisation biophysique, otholitométrie, par traçage, démographique, etc.) offrent des perspectives d'innovation méthodologique intéressantes.

Afin d'identifier les transferts entre les habitats successifs des espèces formant une communauté fonctionnelle, trois verrous majeurs ont donc été identifiés : (i) un manque de connaissances sur les traits contrôlant la dispersion des espèces à phase larvaire pélagique (déclencheur de la ponte, durée de la phase dispersive, capacité de mobilité, taux de survie) ; (ii) le besoin d'une approche multi-échelle de la connectivité avec une résolution spatiale et temporelle des modèles physiques suffisante ; (iii) la nécessité d'une quantification multi-espèces de la connectivité *via* la combinaison de plusieurs types d'approches.

Le cadre conceptuel d'intégration mécaniste des trois piliers présentés ci-dessus existe dans des modèles de type méta-communauté ou méta-écosystème, mais est encore peu mis en œuvre dans des situations réalistes. L'échelle spatiale restreinte et la forte structuration géologique, climatique et météorologique à méso-échelle suggèrent que la mer Méditerranée présente des propriétés de régionalisation pertinentes pour y évaluer cette famille de modèles dans des environnements variés.

II. Identifier les échelles spatio-temporelles d'organisation et de structuration des usages et de leurs modes de gouvernance

Les échelles spatio-temporelles d'organisation et de structuration des usages et de leurs modes de gouvernance ne peuvent être définies que sur la base de la connaissance et de l'analyse :

- des modes historiques de gouvernance de cette mer semi-fermée, telle que la qualifie le droit de la mer contemporain (article 122 de la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer – CNUDM) et des modes d'intervention des Etats dans leurs eaux ;
- des mandats et des programmes ainsi que des différents niveaux d'intervention des instruments, des institutions et des processus engagés ;
- des outils utilisés et de l'évaluation de leur efficacité, en les croisant avec une analyse (la plus fine possible) des impacts des différentes activités humaines.

A. Analyser la connectivité²⁷ entre niveaux d'intervention, institutions, instruments et processus de régulation des ressources et des usages

La gestion durable de la Méditerranée relève de la responsabilité de nombreux acteurs et/ou institutions agissant dans un cadre international, national/régional ou local, les Etats ayant le premier rôle (compétence pour s'engager), bien que pour les membres de l'Union européenne, certains transferts de compétences vers les institutions de l'Union aient modifié cette situation. Les instruments utilisés par ces acteurs sont de type conventionnel, à savoir traités, conventions, accords et/ou de type institutionnel, avec la création de commissions de niveau international/régional, s'appuyant toujours sur des politiques, des stratégies, des législations, des réglementations au niveau national ou local. Dans de nombreux cas, il peut y avoir confusion et superposition entre les mandats des différentes administrations au niveau national et entre le niveau national et international, où se posent des questions de cohérence ou de complémentarité des textes et des interventions.

Au niveau international, les grands instruments comprennent en particulier la CNUDM et la Convention sur la Diversité Biologique (CDB), dites universelles, mais aussi la Convention de Ramsar, la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES), la Convention de Bonn. Au niveau régional de la Méditerranée, ce sont en particulier la Convention pour la Protection de la Mer Méditerranée (dite Convention de Barcelone) et ses protocoles additionnels, dont le dernier sur la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) en vigueur depuis 2012, la Commission Générale des Pêches pour la Méditerranée (CGPM, sous l'égide de la FAO), l'ACCOBAMS (*Agreement on the Conservation of Cetaceans in the Black Sea Mediterranean Sea and Contiguous Atlantic Area*) et la CIESM (*the Mediterranean Science Commission*), par exemple, mais qui n'ont ni les mêmes compétences, ni surtout les mêmes objectifs.

²⁷ Dans cette section, le terme connectivité est utilisé pour évaluer la connectivité institutionnelle, ou l'identification des synergies ou complémentarités existantes et possibles entre les différents instruments aux différents niveaux d'intervention (du global au local) et en considérant les aspects régulateurs, administratifs, scientifiques ou techniques.

Au niveau subrégional en Méditerranée, les instruments obligatoires mis en place par l'Union européenne sont importants, notamment dans la conservation et la gestion du milieu marin (Directives Oiseaux et Habitats, DCSMM...). Cette situation entraîne une différence entre Etats méditerranéens, ceux obligés par le droit de l'Union européenne (Etats membres) et les autres Etats tenus par leur seul ordre juridique national et les accords internationaux qu'ils ont accepté de signer et de ratifier. Au niveau national ou régional (en particulier considérant les différentes régionalisations en Espagne, en France et en Italie, ainsi qu'en Adriatique), la législation nationale et/ou régionale s'applique.

La connectivité horizontale dans chaque niveau et verticale entre ces différents niveaux doit être analysée ou définie avec suffisamment de précision pour réduire les duplications, identifier les lacunes et faciliter les mises en œuvre :

- Au niveau international, les quatre instruments régionaux cités dans le paragraphe précédent (la Convention de Barcelone, la CGPM, l'ACCOBAMS, la CIESM) sont les plus importants et ils sont tous liés par des *memoranda* de coopération permettant d'améliorer la connectivité institutionnelle et de ce fait leur efficacité.
- Au niveau subrégional européen, concernant aussi les pays en cours d'accession, l'influence de l'Europe sur les institutions nationales et régionales des pays est importante, visant une normalisation des structures et des réglementations. L'influence du droit de l'Union européenne, notamment en matière d'environnement côtier, estuarien et marin, est une donnée forte y compris pour des Etats qui n'y sont juridiquement pas soumis mais qui pourraient vouloir s'en inspirer (uniformisation ou au contraire différenciation). Mais en l'état, cette distorsion entre les niveaux de protection constitue une faille qu'il serait utile d'étudier en détail.

Parmi les processus ou les outils majeurs que l'on retrouve dans l'ensemble de la région et qui sont soutenus et mis en œuvre par les différentes institutions internationales, régionales ou nationales, on peut citer, entre autres, l'approche par écosystème (EcAp), la gestion intégrée des zones côtières (GIZC), la planification (et gestion) spatiale marine (similarité avec les instruments d'aménagement du territoire), les aires marines à gestion particulière (pêche, navigation), les aires marines de conservation (par exemple, Natura 2000 Mer pour les pays européens) et les aires marines protégées (AMP). Leur utilisation ou application aux différents niveaux d'intervention peut varier selon les institutions mais tous ces outils ont pour objectif de promouvoir le développement durable. Une question essentielle concerne leur positionnement ou leur extension sur la haute mer encore impossible, sauf le cas particulier des Aires Spécialement Protégées d'Importance Méditerranéenne – ASPIM, qui fait de la Méditerranée un exemple de modèle de gestion de la haute mer, bien que celui-ci reste très théorique et très peu utilisé par les Etats (une seule ASPIM en Méditerranée). La connectivité écologique entre les espaces protégés dans les eaux sous juridiction (la limite extérieure de la Zone Economique Exclusive – ZEE, en constituant la frontière) et les zones de haute mer, et la prise en compte de celle-ci est l'enjeu majeur du droit de la mer contemporain (Galletti, 2014).

En termes de gouvernance, l'analyse des acteurs qui concourent à la prise de décision et des échelles auxquelles ils opèrent requiert un ensemble de méthodes et d'outils qui relèvent aussi bien des sciences de la nature que des sciences sociales. A titre d'exemples, on peut citer, au niveau global, le *Millenium Ecosytem Assessment* (MEA) et, à un niveau plus local, le projet

allemand « *Coastal Futures* », qui étudie l'impact des fermes éoliennes en mer du Nord, comprenant également la perception par la population locale, les effets sur le développement économique régional et les impacts sur les services écosystémiques (Lange *et al.*, 2010).

Les besoins identifiés pour la mer Méditerranée sont les suivants :

- La nécessité de rendre plus compréhensible, lister, regrouper **les outils de gouvernance de la mer Méditerranée** selon leur nature (politique, juridique, économique, stratégique...), leurs échelles d'application (local, national, infrarégionale, régionale/ Méditerranée) pour aboutir à une cartographie des emprises des institutions et des domaines de gouvernance (cartographie administrative de l'espace, accompagnée des outils de raisonnements permettant de la comprendre), l'analyse de leur dynamique d'évolution (au titre du droit de la mer en discussion, au titre du droit de l'environnement et de la diversité biologique en progression, au titre des anciens et nouveaux secteurs de développement telles les pêches méditerranéennes ou les énergies marines renouvelables et leur future localisation...).
- L'identification de l'**articulation internationale entre les instruments et les administrations** (connectivité institutionnelle), l'évaluation de la compatibilité des modes de gouvernance actuellement en place dans différents pays (en particulier européens/non-européens). Comment pratiquement faire cette articulation et quel peut être le dénominateur commun pour avancer en cohérence entre pays membres de l'UE et autres pays riverains de la Méditerranée ?
- La problématique de la **gouvernance dans les eaux internationales et son lien avec les eaux sous juridiction des Etats** : l'ensemble des ZEE (zones économiques exclusives) n'est pas déclaré et adopté par tous les pays, bien que plusieurs se soient engagés dans ce mouvement par ailleurs contraire à l'attitude de repli que la majorité des Etats méditerranéens avaient adoptée jusqu'alors... Sachant que les eaux internationales se réduiraient, voire pourraient disparaître, il conviendra de **construire une juridiction partagée** afin de ne pas laisser la seule initiative à chacun des Etats gestionnaires (proposition de protocole de la ZEE en Méditerranée dans le cadre de la Convention de Barcelone). Ceci pouvant prendre la forme de coopération transfrontalière par exemple, ou de la participation à la protection des réseaux écologiques marins...
- Pour chacun des pays riverains, il conviendra de clarifier les enjeux de **droit international de la mer et de droit maritime dans l'objectif d'une cohérence régionale** plus spécialement pour les secteurs du large, à défaut des zones de haute mer. Les enjeux portés par ces secteurs du large deviennent en effet prioritaires dans un contexte international de diminution des ressources minérales et halieutiques. Une analyse approfondie de ce droit de la mer et maritime par pays, en parallèle des normes internationales, devra déboucher sur une plus grande efficacité de gouvernance pour la haute mer ou pour les « *hot spots* » écologiques soumis aux fortes pressions anthropiques, dues en particulier aux transports. Cette implication harmonisée des pays dans les méthodes de gestion (gouvernance) permettra de mieux encadrer l'exploitation des ressources, les risques inhérents aux routes maritimes majeures ainsi que les aspects de la sécurité maritime pour les personnes, les biens et les espaces naturels. Elle permettra également une meilleure gestion et un plus grand contrôle des migrations clandestines.

Encadré 9 : Renforcer le rôle des dispositifs méditerranéens de gestion du milieu marin

La nécessité d'une application plus opérationnelle au niveau de l'ensemble du bassin implique, au niveau des pays riverains, la concertation, la collaboration et la coopération et, au niveau des parties prenantes, la concertation et le dialogue (forum des acteurs). Les mesures proposées doivent s'appuyer sur les institutions en place : DCSMM, Plan d'Action pour la Méditerranée – PAM (dans le cadre de la Convention de Barcelone), CGPM (pêches), etc.

- **Renforcer le rôle de la Convention de Barcelone et de son plan d'action**, et notamment la mise en œuvre du Protocole sur la GIZC, d'ailleurs signé par peu d'Etats méditerranéens, dans le cadre de l'application de la DCSMM et de l'approche écosystémique, à différentes échelles (locale, nationale, régionale), par sous-bassin maritime. A cet égard, une attention particulière doit être portée au degré de compatibilité entre les accords sous-régionaux (par exemple, le protocole sur les pollutions terrestres) et les programmes de l'UE (par exemple Horizon 2020, Fond Européen de Développement Economique Régional – FEDER) qui, souvent, bien que poursuivant des objectifs similaires, suivent des voies et donc des méthodes très différentes. L'axe de connaissance transversal lié à l'évaluation des gains ou des pertes de fonctions écologiques, comme lien et métrique étalon de l'action publique (*sensu lato*), trouve là encore une application intéressante (en plus de l'approche monétaire).
- **Une meilleure coordination entre les organisations régionales**, en particulier la CGPM, notamment dans le cadre de la mise en œuvre de la nouvelle Politique commune des pêches de l'UE. Le dénominateur commun devrait être l'approche par écosystème et une mise en parallèle de la définition des aires biologiquement ou écologiquement importantes qui ont récemment fait l'objet d'un atelier régional sous l'égide de la CDB.
- **Les partenariats du FEM**: la DCSMM parle d'écorégions marines là où le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM) parle de Grands Ecosystèmes Marins (*Large Marine Ecosystems – LME*). En Méditerranée, a été mis en place il y a quelques années un partenariat FEM au sein du Plan d'Action pour la Méditerranée. Ce dernier représente une plateforme technique et financière qui devrait faciliter la mise en œuvre de la DCSMM, en tant que pilier environnemental des stratégies régionales dans les quatre principaux sous-bassins maritimes de la Méditerranée.
- **Travailler avec les régions et macro-régions** : la Conférence des régions périphériques maritimes (CRPM) a toujours mis en avant le rôle d'avant-poste que les régions qu'elle représente peuvent jouer. Ce rôle des régions périphériques de la Méditerranée doit être pris en considération dans le cadre de la construction des stratégies régionales. Le débat sur les macro-régions potentielles en Méditerranée devrait mener à davantage d'engagement de la part des gouvernements régionaux et locaux.

B. Améliorer la connaissance des activités humaines et la caractérisation de leurs impacts

Les impacts des activités humaines sur le milieu marin sont souvent connectés en raison de leur proximité (connectivité géographique) et se cumulent dans leurs effets sur le milieu naturel. Le développement de la cartographie des impacts et de la sensibilité des écosystèmes devrait permettre (à moyen ou long terme), d'évaluer la durabilité des activités humaines et donc de revoir nos concepts de gouvernance et de planification spatiale du territoire tant terrestre que marin.

Si les impacts de certaines de ces activités sont bien identifiés, leurs impacts cumulés sont en revanche souvent méconnus : un effort dans cette connaissance est nécessaire pour une prise de décision. Par exemple, le tourisme aura un impact sur l'espace, l'eau douce, la pollution (déchets, visuelle, sonore), les espèces, la croissance économique, les migrations et souvent le cumul de ces impacts n'est pas considéré, que ce soit dans le cadre des études d'impact d'un secteur donné ou dans celui des évaluations stratégiques des impacts de multiples secteurs d'activités.

Concernant le changement climatique, il y a en général un retard important entre le changement de régime en cours et la réponse politique et sociale correspondante. Ce retard est à ajouter à

ceux liés aux relations de cause à effet dans les changements qui interviennent au sein des écosystèmes. Ce qui est en cause, c'est la dynamique de la réponse sociétale qui fait appel à de nouvelles formes de gouvernance et de gestion. Sans un effort concerté, le risque est grand de voir les dégradations progressives et les impacts cumulés qui en résultent échapper à notre observation (« *shifting baselines* »). C'est pourquoi la surveillance de la qualité des eaux est fondamentale : une surveillance qui soit en mesure de suivre ce *continuum*, qui nous conduit du bassin versant aux eaux côtières, puis à celles plus au large. Banques de données et partage des données sont essentiels et sont encore largement insuffisants, surtout aux échelles transfrontières (voir partie 5).

Les mécanismes de suivi permanent en Méditerranée ne concernent qu'un petit nombre de paramètres, généralement en lien avec la pollution ou l'activité de pêche, ce qui ne permet pas de développer des scénarios cohérents et bien documentés sur l'ensemble de la problématique environnement et développement durable. Il apparaît donc nécessaire de :

- Cartographier la **répartition spatiale et temporelle et l'intensité des activités** et pressions humaines s'exerçant sur les milieux, ainsi que la sensibilité de ces derniers aux impacts cumulés. Cette régionalisation des usages et des impacts sera mise en relation avec la cartographie des modes de gouvernance. L'évolution dans le temps des pressions et des modes de gestion devra être prise en compte.
- Solliciter les disciplines liées à la géographie, l'économie ou la philosophie au côté des sciences du vivant (écologiques et biologiques) pour répondre aux **questions de compensations et d'impact des activités humaines** (pollution, artificialisation, espèces invasives...), d'ingénierie écologique ou d'aide au choix de politiques publiques de gestion du milieu.
- Faire des petites îles de la Méditerranée des **laboratoires du développement durable** : peut-on imaginer un cadre de recommandations communes permettant de préserver le capital de ces îles et de renforcer les voies d'un développement réellement durable en matière de tourisme (mieux contrôlé), de cadre de gestion (aires marines protégées, parcs nationaux comme les îles Kornati en Croatie), autonomie énergétique accrue (solaire, énergies marines), etc. ? Une approche transversale de gouvernance, avec un cadre de label « Ile bleue de Méditerranée » par exemple, ne pourrait-elle susciter l'intérêt des pays riverains pour gagner en attractivité et en rayonnement à l'échelle du tourisme mondial ? Cela impliquerait des chartes contraignantes mais adaptées aux contraintes réelles et mobilisant des technologies modernes (ex : climatisation des hôtels par l'eau de mer profonde), le traitement des eaux usées pour rendre à la baignade tout le littoral (ex : Malte), etc.

Encadré 10 : vers une approche écosystémique des activités en Méditerranée

Concernant le changement climatique et son impact environnemental, la communauté scientifique, notamment à travers le GIEC, a fourni un éventail de prévisions pour quantifier les changements qui pourront survenir au siècle prochain, à une échelle planétaire ou régionale. En ce qui concerne les activités humaines et leurs évolutions, le domaine concernant l'exploitation, l'estimation et la gestion des stocks de poisson est clairement en avance par rapport aux autres services rendus par la mer. En effet, au cours de cette dernière décennie, l'approche écosystémique des pêches (AEP) a considérablement transformé la façon d'envisager la gestion des ressources halieutiques marines et a modifié à maints égards les objectifs des recherches scientifiques réalisées sur le milieu marin. Cette approche a également été retenue aux niveaux international (FAO et CGPM) et national pour la Méditerranée (Leonart et Maynou, 2014). Aujourd'hui, l'AEP est internationalement reconnue et des objectifs concrets pour les pêches ont été fixés dans ce nouveau cadre au niveau des Nations unies. En Méditerranée, bien que figurant dans l'agenda institutionnel de la gestion des pêches, l'AEP reste balbutiante dans sa mise en œuvre, mais des initiatives récentes laissent espérer une évolution favorable, comme l'atteste la mise en place du réseau scientifique EMBASEAS pour soutenir la mise en place de cette approche (Coll *et al.*, 2013). Ainsi, il existe aujourd'hui de nombreux cadres conceptuels scientifiques qui permettent d'envisager une mise en œuvre effective de l'AEP, contribuant à atteindre le bon état de santé des océans et de leurs ressources.

Une évolution naturelle semble cependant se profiler, qui permettra d'intégrer une vision dynamique de l'AEP dans un contexte régional et global. Ainsi, la surveillance et la gestion des autres services rendus par la mer Méditerranée pourraient grandement s'inspirer des méthodologies et approches développées pour la gestion des stocks halieutiques, tandis que l'observation, la prévision et la gouvernance d'autres services pourraient en retour alimenter l'AEP.

En effet, les connaissances sur les services environnementaux marins sont fragmentaires et manquent d'intégration. Ainsi, la plupart des usages de la mer génèrent des perturbations environnementales, tout en souffrant de ces modifications. Par exemple, la baisse des stocks halieutiques est suspectée de causer divers remaniements de la chaîne alimentaire (pullulations de méduses, occurrences d'algues toxiques, événements d'anoxie), tandis qu'une recrudescence de ces événements contribue à amplifier le déclin des stocks. Mais il convient aussi de s'interroger sur les réponses possibles des pêcheurs et des consommateurs aux changements des peuplements exploités (changement d'abondance des espèces traditionnellement consommées) et à l'arrivée de nouvelles espèces (dont certaines peuvent poser problème en termes de sécurité alimentaire). D'autres secteurs d'activités (tourisme, industrie, aquaculture) s'en trouvent également impactés.

Il apparaît donc nécessaire, suivant le modèle de la gestion des stocks halieutiques, d'effectuer un recensement des différentes activités, mais également de l'état des services rendus (qualité de l'écosystème, de l'eau, etc.), afin d'établir les bases d'une future gestion écosystémique des activités humaines en Méditerranée. A cet égard, différentes approches sont actuellement en cours (cf. travaux de la DSCMM) pour établir des protocoles de surveillance de l'environnement. Ces initiatives devront être déployées et mises en rapport avec les activités humaines. Le développement de nouveaux outils (génomique, protéomique, capteurs...), la comparaison de situations par des approches diachroniques ou spatiales, peuvent notamment s'avérer utiles pour favoriser de telles approches intégratives.

III. Evaluer de façon critique les mesures de gestion actuelles pour les améliorer

Malgré ces nombreux dispositifs (législatifs, de consultations, de restrictions, de gestion, etc.), il apparaît clair que la biodiversité et les ressources marines sont toujours soumises à de multiples impacts. Les mesures sont-elles trop peu nombreuses ? Trop peu coercitives ? Pas assez adaptées ? Trop souvent seulement formelles et non opérationnelles ou non appliquées ? Toute mesure de protection et de gestion cible des usages, mais elles ne sont pas toutes dérivées d'une connaissance des ressources dont ces usages dépendent (par exemple, le taux de renouvellement pour les ressources vivantes, tels que les stocks de pêche, ou les relations trophiques dont la connaissance est la base de la gestion écosystémique). D'autre part, les systèmes de gouvernance ne sont pas toujours adaptés aux ressources (ni nécessairement aux usages). Certains cadres tentent de pallier à ces problèmes (par exemple la DCSMM), mais restent vagues quant au lien entre biodiversité, ressources et usages et ne disposent pas encore de points de référence clairs et standardisés. Afin de tenter d'améliorer l'état des ressources tout en maintenant un niveau acceptable d'usages et de services environnementaux, il est avant tout nécessaire d'étudier la congruence entre la structuration et la dynamique de la biodiversité, ses liens avec les ressources, leurs dynamiques, l'organisation des usages et naturellement les types de régulation de l'accès aux zones maritimes et aux éléments de la diversité biologique (qualifiés de ressources naturelles marines).

A. Evaluer le dispositif des aires marines protégées

Les mesures de protection de la biodiversité marine s'ancrent principalement sur le principe des aires marines protégées (AMP), où les activités d'extraction sont exclues et les habitats préservés. Les résultats sont très encourageants mais restent locaux. En effet, des travaux récents ont montré que le système actuel d'AMP (plus de 100 créés en Méditerranée depuis les années 60 ; Abdulla *et al.*, 2008) ne permet pas de protéger correctement les composantes de la biodiversité (Grorud-Colvert *et al.*, 2014), confirmant le fait que la création d'AMP sans réflexion en amont et à l'échelle de l'ensemble du bassin méditerranéen ne permet pas une protection efficace, et ce pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, avec moins de 2,5% du plateau continental couvert (en excluant le sanctuaire Pelagos, uniquement dédié à la protection des mammifères marins ; Notarbartolo Di-Sciara *et al.*, 2008), elles n'atteignent pas les objectifs internationaux de couverture de 10% de chaque écorégion majeure de la Convention sur la Diversité Biologique – CDB. De plus, les AMP ont été établies sur la base d'initiatives locales ou nationales et le système ne montre pas de réelle cohérence à l'échelle du bassin méditerranéen (Claudet *et al.*, 2011). Enfin, l'établissement d'AMP étant prioritairement un processus légal et administratif, dans lequel un certain nombre de fonctions lui sont attribuées, les fonctions initiales de conservation écologique ont pu être concurrencées voire dépassées par d'autres fonctions (Galletti et Chaboud, 2014). La motivation des Etats pour les instituer étant très variable, les garanties escomptées de ces AMP le sont également, comme par exemple la sécurisation administrative, militaire et écologique de territoires où seront développées des politiques, législations et réglementations environnementales ; ou la création de frontières et de zones maritimes d'exception demandées par certains Etats auprès d'organisations internationales ; ou encore le repoussoir au

développement de la prospection sous-marine pour l'exploitation énergétique ou minérale... Au-delà d'apports très écologiques, ces autres apports qui marquent une fonction d'assurance des AMP sont perçus comme des garanties très nationales, avant d'être des garanties collectives sur une mer en partage.

Encadré 11 : Quelques exemples d'évaluations récentes des AMP

- Evaluation du chevauchement entre les AMP, les points chauds des trois composantes clés de la biodiversité de l'ichtyofaune (diversité taxonomique, diversité des espèces menacées au sens de l'UICN, diversité phylogénétique et fonctionnelle) et les points chauds de menaces (pêche). Mouillot *et al.* (2011) montrent que les zones de forte biodiversité ne se chevauchent pas entre elles et ne chevauchent pas toutes avec les AMP (les points chauds des diversités taxonomiques se chevauchent alors que les points chauds de diversité fonctionnelle et de diversité phylogénétique ne se chevauchent pas).
- Une autre étude analyse le chevauchement entre les AMP, les points chauds de diversité taxonomique (mammifères marins, tortues, oiseaux, poissons et invertébrés), les points chauds de menaces d'origine anthropique (pêche). Elle montre que les zones de forte biodiversité et les zones où les menaces sont exacerbées se chevauchent fortement et que seulement 0,4% des ces zones sont couverts par les AMP (Coll *et al.*, 2012).
- Toutes les espèces ne sont pas équivalentes, et certains clades véhiculent plus d'histoire évolutive ou ont des fonctions plus singulières dans l'écosystème que d'autres (Vane Wright *et al.*, 1991 ; Isaac *et al.*, 2007 ; Mouillot *et al.*, 2008 ; Cadotte et Davies, 2010). Ainsi, plusieurs études ont montré le besoin de prendre en compte ces différentes composantes lors de l'établissement d'un réseau d'AMP (Vane Wright *et al.*, 1991 ; Humphries *et al.*, 1995 ; Cadotte et Davies, 2010 ; Tucker et Cadotte, 2013). De fait, la quantification de la protection des différents aspects de la biodiversité par le système d'AMP existant est un premier pas essentiel à la mise en place d'un plan de conservation efficace (Margules et Pressey, 2000 ; Scott *et al.*, 2001 ; Gaston *et al.*, 2002).

Une analyse approfondie du réseau AMP déjà en vigueur pourrait ainsi être un des vecteurs essentiels pour assurer la cohérence écologique de la protection de la biodiversité à l'échelle du bassin (en définissant la taille, la densité et la répartition optimales des ces AMP) et pour une harmonisation des dispositifs de surveillance. Outre l'évaluation de ces dispositifs, une stratégie globale doit émerger de façon à raisonner à l'échelle de la Méditerranée et à compenser les déséquilibres actuels dans la répartition de ces dispositifs.

B. Analyser les causes d'échec ou de succès des mesures de gestion

La principale cause d'échec des mesures de gestion est bien souvent l'absence de mise en œuvre effective de ces mesures, liée notamment à l'absence d'appropriation par les acteurs. Des approches « *bottom-up* », de cogestion (avec un réel partage du pouvoir entre usagers et décideurs) seraient probablement plus efficaces. En effet, le manque de dialogue vient potentiellement du manque de connaissance partagée (de l'environnement et des usages). Mais ce type d'approches génère nécessairement des régulations, voire des réglementations à un niveau très sectoriel, parfois territorial et institutionnel local dans la mesure où la suggestion du secteur peut (ou pas), va (ou pas) être traduite dans des actes juridiques valides (certaines réglementations préfectorales en France concernant les activités dans les AMP par exemple) plutôt qu'à un niveau national uniforme, ou même suprarégional.

Lorsque la mise en œuvre est effective, l'évaluation du succès, d'un point de vue de la biodiversité, pourrait, sur la base des approches DCE et DCSMM, porter sur l'évaluation d'optimums fonctionnels de référence. Une carte des écarts par rapport à ces états de référence (écosystèmes de bonne qualité selon les indicateurs DCE et DCSMM) servirait ainsi à informer sur l'efficacité des mesures de gestion (du bassin versant au niveau des apports en eau et de l'artificialisation des sols, des AMP ou des outils de GIZC pour la partie marine, etc.). Les outils d'évaluation des fonctions écologiques, basés sur leur quantification (*Health Ecological Assessment* – HEA ou méthodes de type « *Rapid Assessment Method* ») ou celle des services écosystémiques (base liée au *Millennium Ecosystem Assessment*), pourraient aider à éclairer les politiques de gestion en quantifiant les pertes et les gains issus des mesures mises en œuvre et en modélisant les trajectoires futures. Ces outils pourraient utilement s'insérer dans les politiques publiques en tant qu'indicateurs *ex-ante* ou *ex-post* de l'action de l'Etat ou de l'UE (DCE/DCSMM), d'une part, mais aussi servir au niveau local pour mesurer les efforts de gestion engagés par les acteurs de terrain. Il s'agit donc de créer un référentiel commun, autre que le seul aspect financier, basé sur le niveau fonctionnel ou de service délivré par un écosystème. Les retombées en termes de gestion adaptative ou de tableau de bord sont directes et bienvenues car quasi-inexistantes à l'heure actuelle.

Evaluer l'efficacité des mesures de gestion nécessite donc :

- De produire davantage d'**évaluations ciblées et co-renseignées** (usagers/chercheurs/gouvernement).
- D'évaluer l'opérationnalité et les avancées des **dispositifs, instruments et mesures de gestion existants** (listés plus haut) et leurs volets économiques (planification maritime, économie ou croissance bleue, politique commune des pêches, CDB, CNUDM, etc.). Une évaluation régulière des mesures et de leur combinaison, tant du point de vue de leur mise en œuvre opérationnelle que de leur impact environnemental et socio-économique paraît nécessaire, en particulier leur efficacité économique.
- De développer une **méthode « maritime » d'évaluation des fonctions écologiques** (voire des services écosystémiques) à partir d'une standardisation des indicateurs et des métriques (base DCE et DCSMM mais simple et faisable) avec la création de points de référence (atlas des standards de référence fonctions/services) pour l'évaluation du succès des mesures de gestion. En effet, l'évaluation des services et des fonctions en lien avec la réparation des impacts anthropiques est un secteur très développé aux USA (Dunford *et al.*, 2004 ; Hough et Robertson, 2009 ; Levrel *et al.*, 2012). Cela permettrait de disposer d'un tableau de bord du suivi des niveaux de services écosystémiques et donc fonctionnels des milieux marins et côtiers.
- De mener des études sur les **modes de gouvernance au niveau mondial**, prioritairement sur **la pêche** : quels modèles de fonctionnement existent au niveau mondial, selon un gradient entre deux extrêmes : une gestion de type « *bottom-up* » selon le modèle japonais, basée sur un cadastre maritime avec cogestion contrôlée (type prud'homies dans certaines régions méditerranéennes) et une gestion de type « *top-down* » selon le modèle anglo-saxon, basée sur un hypercontrôle fédéral et une surveillance policière. Des **projets pilotes** pourraient être amorcés en France et ailleurs en Méditerranée pour évaluer l'applicabilité de ces modèles de gestion du point de vue de la gouvernance environnementale, de

l'aménagement du territoire et de la gestion écologique des écosystèmes. Ces projets pilotes pourraient dans un premier temps concerner des espèces modèles (loup, daurade, thon rouge, anchois), au sein de périmètres limités (par exemple autour des AMP), en lien avec les scientifiques et les pêcheurs.

C. Améliorer les mesures de gestion existantes à partir de leur évaluation

Les améliorations possibles des mesures de gestion concernent en particulier les aspects suivants :

- L'impact conjugué de **petites décisions prises au niveau individuel** peut parfois avoir autant d'impact sur la qualité des eaux côtières, sinon plus, qu'une grande décision politique centralisée, bien que le problème de la responsabilité individuelle puisse vite mener à ce qu'il est convenu d'appeler la « tragédie des communs ». C'est toute la question de l'application du principe de subsidiarité et d'une approche du processus de gouvernance qui permettent d'articuler les échelles entre elles, du local vers le global et *vice-versa*, avec un appui scientifique renforcé et organisé pour la gestion (DCE/DCSMM).
- La gestion du compartiment biologique se fait de plus en plus au niveau des communautés (multifonction, plurispécifique). Au niveau des usages, la gestion est largement mono-usage. Il faudrait désormais se tourner vers une **gestion multi-usage**. Il s'agit alors de définir une métrique qui fonctionne en mode multi-usage, avec un étalon monétaire comme c'est le cas aux Etats-Unis (économie écologique plutôt qu'économie environnementale).
- Les échelles de référence de la distribution et de la dynamique de la biodiversité, des ressources, des usages et des modes de gouvernance sont souvent multiples, et les sources de stress sur les différentes composantes de l'environnement ont souvent des relations non linéaires (les effets de chaque source ne sont pas simplement additifs). A partir de la cartographie de la distribution spatiale et dynamique des sources d'impact et des menaces, et de la connaissance des échelles de fonctionnement des écosystèmes, il faut définir les **échelles de références appropriées pour sélectionner les outils de gestion** les plus efficaces pour la gestion d'impacts particuliers et multiples, pour enfin adapter les modes de gouvernance.
- Il est également nécessaire d'évaluer les effets potentiels des changements globaux en Méditerranée sur l'efficacité des stratégies de conservation, de façon à vérifier, par exemple, si les zones dont l'intérêt de conservation est fort aujourd'hui restent efficaces face aux variations des conditions sociales et environnementales.

Partie 5 : Suivre les évolutions et promouvoir les capacités d'analyse prospective et les partenariats

Le maintien des services écosystémiques rendus par la mer Méditerranée apparaît crucial pour la sécurité alimentaire, la croissance économique et le bien-être futurs des populations riveraines. Les évolutions environnementales et sociétales étant particulièrement rapides en Méditerranée, il est indispensable de se doter des outils de surveillance et de suivi adéquats et de développer les capacités d'analyse prospective qui permettent de mieux comprendre la vulnérabilité des sociétés littorales et des services rendus par la mer Méditerranée face aux changements en cours.

Ainsi, les observations régulières sur de longues périodes sont nécessaires pour comprendre les mécanismes fondamentaux de fonctionnement du milieu marin, pour évaluer les différentes échelles de variabilité et les tendances et pour construire des analyses permettant d'étudier l'adaptation aux changements globaux en Méditerranée, qui devront assimiler des données fiables utilisées dans des modèles de prévision. Pour cela, il est primordial de disposer de données scientifiques comparables couvrant l'ensemble du bassin. Or, nos connaissances actuelles restent hétérogènes et fragmentaires. Un travail de fond s'impose donc, visant la standardisation et l'homogénéisation des nouvelles données collectées et la structuration de leur collecte au sein d'observatoires et de zones ateliers. Il est important de privilégier et de promouvoir le partage des informations et données selon des principes bien établis comme ceux du système de partage d'informations sur l'environnement (SEIS) utilisé en Europe et par extension dans les pays voisins, dont les pays méditerranéens.

Par ailleurs, le recensement des données collectées par le passé, leur réactualisation et leur synthèse en vue de leur analyse grâce aux modèles développés récemment (ré-analyse) permettrait de valoriser le corpus de données existantes afin de mieux connaître l'état passé de la mer Méditerranée. De même que la réalisation d'exercices coordonnés d'inter-comparaison de modèles-impacts du changement climatique en Méditerranée permettrait de fournir des évaluations plus robustes de ces impacts.

Au-delà des aspects de modélisation, une recherche innovante, intégrée et pluridisciplinaire, en partenariat avec les pays du nord, du sud et de l'est du bassin, devra être conduite en vue de la construction de scénarios d'évolution de la Méditerranée dans un contexte de changement global. Cette approche par scénarios permettra d'appuyer la prise de décision en vue de la mise en œuvre d'une gestion écosystémique de l'ensemble des activités en Méditerranée.

L'ensemble de ces outils (observatoires, modélisation, scénarios), mis en œuvre dans un cadre coopératif au niveau de l'ensemble du bassin, va permettre d'anticiper le devenir de ces services et de faire évoluer les modalités de gestion afin d'en assurer la pérennité et de promouvoir les capacités d'adaptation des sociétés, au nord comme au sud.

I. Optimiser la collecte et le traitement des données

De nombreuses données environnementales, physiques, biologiques, mais aussi dans le champ économique et sociétal, sont collectées en mer et le long du pourtour méditerranéen par différents types d'acteurs. Ainsi, les systèmes d'observations du milieu marin au large amorcent actuellement une intégration de façon à mieux répondre aux besoins sectoriels (recherche, océanographie opérationnelle), mais la majorité des données relatives au milieu reste encore éparse, pas toujours accessible, ni compatible ou interopérable.

De surcroît, l'absence d'observation *in situ* systématique dans le sud du bassin hypothèque le suivi des paramètres importants pour une compréhension globale du fonctionnement du bassin et sa modélisation. L'avancée des connaissances scientifiques pourrait grandement bénéficier d'une structuration de ces données, de leur partage et de leur harmonisation, permettant notamment une approche conjointe données-modèles efficace et à même de créer les leviers d'action auprès des décideurs.

Afin d'accroître la connaissance de l'impact des changements globaux et des risques naturels sur la zone littorale notamment, des observations doivent être conduites depuis l'espace, grâce aux nouveaux moyens satellitaires, mais aussi *in situ*, tant à terre (dans la zone littorale) que dans la colonne d'eau et en fond de mer. Bien sûr, l'observation sous-marine pérenne implique des développements technologiques importants afin de maintenir des dispositifs sous-marins sur des périodes longues et de transférer efficacement les données. Le développement récent d'engins autonomes sous-marins (planeurs, flotteurs profileurs, *Remotely Operated Vehicle* – ROV...) permet actuellement l'acquisition de nombreuses mesures *in situ* en appui des observations satellitaires essentielles pour accroître les performances des méthodes d'inversion appliquées aux capteurs spatiaux visant à déterminer les propriétés biogéochimiques, et maintenant biologiques, du milieu marin. Pour une couverture optimale, la collecte de ces données gagnerait à se faire de manière collaborative, concertée et structurée, au sein d'observatoires répartis sur l'ensemble du bassin méditerranéen.

A. Multiplier les sources de données

D'importantes informations scientifiques sont collectées mais ne sont pas publiées et restent sous forme de littérature grise ou de rapports inédits. Un réel effort de coopération s'impose, impliquant chercheurs et administrations, afin de rassembler, qualifier, mutualiser et rendre accessibles ces données au profit de l'ensemble de la communauté scientifique s'intéressant à la mer Méditerranée.

Le domaine de l'observation est fortement « *technology push* », ce qui multiplie les défis à relever, et ce en continu. Les nouvelles plateformes autonomes et le progrès rapide de leurs performances, la miniaturisation des capteurs et le nombre toujours croissant des paramètres observables, obligent à une adaptation permanente de l'organisation de la collecte et des chaînes de traitement. La miniaturisation des capteurs permet en particulier d'envisager leur multiplication sur des plateformes d'opportunité. Les bateaux de commerce et de transport de passagers sont des vecteurs possibles, mais aussi les bateaux de pêche, voire de plaisance.

Ce défi prend tout son intérêt en Méditerranée, qui accuse un retard important dans ce domaine. L'ORE SSS (Observatoire de Recherche en Environnement « *Sea Surface Salinity* ») a réussi à structurer un réseau global de collecte de données de salinité de surface, particulièrement utile

pour ce paramètre climatique essentiel qui commence seulement à être accessible depuis l'espace, mais une seule ligne – assez occasionnelle – parcourt la Méditerranée. Le réseau Ferrybox²⁸, qui commence à se structurer en tant que véritable infrastructure européenne de recherche, est déjà considérablement développé dans les autres mers européennes : le contexte est donc particulièrement favorable pour que la communauté relève ce défi en Méditerranée. Elle dispose aussi pour cela du support « diplomatique » de la CIESM qui a par le passé soutenu des projets pilotes de ce type.

La collecte de données à partir de bateaux de pêche est également en plein essor. Elle concerne pour l'instant essentiellement des informations sur l'effort de pêche, mais certains bateaux ou leurs appareils commencent à être équipés de stations automatiques d'acquisitions (programme Ifremer RECOPECA). Participer à cet effort, en orientant l'équipement des flottes vers des paramètres utiles, et en développant chez les professionnels la « culture » de l'observation volontaire en Méditerranée, constitue un défi à relever collectivement, de concert avec les initiatives qui se développent dans d'autres pays.

Par ailleurs, les zones protégées (réserves, aires marines protégées et autres appellations), qui existent parfois depuis plusieurs décades, devraient être plus systématiquement mises à profit pour l'observation, notamment de « sentinelles de l'écosystème », en comparaison avec des zones adjacentes non protégées. De telles données pourraient donner des indications fortes sur les modifications subies par le milieu et les capacités de résilience et d'adaptation des écosystèmes.

Le public amateur (plongeurs, plaisanciers...) représente un autre type de public à sensibiliser pour participer à la collecte de données (« *crowdsourcing* »). De nombreuses questions subsistent néanmoins quant à la validation des données acquises de cette manière.

Les observations satellitaires des océans et des terres émergées sont devenues des outils incontournables pour l'analyse de ces milieux. En particulier, le lancement dans les années à venir (2014 à 2018) d'une série de missions spatiales d'observation de la Terre (missions « Sentinel »), dans le cadre du programme de surveillance européen Copernicus, devrait permettre d'améliorer significativement notre compréhension des écosystèmes et des interactions entre les différents compartiments (biosphère, atmosphère, continent, océan...). En ce qui concerne l'observation des systèmes océaniques (hauturier et côtier), la résolution spatiale améliorée de ces observations satellitaires (300 m au lieu de 1 km pour les missions passées) est un atout pour envisager la synergie de ces observations avec les modèles de circulation océanique (océan ouvert) ou de transport des matières en suspensions (milieux littoraux).

Initialement basée sur l'imagerie satellitaire, D'Ortenzio et Ribera d'Alcalà (2009) ont développé une approche statistique pour caractériser les différentes biorégions de la Méditerranée. Cette approche a depuis été étendue à d'autres paramètres et est également maintenant utilisée pour l'analyse des simulations. A côté de son intérêt scientifique, ce type d'étude constitue un guide pour proposer une méthodologie, autant pour l'observation que pour la modélisation, basée sur des études ciblées à l'intérieur de chaque biorégion. Ceci est particulièrement pertinent grâce à l'avènement des plateformes autonomes (Argo, *gliders*) munies de capteurs biogéochimiques. Ainsi, au cours de l'année passée, des déploiements de flotteurs bioArgo ont été réalisés dans différentes régions de la Méditerranée (bassin nord-ouest, bassin algérien, bassin ionien, bassin levantin). Grâce à eux, on possède une vision jusque-là inégalée du cycle annuel des nutriments et de la réponse chlorophyllienne, y compris du lien à haute fréquence avec la couche de

²⁸<http://www.ferrybox.org/>

mélange. Dans le même temps, les *gliders* permettent de mettre en évidence l'impact majeur des processus physiques de sub-méso-échelle sur la biomasse en chlorophylle. Toutes ces observations constituent une formidable opportunité pour les modèles qui souffrent d'un déficit majeur d'observations (hormis la couleur de l'eau). Elles sont également un défi pour la communauté scientifique des observateurs et des modélisateurs, qui doit proposer de nouvelles approches méthodologiques pour en tirer pleinement partie. L'approche biorégionale est clairement prometteuse, mais l'aspect partiellement lagrangien des mesures est une difficulté pour laquelle des stratégies restent à inventer.

Mais le domaine où une rupture technologique majeure est probable est celui de la biologie. Des plus en plus de paramètres deviennent accessibles à la mesure *in situ* – ou tout au moins des proxies – et en laboratoire après prélèvements, lesquels seront bientôt possibles à partir de plateformes mobiles automatiques. Les techniques « omiques » (génomique, métagénomique, métatranscriptomique, *metabarcoding*) sont en train de s'imposer. A l'horizon de 10-20 ans, il semble fort possible que l'observation des écosystèmes sera complétée par l'échelle génomique/moléculaire, introduisant sans doute une rupture par rapport à l'approche actuelle. Les recherches en cours autour du séquençage miniaturisé laissent entrevoir la possibilité d'avoir des instruments qui permettront de séquencer directement le contenu des échantillons prélevés en mer. Cela aura un impact majeur sur l'organisation de la collecte qui devra prendre en compte ces nouvelles technologies, en proposant des échantillonnages adaptés. Au-delà des questions pratiques autour de la collecte et du séquençage des échantillons, l'exploitation et l'intégration des données apportées à cette échelle biomoléculaire vont bouleverser les méthodes actuelles d'étude et de surveillance des écosystèmes et l'organisation des observatoires en sera profondément affectée.

Encadré 12 : Mettre au point des capteurs embarqués multi-mesures pour la surveillance et l'alerte

La dégradation de la qualité chimique et microbiologique de l'eau (transfert de pathogènes ou développement d'algues toxiques, contaminations chimiques) est la résultante d'apports continentaux mal maîtrisés ou de la mobilisation de réservoirs environnementaux marins, parfois difficiles à identifier en raison de leurs fluctuations temporelles. La surveillance de la qualité chimique et microbiologique des eaux littorales nécessite donc le développement de capteurs autonomes, placés sur sites et permettant la détection et la mesure des microorganismes toxiques ou pathogènes, des contaminants chimiques, des espèces invasives ou nuisibles pour certaines activités. Ces outils doivent permettre des mesures rapides, sensibles et sélectives à coût réduit. Leur portabilité et leur possible intégration sur des bouées de mesure placées sur site en feront des outils adaptés pour une surveillance *in situ* et en temps réel. Ils devraient ainsi offrir l'accès à un meilleur diagnostic de l'état actuel des masses d'eau dans un but de détection précoce (espèces invasives par exemple), d'alerte (présence de microorganismes pathogènes ou molécules toxiques), de prévention de toute dégradation supplémentaire, de préservation et d'amélioration de la qualité des eaux côtières.

Concernant les microorganismes, des capteurs à ADN ou ARN de type puces (*microarray*), ont été récemment développés dans le cadre du programme européen MICROAQUA²⁹ et d'autres de type *genosensors* ont montré leur capacité d'utilisation pour la quantification d'algues toxiques ou encore de bactéries indicatrices de contamination fécale (Dierck *et al.*, 2008 ; Orozco *et al.*, 2011; Paniel et Baudart, 2013 ; Paniel *et al.*, 2013). Des efforts doivent maintenant être fournis pour transférer et adapter ces nouvelles technologies pour en faire des « *lab on chip* » intégrables à des bouées de mesures et accéder ainsi à un monitoring *in situ*.

²⁹ Universal microarrays for the evaluation of fresh-water quality based on detection of pathogens and their toxins

B. Organiser la collecte des données au sein d'observatoires

Pas toujours aisés à définir, les observatoires combinent tout ou partie des plateformes d'observation disponibles – stations marines, lignes de mouillages, navires, satellites, etc. – avec une emprise spatiale et un objet scientifique plus ou moins bien délimités. Les observatoires s'organisent ensuite en réseaux pour couvrir de façon cohérente l'ensemble des paramètres suivis dans un espace géographique donné. Le concept de réseau d'observations trouve évidemment sa pleine valeur vis-à-vis de la modélisation qui demande une connaissance structurée de manière multidimensionnelle (échelles de temps et d'espace, espace des variables).

Sous l'impulsion du PNUE-GEO (*Global Environment Outlook*³⁰) et d'initiatives similaires, de Copernicus³¹, des directives européennes, mais aussi d'enjeux plus locaux, et bien sûr avec des contraintes majeures de coût, la période actuelle connaît une évolution très rapide – au point qu'on peut même parler de bouleversements – du domaine de l'observation, notamment de la composante *in situ*. Les observatoires se dotent de plus en plus d'une gouvernance explicite et d'un cadre contractuel, et deviennent ainsi les briques élémentaires de l'observation sur lesquelles les régions, les pays, et maintenant l'Europe et les systèmes d'observations globaux s'appuient pour acquérir des données, qui sont mutualisées pour plusieurs types de besoins et services, dont bien sûr la recherche scientifique.

En Méditerranée, ces concepts prennent tout leur sens du fait de la cohérence de cet espace géographique et des enjeux multiples dont elle est le siège. Depuis 2010, le SOERE (Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement) MOOSE (*Mediterranean ocean observing system on environment*) en France a très largement contribué à structurer l'observation dans le bassin liguro-provençal, dans les domaines de la physique et de la biogéochimie. D'autres systèmes existent en Espagne, en Grèce et à Chypre, avec une orientation « océanographie opérationnelle » très affirmée et constituent de véritables services répondant à des besoins de gestion locaux et régionaux. Le pourtour de la Méditerranée possède également de nombreuses stations marines, parmi les plus prestigieuses au monde, qui elles aussi commencent à se structurer en réseau. Un des atouts principaux en Méditerranée réside dans la complémentarité efficace existant entre ces observatoires et systèmes d'observation et les infrastructures de recherche européennes qui reposent, elles, sur les plateformes (Euro-ARGO³², GROOM – *Gliders for Research, Ocean Observations and Management*, FIXO3/EMSO – *European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory*...). Envisager aujourd'hui une organisation de l'observation marine en Méditerranée, s'appuyant sur les contributions des différents pays, y compris sur les rives sud et est, n'est pas une utopie. Profiter de la dynamique et des bouleversements en cours pour progresser vers une meilleure efficacité de l'observation, une meilleure organisation des observatoires et des réseaux, est un enjeu majeur auquel la communauté scientifique est confrontée en Méditerranée.

Les observatoires et les réseaux sont confrontés également à l'enjeu de l'interopérabilité entre les différentes plateformes de mesure. Cette interopérabilité doit se réaliser au niveau des paramètres observés et des échelles « cibles » de chaque plateforme. Dans le premier cas, il s'agit de viser l'uniformisation (au moins théorique) des systèmes d'acquisition des données ainsi que

³⁰ <http://www.unep.org/geo/>

³¹ <http://www.copernicus.eu/>

³² <http://www.euro-argo.eu/>

leur amélioration/perfectionnement, ce qui demande un effort constant de veille technologique, de développement instrumental et d'interactions avec les centres des données. Dans le deuxième cas, les plateformes de mesure (anciennes/classiques, nouvelles ou au stade prototypage) doivent permettre de couvrir toute la gamme d'échelles spatio-temporelles, ce qui demande une approche multiplateforme intégrée.

Conséquence naturelle de l'approche multiplateforme, un design optimal de l'acquisition des données est de plus en plus recherché dans la conception des observatoires et des réseaux, les contraintes de coût n'étant évidemment pas étrangères à cette approche. Déjà utilisée pour la conception des missions spatiales, cette approche pose des défis considérables à l'observation *in situ*, d'autant plus que les objectifs des observatoires sont multiples et multiparamétriques. Les techniques employées pour le « *network design* » font de plus en plus appel à des modèles, à l'assimilation de données et à des méthodes statistiques sophistiquées.

Là encore, la Méditerranée présente des caractéristiques (dimensions, accessibilité) qui permettent d'envisager des performances élevées des systèmes d'observation. De nombreux points d'observation fixes et observatoires fond de mer, la surveillance hydrologique des ZEE menée par chaque pays – la Méditerranée ne comportera plus de haute mer quand tous les pays auront créé leur ZEE – et bien sûr les flotteurs profileurs multiparamétriques (bioArgo) et surtout les *gliders*, imposent d'optimiser le nombre et la localisation des plateformes, sous des contraintes de coût et d'organisation transnationale.

C. Créer un réseau de zones ateliers

Dans l'objectif de réaliser des travaux communs utilisant les mêmes approches, il serait pertinent de sélectionner au sein du bassin méditerranéen des « zones ateliers » répondant à des enjeux spécifiques (en termes de questionnement scientifique comme en termes d'enjeux socioéconomiques). Ces zones pourraient être proposées par les différents pays du pourtour méditerranéen en fonction des priorités régionales et/ou nationales et des projets internationaux.

Une zone atelier est une région dans laquelle de nouvelles méthodes de récolte et d'utilisation des données sont testées, mais qui sert aussi de plateforme pour la formation, la gestion de l'environnement, etc. Elle peut déjà comprendre (ou pas) un ou plusieurs observatoires, organisés (ou pas) en réseaux d'observations.

Dans ce contexte, un travail de recensement et de cartographie des unités de recherches et des moyens humains et techniques disponibles pour l'étude de l'adaptation du bassin méditerranéen aux changements globaux serait particulièrement utile pour favoriser les coopérations et les synergies. La mise en réseau de laboratoires de recherche marine de Méditerranée pourrait s'avérer constructive pour favoriser de tels partenariats. Cela permettrait notamment de définir et éventuellement mettre en commun les moyens nécessaires pour la mise en œuvre de programmes collaboratifs (bateaux de recherches, équipements à bord, prise en charge des scientifiques, consommables, conservation et transport d'échantillons, autorisations des pays membres pour les zones littorales...)³³.

³³ Voir IRIS-SES (*Integrated Regional monitoring Implementation Strategy in the South European Seas*), <http://iris-ses.eu/about/>

Les zones ateliers doivent être définies au niveau des différents pays méditerranéens non seulement à partir des critères écologiques, mais aussi selon les priorités socioéconomiques, en fonction du type de services environnementaux privilégiés au sein des différents territoires. D'autres critères entrent également en jeu tels que la présence d'équipes reconnues, l'existence de bases de données, la capacité à assurer des suivis, à instrumenter les sites, à relever des paramètres homogènes...

L'étude de l'élévation du niveau de la mer et de ses conséquences nécessite également la mise en place de zones ateliers, afin de stimuler l'acquisition de données climatiques, océanographiques, géodésiques et géologiques permettant d'apprécier les niveaux marins moyens et extrêmes aux échelles spatiales et temporelles pertinentes.

Encadré 13 : Favoriser la coopération en matière de collecte des données

La coopération nord, sud et est, relative à la préservation des environnements littoraux et des ressources naturelles, au développement socio-économique et culturel en Méditerranée, ne prendra forme que si les régions et pays impliqués trouvent ensemble des réponses scientifiques aux différentes préoccupations des populations et sociétés méditerranéennes, à savoir, des clefs aidant les responsables à prendre les mesures adéquates, notamment en matière de pêche et aquaculture, tourisme balnéaire, transport et logistique maritime, activités nautiques et portuaires, pollution côtière, eutrophisation des lagunes côtières...

Cet axe de coopération est d'une importance capitale, car il ouvre la porte à la construction d'un espace euro-méditerranéen réellement intégré économiquement et politiquement. Pour une meilleure efficacité, afin d'échapper à la lourdeur bureaucratique qu'imposent les coopérations multilatérales classiques telles les instances onusiennes (PNUD, PNUE-PAM, FAO...) ou internationales (OCDE, OMC...), cette coopération peut se faire dans un cadre informel, sur la base de la motivation des partenaires, autour de programmes pluridisciplinaires ayant potentiellement des retombées socioéconomiques positives dans les secteurs liés aux activités marines et littorales.

En relation avec le rôle joué par l'ANR pour le développement de la recherche océanographique en Méditerranée, et en prenant en considération le fait qu'une coopération entre rives nord et sud paraît indispensable, deux volets complémentaires sont à développer : l'échange, le partage et la coordination de la collecte des données scientifiques, d'une part, et l'implication effective des administrations, instituts et bailleurs de fonds des pays riverains, d'autre part. Outre la coordination des mesures pour la prévention des risques majeurs au niveau du bassin (tsunamis notamment) et l'harmonisation de la collecte des données au sein d'un réseau méditerranéen d'observatoires et de zones ateliers permettant des approches comparatives, des projets prospectifs, basés sur l'élaboration de scénarios, pourraient également rassembler différents pays riverains, contribuant ainsi à forger une vision partagée de la mer Méditerranée et de ses évolutions, indispensable pour ensuite trouver ensemble les réponses adaptées. Un travail de communication et de sensibilisation, notamment auprès des décideurs à différents niveaux, doit être mené en permanence pour favoriser la mise en œuvre de ces partenariats.

Encadré 14 : S'appuyer sur les réseaux et dispositifs existants en matière de collecte des données

Au niveau européen et international, il existe de nombreuses organisations et initiatives coopératives sur lesquelles s'appuyer en ce qui concerne la collecte, la mutualisation et l'analyse conjointe des données :

- PNUE/GEO : processus consultatif et participatif visant à développer les capacités des Etats à conduire des évaluations environnementales intégrées (<http://www.unep.org/geo/>).
- Copernicus : programme européen pour le développement des capacités européennes d'observation de la terre (<http://www.copernicus.eu/>).
- Euro-ARGO : contribution européenne au programme international ARGO visant à déployer 250 flotteurs Argo par an et à assurer la transmission des données aux utilisateurs (<http://www.euro-argo.eu/>).
- EMSO : réseau européen d'observatoires « fond de mer » fixes ayant pour objectif le suivi en temps réel, sur le long terme, des processus environnementaux liés aux interactions entre géosphère, biosphère et hydrosphère (<http://www.emso-eu.org/>).
- EPOS : infrastructure européenne de recherche pour les données et les observatoires sur les séismes, les volcans, les tremblements de terre et la tectonique (<http://www.epos-eu.org/>).
- CSEM : centre sismologique euro-méditerranéen opérant un système d'alerte sur les tremblements de terre (<http://www.emsc-csem.org/>).
- IRIS-SES : projet pilote sur les nouvelles connaissances pour une gestion intégrée des activités humaines marines (<http://iris-ses.eu/about/>).
- MedGLOSS : réseau de mesure systématique du niveau marin en mer Méditerranée et en mer Noire (<http://medgloss.ocean.org.il/>).
- ORE SSS : observatoire visant à collecter, valider, archiver et distribuer des mesures *in situ* de salinité de surface à partir de programmes d'observations volontaires des navires (<http://www.legos.obs-mip.fr/observations/sss>).
- MISTRALS : "*Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales*" est un méta-programme international de recherches et d'observations interdisciplinaires et systématiques dédié à la compréhension du fonctionnement environnemental du bassin méditerranéen sous la pression du changement global pour en prédire l'évolution future (<http://www.mistrals-home.org/>).
- UNESCO/COI : la Commission océanographique intergouvernementale (COI) a été mise sur pied par l'UNESCO en 1960 pour développer, recommander et coordonner des programmes internationaux de recherche scientifique océanographique et fournir aux Etats membres (aujourd'hui plus de 125) des services océaniques. La COI est reconnue par la Convention des Nations unies sur le droit de la mer comme une organisation internationale compétente dans le contexte de la recherche scientifique maritime (<http://ioc-unesco.org/>).
- CIESM : Commission scientifique méditerranéenne, regroupant 23 Etats membres (<http://www.ciesm.org/index.htm>).
- FAO/CGPM : Commission générale des pêches pour la Méditerranée, rassemblant sous l'égide de la FAO 23 pays membres qui bordent la Méditerranée et la mer Noire (Albanie, Algérie, Bulgarie, Chypre, Croatie, Egypte, Espagne, France, Grèce, Israël, Italie, Liban, Libye, Malte, Monaco, Roumanie, Slovénie, Syrie, Tunisie, Turquie, ainsi que l'Union européenne et le Japon). Elle a pour mission la promotion du développement, de la conservation et de la gestion des ressources marines vivantes ; l'élaboration et la recommandation de mesures de conservation ; la promotion de projets coopératifs de formation (<http://www.gfcm.org/gfcm/en>).
- PNUE/PAM/Plan Bleu : Centre d'observation, d'analyse et de prospective, le Plan Bleu a été mis en place à la fin des années 70 dans le cadre du Plan d'action pour la Méditerranée du Programme des Nations unies pour l'environnement et de la Convention pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée (Convention de Barcelone) (<http://planbleu.org/fr>).

D. Développer des méthodes de traitement et d'analyse des données

Les bases de données ont déjà considérablement grandi avec la multiplication des missions satellites, mais les évolutions technologiques vont encore accélérer ces tendances (du giga à la peta-échelle) avec des mises à jour plus fréquentes (de l'année/mois au jour/heure, y compris la dimension du temps réel), mais surtout, elles vont impliquer des structures des données de plus en plus complexes et de haute dimensionnalité (d'un fichier/paramètre à des millions de fichiers et des dizaines de paramètres, distribués sur plusieurs sites). Il est ainsi devenu difficile aux chercheurs des différentes disciplines de gérer, d'explorer et d'extraire les connaissances de ces bases de données, mais ce problème ne va faire que grandir. Si la question du « *big data* » et du « *data mining* » est relativement générique et devient un domaine scientifique à part entière, la recherche scientifique en Méditerranée risque d'y être rapidement confrontée dans ses aspects les plus complexes, liés à la dimensionnalité élevée et à la diversité des structures de collecte. Les questions traitées dans cet ARP pourraient fournir des cas test idéaux aux approches « *big data* ».

Il importe enfin de noter que la valorisation « en propre » des données dans un observatoire ou un réseau, et plus généralement des bases de données, fait de plus en plus appel à l'utilisation d'index synthétiques qui permettent de mieux exploiter l'information collectée, à des fins de prise de décision notamment. Les sciences marines sont moins familiarisées avec l'utilisation des index que les sciences du climat, de l'atmosphère ou des surfaces continentales et devraient s'engager dans la définition de ces index. On peut citer quelques exemples en physique (quantité d'eau profonde formée, stratification/destratification océanique, passage/fréquence des perturbations, intensité de l'activité à méso-échelle, chemins de circulation de surface, intermédiaire et profonde...), en biogéochimie (phénologie des réseaux primaires et secondaires, flux nutritifs entre surface et fond, rapports de Redfield, pompage ou dégazage de carbone atmosphérique, acidification...) et biologiques (groupes fonctionnels, index de biodiversité « classique » ou « omics »...).

II. Réaliser des exercices coordonnés de modélisation pour connaître l'état passé et anticiper l'état futur de l'océan

Les impacts des changements globaux en Méditerranée ont probablement déjà induit – ou vont conduire à – des modifications de l'hydrologie et des conséquences biologiques et écologiques qui sont encore mal comprises. L'adaptation au changement climatique nécessite une bonne connaissance des impacts régionaux de ces phénomènes, en particulier dans les régions vulnérables. Ainsi, pour atteindre une meilleure connaissance des évolutions de la mer Méditerranée en lien avec les changements globaux, deux approches complémentaires sont à promouvoir :

- la réalisation d'exercices coordonnés d'inter-comparaison de modèles-impacts du changement climatique en Méditerranée, afin d'augmenter la robustesse des prévisions fournies par les modèles ;
- la ré-analyse des données collectées par le passé en utilisant des modèles développés récemment, afin de mieux connaître l'état passé de la mer Méditerranée.

Ces approches viennent en complément des approches de modélisation intégrée décrites dans la partie 1, également indispensables à la compréhension des processus en jeu, au suivi et à l'anticipation des évolutions en cours.

A. Coordonner les études des impacts futurs du changement climatique en mer Méditerranée

Une difficulté inhérente aux modèles décrivant des systèmes complexes est de réussir à appréhender leur comportement global, leurs forces et leurs faiblesses et de résoudre les questions de leur validation et du niveau d'incertitude de leurs résultats. Un axe de recherche consiste ainsi à réaliser de manière coordonnée un exercice d'inter-comparaison de modèles-impacts, à différentes échelles spatiales et temporelles, pour différents types de modèles. Cet exercice coordonné et intégré peut être réalisé à l'échelle des partenaires français, des partenaires européens et des partenaires de l'ensemble du bassin. La réussite de ce type d'exercice demande toujours une organisation lourde, notamment pour la définition précise des objectifs scientifiques et des critères de comparaison et de validation, ainsi que pour le recueil et le traitement des données servant de métrique aux modèles.

L'étude des impacts du changement climatique régional requiert, d'une part, la disponibilité de vastes ensembles coordonnés de scénarios régionaux explorant les différentes sources d'incertitudes liées au changement climatique et, d'autre part, une connaissance détaillée des facteurs environnementaux locaux qui peuvent aggraver ou modérer les impacts du changement climatique. Ceci est nécessaire pour fournir des évaluations robustes des impacts du changement climatique sur une région donnée pouvant servir d'aide à la décision (stratégie d'adaptation en particulier). Concernant l'Europe, ces ensembles de scénarios existent déjà pour les zones continentales grâce à une succession de projets européens ou internationaux coordonnés (par exemple FP5 PRUDENCE³⁴, FP6 ENSEMBLES³⁵, FP6 CIRCE³⁶, WCRP CORDEX³⁷).

³⁴ *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*

³⁵ <http://www.ensembles-eu.org/>

³⁶ *Climate Change and Impact Research : the Mediterranean Environment* - <http://www.circeproject.eu/>

Aujourd'hui, ces exercices multi-modèles coordonnés n'existent pas pour les mers régionales et en particulier pour la mer Méditerranée, comme souligné dans une synthèse récente (Planton *et al.*, 2012). Ce manque dans la communauté scientifique s'intéressant à la modélisation océanique aux échelles climatiques limite fortement la portée des études d'impact océanique du changement climatique (passé et à venir) en Méditerranée (biogéochimie, biodiversité, écologie, pêche, tourisme, transport...).

Dans le passé récent, les exercices multi-modèles couvrant le domaine méditerranéen ont limité leur analyse au changement climatique du point de vue continental (très vaste littérature dont les rapports du GIEC de 2007 et 2014), au changement d'hydrologie (débit des rivières), aux surcotes liées aux tempêtes, aux vagues et aux flux air-mer (Sanchez-Gomez *et al.*, 2009 ; Jordà *et al.*, 2012 ; Dubois *et al.*, 2012). Ainsi, toutes les études dédiées à l'impact du changement climatique sur les paramètres physiques de la mer Méditerranée (température de surface, salinité, courants, niveau de la mer, stratification, circulation thermohaline) furent basées sur des approches mono-modèle explorant ainsi un seul des futurs possibles (Thorpe et Bigg, 2000 ; Somot *et al.*, 2006 ; Herrmann *et al.*, 2008 ; Tsimplis *et al.*, 2008 ; Carillo *et al.*, 2012 ; Lazzari *et al.*, 2013). Ces études, bien que scientifiquement et méthodologiquement intéressantes, ne permettent pas d'atteindre des conclusions robustes concernant l'évolution possible de la mer Méditerranée au cours du 21^{ème} siècle, puisqu'elles négligent les principales incertitudes reliées aux projections du climat futur : choix du scénario socioéconomique, choix des modèles utilisés et variabilité naturelle du climat. Par conséquent, toutes les études concernant l'impact du changement climatique sur la biogéochimie, la biologie ou l'écologie de la mer Méditerranée sont aujourd'hui limitées par cette approche mono-modèle (Lasram *et al.*, 2010 et Albouy *et al.*, 2013, pour la biogéographie des poissons ; Bensoussan *et al.*, 2013, pour la mortalité des gorgones rouges ; Jordà *et al.*, 2013, pour la posidonie ; Macias *et al.*, 2014 pour la pêche aux anchois ; Lazzari *et al.*, 2013, pour la biogéochimie marine). Ce verrou est donc bloquant pour les différentes communautés scientifiques travaillant sur ce sujet en Méditerranée.

Le financement de ce type de projet très structurant (lourd en temps calcul, multi-modèles et donc multipartenaires) ne peut s'envisager que dans un cadre financier assez large, en particulier si l'on veut regrouper dans le même projet des spécialistes du changement climatique régional, de la physique océanique et des impacts (biogéochimie marine, écologie, aires marines protégées, pêche, tourisme...). L'ANR, à travers les défis sociétaux, ou l'Europe, à travers le programme Horizon 2020, possèdent cette capacité de financement. Les équivalents terrestres de ces possibles projets océaniques sont par exemple les projets français IMFREX³⁸ ou SCAMPEI³⁹ ou encore les projets européens PRUDENCE, ENSEMBLES ou IMPACT2C⁴⁰.

³⁷ World Climate Research Programme - Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment - <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>

³⁸ Impact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations - <http://imfrex.sedoo.fr/web/>

³⁹ Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes - <http://www.cnrn.meteo.fr/scampeii/>

⁴⁰ Quantifying projected impacts under 2°C warming - <http://www.hzg.de/mw/impact2c/>

A notre connaissance, le dernier et seul projet national portant sur les questions liant projection future du climat régional et impact en mer Méditerranée est le projet GICC-MedWater⁴¹ (terminé en 2005). Au niveau européen, deux projets ont abordés ce thème (CIRCE et SESAME) sans succès scientifique (à ce jour, un seul article multi-modèle issu de CIRCE : Dubois *et al.*, 2012, portant sur les flux air-mer, c'est-à-dire sans analyse océanique).

L'information venant des modèles biogéochimiques et pouvant servir de base à des exercices d'inter-comparaison (production primaire globale, production exportée, indicateur de qualité des eaux en lien avec l'estimation de l'émission de gaz à effet de serre des eaux, concentration seuil de certaines variables...) devra être synthétisée sous forme de diagnostics/indicateurs. Certains indicateurs seront communs aux différentes régions, d'autres pourront être plus « site-spécifiques » et dépendre de l'objectif de l'étude (par exemple le seuil d'oxygène ou de pH dans certaines régions sensibles).

Les simulations à long terme (de l'ordre de 100 ans) avec les modèles biogéochimiques sont délicates à plusieurs niveaux. En plus du besoin de ressources informatiques énormes pour ce genre d'exercices, il faut aussi s'assurer que le modèle ne dérive pas lorsqu'il est intégré sur de longues échelles de temps afin de ne pas interpréter une dérive du modèle comme un changement climatique. Sur ce point, la communauté océanographique peut bénéficier de l'expertise de la communauté climat qui a l'habitude de ce genre de simulations sur des longues échelles temporelles. Un autre problème sera de faire évoluer les paramétrisations des modèles biogéochimiques dans le temps (par exemple la représentation de l'acidification). Sur ce point, les modèles pourront bénéficier des expériences réalisées en mésocosmes, mais il serait intéressant de déterminer comment les paramétrisations dérivées en mésocosmes peuvent être utilisées pour des simulations 3D.

B. Ré-analyser les données anciennes pour connaître l'état passé de la mer Méditerranée

Les ré-analyses océaniques consistent à décrire le plus précisément possible l'état passé de l'océan dans ses quatre dimensions. Plusieurs domaines de recherche sont concernés : le traitement des observations issues des satellites et d'instruments *in situ*, la modélisation numérique, l'assimilation de données et la validation et l'interprétation océanographique des informations produites. Aux exigences associées à ces différents domaines, il faut ajouter le fait que l'analyse numérique produite par une ré-analyse doit également vérifier une certaine cohérence temporelle, spatiale, inter-variables et inter-échelles, puisqu'au final elle doit répondre aux attentes de diverses applications. L'élaboration d'une ré-analyse exige donc des méthodes scientifiques permettant une description des fines échelles comme des grandes échelles, réaliste et cohérente dans le temps sur des dizaines d'années, reproduisant à la fois les mouvements lents des profondeurs et ceux rapides des couches de surface, et compatible avec des modèles décrivant des physiques et des échelles différentes pour pouvoir effectuer les couplages nécessaires.

⁴¹ Impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique du bassin méditerranéen - http://www.lmd.jussieu.fr/~lj/gicc_medwater/index.html

Les premières ré-analyses océaniques ont été réalisées à basse résolution, en assimilant souvent un seul type de données (profils de température/salinité ou bien niveau de mer altimétrique), pour décrire uniquement les paramètres physiques de l'océan. Depuis, de nombreux progrès ont été accomplis, aussi bien en termes de modélisation numérique que d'assimilation de données, et la puissance des super calculateurs a permis d'accroître considérablement la résolution des ré-analyses qui permettent aujourd'hui de décrire la méso-échelle, voire régionalement la sub-méso-échelle.

Les ré-analyses de l'océan ne se limitent pas à la physique de l'océan mais incluent également les aspects biogéochimiques qui sont importants pour les problématiques du changement climatique (tendances et variabilité), de la gestion des ressources marines et de la protection de l'environnement. D'autre part, les ré-analyses de l'océan (physique et biogéochimique) doivent s'attacher à décrire également les zones régionales à très haute résolution (résolution de l'ordre du kilomètre ou de quelques kilomètres) car elles sont importantes pour toutes les activités humaines liées à la mer ainsi que pour la gestion et le suivi des zones sous souveraineté nationale.

Le principal objectif de ces ré-analyses est de reproduire de façon « réaliste » les tendances climatiques et la variabilité observée (circulation thermohaline, niveau de la mer, acidification). Pour atteindre ces objectifs, il reste de nombreux verrous qu'il faudra lever au cours des prochaines années. Quels que soient les choix techniques ou les grandes orientations stratégiques, un certain nombre de travaux de développement, essentiels pour les ré-analyses devront être conduits. Ces axes de développement ne sont pas forcément propres aux ré-analyses et sont souvent transverses à d'autres thématiques de cet ARP.

- **La modélisation numérique :** il s'agit d'améliorer les modèles d'océan et leurs paramétrisations pour réduire leurs défauts (biais et dérives). Cela consiste à développer/implémenter de nouvelles paramétrisations telles que les interactions océan-vagues (dynamique, mélange vertical), la convection, les flux air-mer. On identifie également le couplage avec d'autres modèles (modèle de vague...) comme des voies d'amélioration des modèles d'océan. L'intégration de la biogéochimie dans le système à toutes les échelles est nécessaire pour plusieurs raisons. On a besoin d'une description régulière, systématique et précise de la biogéochimie marine (ce que permet l'approche intégrée couplée physique/biologique) comme socle scientifique de base nécessaire pour apporter des réponses étayées à des questionnements plus complexes (par exemple qualité des eaux, ressources, biodiversité, acidification). On a également besoin de résoudre conjointement la physique et la biogéochimie marine pour comprendre comment l'océan contribue à la variabilité du climat, notamment au travers de la contribution océanique au cycle du carbone. Pour les modèles biogéochimiques, il faut souligner l'importance de la physique verticale en tant que « révélateur » des aspects perfectibles de la dynamique des couches superficielles. Enfin, en effectuant des ré-analyses à haute résolution, on peut espérer bénéficier d'un état de l'océan moins biaisé car la résolution explicite de processus de petite échelle par le modèle aura réduit certains défauts du modèle. Il faut cependant garder à l'esprit que les défauts dus aux limitations du forçage ne seront pas résolus par cette approche. Il en résulte qu'une partie des erreurs des modèles d'océan sont dues aux erreurs du forçage atmosphérique.

- **L'assimilation de données** : l'assimilation de données doit progresser afin de mieux décrire les erreurs de prévision des modèles. Un défi majeur est la contrainte du modèle d'océan dans un contexte de réseau d'observation peu dense. Les covariances d'erreur de prévision devront pouvoir clairement séparer les erreurs de prévision grande échelle et petite échelle, afin de tirer le meilleur parti possible des rares observations disponibles. Enfin, il faudra surement aussi adopter une approche probabiliste pour décrire l'état de l'océan afin de mieux échantillonner ses états probables. Cela passe par des méthodes d'ensemble pour l'assimilation de données (approches hybrides de type EnVAR : méthodes ensemblistes variationnelles sans adjoint, permettant entre autres de quantifier l'incertitude des analyses), la fabrication de l'ensemble étant une question en soi (perturbation des observations, introduction d'une physique stochastique dans le modèle...). Une autre voie de progrès réside dans une meilleure compréhension de la différence modèle/observation afin d'améliorer la construction des opérateurs d'observation et donc des équivalents modèles.
- **Les ressources informatiques** : c'est un facteur dimensionnant pour les ré-analyses qui a un poids extrêmement important sur les choix techniques qui sont mis en œuvre, notamment en termes de résolution des modèles numériques et du nombre de simulations pouvant être réalisées, en particulier dans le cas de méthodes d'ensemble.

III. Développer des scénarios sur l'avenir des services écosystémiques fournis par la mer Méditerranée

La mer Méditerranée offre un large éventail de services, associés aux secteurs économiques littoraux et offshore, mais également des services écosystémiques dont la valeur économique est indirecte (cycle des éléments nutritifs, piégeage du carbone, attrait paysager...). La plupart des activités économiques telles que le tourisme, le transport maritime, la pêche et l'aquaculture, les industries basées sur les produits de la mer ou utilisant la mer elle-même, etc., reposent sur des services non marchands rendus par la mer Méditerranée, tels que la qualité des eaux et de l'écosystème, la biodiversité, les paysages, les cycles biogéochimiques qui assurent des fonctions de dépollution ou de piégeage du carbone.

Or, même si les fluctuations des écosystèmes marins existent naturellement, l'amplitude et la fréquence des perturbations liées aux changements globaux (surpêche, augmentation des usages récréatifs, des pollutions chimiques ou biologiques, réchauffement climatique, élévation du niveau de la mer...) se renforcent. En conséquence, les services écosystémiques fournis par les océans, qu'ils soient régulateurs (par exemple, la régulation du régime climatique, la pompe à carbone) ou fournisseurs (par exemple la nourriture, la médecine et le tourisme) en seront affectés. Le changement climatique, par exemple, contribue à la sixième crise d'extinction d'espèces et a déjà abouti à un mouvement horizontal (latitudinal et longitudinal) et vertical (bathymétrique) des distributions d'espèces. Les pronostics prédisent une importante perte de diversité à l'échelle globale et une réorganisation des assemblages, notamment en Méditerranée, une des régions les plus touchées par les changements climatiques (Giorgi, 2006).

L'avenir des différentes activités et services liés à la mer Méditerranée pourra être évalué dans le cadre de scénarios normatifs à moyenne échelle temporelle (décennale, pluri-décennale) ce qui pourrait aboutir à des recommandations pour les décideurs et/ou les gestionnaires. Concernant l'évolution du climat, des scénarios basés sur des comportements cohérents et potentiels, ainsi que sur des choix faits par les sociétés (par exemple concernant la technologie, l'économie, le mode de vie, la démographie, la gouvernance des écosystèmes, etc.) ont ainsi été développés. Ces scénarios pourront être affinés dans le contexte particulier de la Méditerranée en prenant en compte ses spécificités (démographie, contraintes alimentaires, migrations, aspirations à l'élévation des niveaux de vie et diversité culturelle).

A l'instar du GIEC, la Plateforme scientifique et politique intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), nouvellement créée, entend stimuler la communauté scientifique dans le but d'élaborer des scénarios d'évolution de la biodiversité. Cette plateforme IPBES servira de base pour la prise de décision des décideurs politiques et des gestionnaires tout en renforçant la structuration des recherches faites sur les écosystèmes marins. Dans ce contexte global, la communauté scientifique doit s'efforcer d'explorer le futur des écosystèmes marins méditerranéens, ainsi que les trajectoires possibles menant à des objectifs souhaitables selon différents scénarios environnementaux, économiques et sociaux. La communauté scientifique a besoin de construire une stratégie scientifique à long terme afin d'améliorer sa capacité à fournir une expertise adaptée pour l'approche écosystémique des

ressources marines. Cette stratégie doit être pensée et construite à l'échelle de la Méditerranée, en s'inspirant de la dynamique récemment initiée avec la constitution du réseau EMBASEAS⁴².

Il faudra développer simultanément des modèles de prédiction d'évolution des socio-écosystèmes en utilisant la meilleure science intégrée possible, mais également des modèles de décision qui permettront de répondre aux questions de développement (« qu'est ce qui se passe si ? ») mais aussi, de façon plus normative, comment atteindre dans l'avenir un état souhaitable du socio-écosystème (« comment faire pour ? »). Une réflexion préalable doit donc être envisagée sur l'identification d'« avenir souhaitables » des écosystèmes méditerranéens, en analysant les inévitables *trade-off* et en intégrant aussi la diversité des intérêts géopolitiques et culturels des rives nord et sud.

Cette approche basée sur les scénarios fournira les données essentielles pour une gestion stratégique et proactive de la dynamique des socio-écosystèmes marins. Elle devra prendre en compte de manière transparente toutes les incertitudes inhérentes à la modélisation et la projection des trajectoires des socio-écosystèmes. Elle permet d'intégrer les incertitudes, liées au manque de connaissances, dans la prise de décision (approche prospective, scénarios, prenant en compte les tendances/projections climatiques et les évolutions socioéconomiques et géopolitiques). Ce processus permettra de promouvoir l'approche à différents niveaux sociétaux : au sein de la communauté scientifique, des gestionnaires des milieux naturels et de la classe politique, mais aussi auprès des acteurs environnementaux et de la société au sens large.

Les scénarios pourront être utilisés, par exemple :

- Pour évaluer la pertinence et les incertitudes liées aux politiques actuelles de gestion des écosystèmes marins en Méditerranée.
- Pour identifier les régions de stabilité mais aussi les régions où des changements drastiques sont attendus pour la biodiversité, ainsi que leur congruence avec les mesures actuelles ou proposées : en effet, le système actuel d'AMP ne remplissant pas les objectifs de conservation fixés par la CDB, différents organismes non-gouvernementaux et intergouvernementaux (WWF, Greenpeace, Oceana, CGPM, CIESM...) ont proposé des solutions d'extension (Micheli *et al.*, 2013).
- Pour proposer des solutions pour la planification d'un réseau représentatif d'aires marines protégées en accord avec les objectifs de la CDB et prenant en compte les conditions environnementales futures.

Quel que soit le volontarisme des expériences, les processus scénarisés ou à l'œuvre de mise en réseaux d'AMP, voire de corridors biologiques identifiés et de réseaux écologiques qu'elles tentent de préfigurer, n'échappent pas à la question de la faisabilité juridique, assez durement ordonnée par le droit de la mer. Elle se tient entre deux options, l'une à l'intérieur des eaux sous juridiction d'un ou plusieurs Etats, l'autre à l'extérieur, ou un mélange des deux (Galletti et Bonnin, 2011) (voir partie 4).

⁴² http://www.cream-fp7.eu/other_html/main_results_7.html

Encadré 15 : La modélisation comme outil de sensibilisation pour favoriser le dialogue sciences-société

Des rencontres permettant la concertation entre chercheurs et décideurs pourraient contribuer à sensibiliser et à convaincre les bailleurs de fonds d'accompagner les projets de recherche, et à la mise en place de plans d'adaptation au niveau des territoires. La mise en œuvre d'une stratégie de sensibilisation des élus et des décideurs permettrait de mieux faire comprendre et accepter la pertinence des propositions techniques et juridiques liées aux enjeux nationaux mais aussi régionaux en Méditerranée. Une telle stratégie pourrait s'appuyer sur des outils d'aide à la décision (basés sur des modèles intégrés, la construction de scénarios...) et sur des plateformes multi-acteurs (comme PEGASO).

De telles démarches pourraient contribuer à l'harmonisation des normes nationales déjà en vigueur dans un certain nombre de pays, à confirmer l'unité et la cohérence du bassin méditerranéen dans ses approches socio-économiques mais aussi écologiques, et éventuellement aboutir à la mise en place de labels au niveau méditerranéen, accrédités par les instances internationales de la Convention de Barcelone (Plan d'Action pour la Méditerranée).

Un des enjeux de la modélisation et de la simulation numérique consiste également à proposer, étudier et évaluer différentes stratégies d'actions. Les observations et leviers d'actions à l'échelle des décideurs conduisent à développer des modèles simplifiés, élaborés à partir des modèles plus précis, permettant de mettre en place les outils mathématiques et numériques de la commande des systèmes et de l'optimisation, en choisissant notamment des objectifs à atteindre (indicateurs de restauration des milieux par exemple) et en caractérisant des trajectoires permettant d'atteindre ces objectifs de façon optimale (en minimisant la durée de traitement, le coût, les impacts sur la faune aquatique ou bien encore en minimisant l'énergie totale dépensée). Les modèles plus précis permettraient, de façon concomitante, de localiser les lieux les plus efficaces pour mettre en place ces stratégies, grâce à des simulations couplant les deux types de modèles.

De tels outils de prédiction et d'aide à la décision peuvent s'avérer fort utiles dans le cadre de différentes applications, que ce soit pour la gestion des déchets, la bioremédiation des milieux lagunaires, la mise en place de stratégies de conservation de la qualité écologique côtière, ou encore l'aménagement multi-usages des régions littorales permettant d'éviter ou de limiter les risques à long terme (baie d'Izmir, mer de Marmara, golfe de Gabès, baie de Gênes...).

Dans un autre registre, un important travail en matière de sensibilisation et d'éducation est réalisé auprès de la population et notamment de la jeunesse. Il reste cependant important d'aider un certain nombre de pays et de structures à enrichir leurs outils de sensibilisation et de compréhension du fonctionnement des milieux naturels, de la place de l'homme et des risques d'une destruction irréversible de la diversité biologique marine et côtière du bassin méditerranéen. La perception de ces questions par les différents types d'acteurs concernés par les problématiques liées à la mer Méditerranée, dans différentes sociétés et contextes (culturels, économiques, etc.) constitue un préalable important à étudier par les nombreux spécialistes des domaines de la communication et de la pédagogie travaillant sur ces aspects.

IV. Renforcer la coopération internationale en matière de recherche scientifique sur la mer Méditerranée

La coopération scientifique au niveau de la Méditerranée passe non seulement par des projets collaboratifs, regroupant des équipes de recherche de différents pays travaillant sur différents terrains d'étude, mais aussi par des échanges d'expérience, de techniques, voire de personnels, dans un objectif de formation et d'harmonisation ou de complémentarité des stratégies, des méthodes et des protocoles de suivi.

Ces coopérations doivent s'appuyer sur les nombreux dispositifs et réseaux internationaux existants, notamment en ce qui concerne la collecte et la mutualisation des données (observatoires, zones ateliers, etc.), mais aussi sur les outils spécifiques de partenariat mis en place par certains organismes de recherche (notamment le CNRS en support de MERMEX/MISTRALS⁴³ et l'IRD, ou encore l'initiative A*MIDEX⁴⁴ d'Aix-Marseille Université).

Encadré 16 : le programme MISTRALS

MISTRALS est un méta-programme international de recherches et d'observations interdisciplinaires et systématiques dédié à la compréhension du fonctionnement environnemental du bassin méditerranéen sous la pression du changement global pour en prédire l'évolution future.

MISTRALS a pour mission de transformer les objectifs et résultats de recherche en concepts et données accessibles aux décideurs, acteurs territoriaux et gestionnaires, afin d'identifier les besoins et nécessités nationaux et transnationaux et de répondre aux enjeux sociétaux, environnementaux et économiques pour le développement durable des pays et des populations partageant l'aire méditerranéenne.

La vision novatrice de MISTRALS est d'intégrer les analyses scientifiques faites sur le système géophysique constitué par l'aire méditerranéenne avec les besoins sociétaux, dans un souci constant d'optimisation de la communication entre chercheurs d'horizons complémentaires et niveaux de décision. Ainsi, MISTRALS s'articule actuellement autour de 8 programmes thématiques internationaux couvrant :

- l'étude du changement climatique et les interactions entre climat, sociétés et civilisations du monde méditerranéen (programmes HYMEX, SOCMED, PALEOMEX) ;
- le cycle de l'eau en Méditerranée, l'évolution de la variabilité climatique et la genèse et la prévisibilité des événements hydrométéorologiques intenses (HYMEX, MERMEX) ;
- l'évolution de la biogéochimie marine sous la pression des changements naturels et des impacts socio-économiques et anthropiques, leur influence sur les écosystèmes marins et la biodiversité (MERMEX) ;
- la composition de l'atmosphère pour en anticiper l'évolution et les impacts sur le climat régional, la qualité de l'air et la biogéochimie marine et continentale (CHARMEX) ;
- l'identification, l'analyse et la prédiction des risques – séismes, volcanisme, glissements de terrain – et des ressources géophysiques (eau) (TERMEX) ;
- le suivi de la biodiversité et de sa vulnérabilité aux pressions anthropiques et climatiques (BIODIVMEX) ;
- l'évolution des milieux urbains et ruraux – mécanismes sociaux, économiques et biotechniques – sous pression du changement global (SOCMED, SICMED).

Pays participants actuellement au méta-programme : Albanie, Algérie, Autriche, Belgique, Bulgarie, Croatie, Chypre, Danemark, Égypte, France, Allemagne, Grèce, Irlande, Israël, Italie, Jordanie, Liban, Malte, Monaco, Maroc, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Autorité palestinienne, Roumanie, Serbie, Slovaquie, Espagne, Suède, Suisse, Syrie, Tunisie, Turquie, Royaume-Uni, Canada, Nouvelle-Zélande, USA

⁴³<http://www.mistrals-home.org>

⁴⁴<http://amidex.univ-amu.fr/>

Encadré 17 : S'appuyer sur les outils mis en place par l'Institut de recherche pour le développement

Dans l'accomplissement de sa mission, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) a mis en place différents outils spécifiques de partenariat nord-sud : les Laboratoires Mixtes Internationaux (LMI), les Programmes Pilotes Régionaux (PPR) et les Jeunes Equipes Associées (JEAI).

Un LMI est une structure opérationnelle de recherche et de formation, implantée physiquement dans les locaux de partenaire(s) du sud et dédiée à la réalisation de projets conjoints de recherche, de formation et d'innovation à partir d'une plateforme scientifique commune (laboratoires, équipements, moyens informatiques, documentaires, etc.). Le LMI permet à des scientifiques du nord et du sud de développer des relations pérennes. Pour la partie française, les personnels du LMI conservent leur rattachement structurel à leur unité d'affectation. Émanant d'une ou de plusieurs unités sous tutelle IRD, un LMI a vocation à avoir un rayonnement régional et international et pourra, le cas échéant, accueillir des chercheurs et des enseignants-chercheurs issus du sud et du nord, autres que ceux appartenant aux institutions partenaires du LMI.

Les PPR sont des dispositifs structurants de coordination et d'animation pluridisciplinaire, associant des équipes du nord et du sud, autour d'objectifs communs dans une dimension régionale au sud. Les PPR ont pour but d'animer des réseaux, de fédérer des projets afin de constituer des communautés scientifiques aptes à répondre aux grands enjeux de développement au sud. Le but est de mobiliser et de fédérer les acteurs au nord vers la recherche au sud et de rassembler des cofinancements nord et sud pour renforcer l'impact des recherches qui y sont menées.

Le Programme JEAI vise l'émergence ou le renforcement d'équipes de recherche des « suds » dans le cadre de partenariats scientifiques avec des unités de recherche de l'IRD. Son but n'est pas de financer des individus ni d'appuyer des équipes solides et reconnues, mais de permettre à un groupe de chercheurs du sud de se constituer en équipe, ceci à travers la réalisation d'un projet de recherche et de formation par la recherche. La réalisation du projet, accompagnée par une étroite collaboration avec l'unité de recherche partenaire au nord, doit servir de catalyseur pour que l'équipe soutenue devienne un pôle de référence dans son domaine et s'insère plus facilement dans des réseaux scientifiques nationaux et internationaux.

Tous ces instruments sont évalués par des commissions faisant intervenir des experts extérieurs à l'IRD.

En Méditerranée, il existe actuellement :

- 3 LMI constitués dont un seul est consacré à la mer : le LMI tunisien COSYSMED (Contaminants et Ecosystèmes Marins Sud Méditerranéens), créé en 2014, impliquant trois unités mixtes de recherche du nord (ECOSYM, MIO et EME) et quatre instituts du sud (Faculté des Sciences de Bizerte, Centre de Biotechnologie de Sfax, Institut National d'Agronomie de Tunisie et Institut National des Sciences et Technologies Appliquées) ;
- 1 seul PPR qui n'est pas consacré à la mer ;
- 8 JEAI, dont une seule est consacrée à la mer : ECOBIZ (Ecologie des lagunes côtières sud méditerranéenne) basée à Bizerte, Tunisie, qui a préfiguré le LMI COSYSMED.

Liste des acronymes

ACCOBAMS	Accord sur la conservation des cétacés de la mer Noire, de la Méditerranée et de la zone Atlantique adjacente
AEP	Approche écosystémique des pêches
AMP	Aire marine protégée
ANR	Agence nationale de la recherche
ARP	Atelier de réflexion prospective
CDB	Convention sur la diversité biologique
CGPM	Commission générale des pêches en Méditerranée
CIESM	<i>The Mediterranean science commission</i>
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CNUDM	Convention des Nations unies sur le droit de la mer
COI	Commission océanographique intergouvernementale
DCE	Directive cadre européenne sur l'eau
DSCMM	Directive cadre européenne stratégie pour le milieu marin
EcAp	Approche écosystémique
FAO	<i>Food and agriculture organization</i>
FEM	Fond pour l'environnement mondial
GIEC	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIZC	Gestion intégrée des zones côtières
IPBES	Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques
IRD	Institut de recherche pour le développement
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
OMC	Organisation mondiale du commerce
PAM	Plan d'action pour la Méditerranée
PME	Petites et moyennes entreprises
PNUD	Programme des Nations unies pour le développement
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
R&D	Recherche et développement
UE	Union européenne
UICN	Union internationale de conservation de la nature
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
WWF	<i>World wide fund</i>
ZEE	Zone économique exclusive

Références bibliographiques

- ABDULLA A, GOMEI M, MAISON E. AND PIANTE C. (2008) STATUS OF MARINE PROTECTED AREAS IN THE MEDITERRANEAN SEA. IUCN, MALAGA, AND WWF, FRANCE.
- ALBOUY C, GUILHAUMON F, LEPRIEUR F, LASRAM FBR, SOMOT S, AZNAR R, VELEZ L, LELOC'H F, MOUILLOT D (2013) PROJECTED CLIMATE CHANGE AND THE CHANGING BIOGEOGRAPHY OF COASTAL MEDITERRANEAN FISHES. JOURNAL OF BIOGEOGRAPHY, 40(3):534-547.
- ALZIEU C (1998) TRIBUTYL TIN: CASE STUDY OF A CHRONIC CONTAMINANT IN THE COASTAL ENVIRONMENT. OCEAN AND COASTAL MANAGEMENT, 40(1):23-36.
- ANDERSEN RJ AND WILLIAMS DE (2000) PHARMACEUTICALS FROM THE SEA. IN CHEMISTRY IN THE MARINE ENVIRONMENT. HESTER, R.E., AND HARRISON, R.M. (EDS) CAMBRIDGE, UK: THE ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, PP. 55-79.
- ANDERSSON M, BERTSSON K, JONSSON P, GATEHOLM P (1999) MICROTTEXTURED SURFACES: TOWARDS MACROFOULING RESISTANT COATINGS. BIOFOULING, 14(2):167-178.
- ARTALE V, CALMANTI S, CARILLO A, DELL'AQUILA A AND OTHERS (2010) AN ATMOSPHERE-OCEAN REGIONAL CLIMATE MODEL FOR THE MEDITERRANEAN AREA: ASSESSMENT OF A PRESENT CLIMATE SIMULATION. CLIM DYN 35:721-740.
- AUGER PA, ULSES C, ESTOURNEL C, STEMMANN L, SOMOT S, DIAZ F (2014) INTERANNUAL CONTROL OF PLANKTON COMMUNITIES BY DEEP WINTER MIXING AND PREY/PREDATOR INTERACTIONS IN THE NW MEDITERRANEAN: RESULTS FROM A 30-YEAR 3D MODELING STUDY. PROGRESS IN OCEANOGRAPHY 124:12-27.
- BAINE M (2001) ARTIFICIAL REEFS: A REVIEW OF THEIR DESIGN, APPLICATION, MANAGEMENT AND PERFORMANCE. OCEAN AND COASTAL MANAGEMENT 44:241-259.
- BHAKUNI DS AND RAWAT DS (2005) BIOACTIVE MARINE NATURAL PRODUCTS. NEW DELHI, INDIA: ANAMAYA PUBLISHERS, P. VII.
- BANARU D, MELLON-DUVAL C, ROOS D, BIGOT JL, SOUPLLET A, JADAUD A, BEAUBRUN P AND FROMENTIN JM (2013) TROPHIC STRUCTURE IN THE GULF OF LIONS MARINE ECOSYSTEM (NORTH-WESTERN MEDITERRANEAN SEA) AND FISHING IMPACTS. JOURNAL OF MARINE SYSTEMS 111:45-68.
- BENSOUSSAN N, PAIRAUD I, GARREAU P, SOMOT S, GARRABOU J (2013) MULTIDISCIPLINARY APPROACH TO ASSESS POTENTIAL RISK OF MORTALITY OF BENTHIC ECOSYSTEMS FACING CLIMATE CHANGE IN THE NW MEDITERRANEAN SEA. IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS 1-7, OCEANS - SAN DIEGO, CA, USA.
- BERNARD O, BOULANGER AC, BRISTEAU MO AND SAINTE-MARIE J (2013) A 2D MODEL FOR HYDRODYNAMICS AND BIOLOGY COUPLING APPLIED TO ALGAE GROWTH SIMULATIONS. ESAIM: MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL ANALYSIS 47:1387-1412.
- BERTSSON KM, JONSSON PR, LEJHALL M, GATENHOLM P (2000) ANALYSIS OF BEHAVIOURAL REJECTION OF MICRO-TEXTURED SURFACES AND IMPLICATIONS FOR RECRUITMENT BY THE BARNACLE *BALANUS IMPROVISUS*. J. EXP. MAR. BIOL. ECOLOGY 251(1):59-83.
- BIANCHI CN AND MORRI C (2000) MARINE BIODIVERSITY OF THE MEDITERRANEAN SEA: SITUATION, PROBLEMS AND PROSPECTS FOR FUTURE RESEARCH. MARINE POLLUTION BULLETIN 40(5):367-376.
- BIRKMANN J, CARDONA OD, CARRENO ML, BARBAT AH, PELLING M, SCHNEIDERBAUER S, KIENBERGER S, KEILER M, ALEXANDER D, ZEIL P, WELLE T (2013) FRAMING VULNERABILITY, RISK AND SOCIETAL RESPONSES: THE MOVE FRAMEWORK. NAT HAZARDS 67:193-211.
- BOER SI, HEDTKAMP SIC, VAN BEUSEKOM JEE, FUHRMAN JA, BOETIUS A, RAMETTE A (2009) TIME- AND SEDIMENT DEPTH-RELATED VARIATIONS IN BACTERIAL DIVERSITY AND COMMUNITY STRUCTURE IN SUBTIDAL SANDS. ISME J. 3:780-791.
- BULLERI F AND CHAPMAN MG (2010) THE INTRODUCTION OF COASTAL INFRASTRUCTURE AS A DRIVER OF CHANGE IN MARINE ENVIRONMENTS. JOURNAL OF APPLIED ECOLOGY 47:26-35.
- CADOTTE MW AND DAVIES TJ (2010) RAREST OF THE RARE: ADVANCES IN COMBINING EVOLUTIONARY DISTINCTIVENESS AND SCARCITY TO INFORM CONSERVATION AT BIOGEOGRAPHICAL SCALES. DIVERSITY AND DISTRIBUTIONS 16:376-385.
- CAHU C AND ANTOINE L (2008) THE FUTURE OF EUROPEAN FISHERIES AND AQUACULTURE RESEARCH (FEUFAR) UERTD.

- CARILLO A, SANNINO G, ARTALE V, RUTI PM, CALMANTI S AND DELL'AQUILA A (2012) STERIC SEA LEVEL RISE OVER THE MEDITERRANEAN SEA: PRESENT CLIMATE AND SCENARIO SIMULATIONS. *CLIMATE DYNAMICS* 39(9-10):2167-2184.
- CARMAN ML, ESTES TG, FEINBERG AW, SCHUMACHER JF, WILKERSON W, WILSON LH, CALLOW ME, CALLOW JA, BRENNAN AB (2006) ENGINEERED ANTIFOULING MICROTOPOGRAPHIES – CORRELATING WETTABILITY WITH CELL ATTACHMENT. *BIOFOULING* 22(1):11-21.
- CIRCLE-MED (2011). PROCEEDINGS OF THE CIRCLE-MED FINAL CONFERENCE: COPING WITH CLIMATE CHANGE IN MEDITERRANEAN COASTAL AREAS: THE WATER MANAGEMENT CHALLENGE. 22-23 MARCH, 2011, AIX-EN-PROVENCE, FRANCE.
- CLAUDET J, GARCÍA-CHARTON JA, LENFANT P (2011) COMBINED EFFECTS OF LEVELS OF PROTECTION AND ENVIRONMENTAL VARIABLES AT DIFFERENT SPATIAL RESOLUTIONS ON FISH ASSEMBLAGES IN A MARINE PROTECTED AREA. *CONSERVATION BIOLOGY* 25(1):105-114.
- COLL M, CURY P, AZZURRO E, BARICHE M, BAYADAS G, BELLIDO JM, CHABOUD C, CLAUDET J, EL SAYED AF, GASCUEL D, KNITTWEIS L, PIPITONE C, SAMUEL-RHOADS Y, TALEB S, TULEDA S, VALLS A (2013) THE SCIENTIFIC STRATEGY NEEDED TO PROMOTE A REGIONAL ECOSYSTEM-BASED APPROACH TO FISHERIES IN THE MEDITERRANEAN AND BLACK SEAS. *REVIEWS IN FISH BIOLOGY AND FISHERIES* 23(4):415-434.
- COLL M, PIRODDI C, ALBOUY C, BEN RAIS LASRAM F, CHEUNG WWL, CHRISTENSEN V, KARPOUZI VS, GUILHAUMON F, MOUILLOT D, PALECZNY M, PALOMARES ML, STEENBEEK J, TRUJILLO P, WATSON RA AND PAULY D (2012) THE MEDITERRANEAN SEA UNDER SIEGE: SPATIAL OVERLAP BETWEEN MARINE BIODIVERSITY, CUMULATIVE THREATS AND MARINE RESERVES. *GLOBAL ECOLOGY AND BIOGEOGRAPHY* 21(4):465-480.
- COLL M, PIRODDI C, STEENBEEK J, KASCHNER K, BEN RAIS LASRAM F, ET AL. (2010) THE BIODIVERSITY OF THE MEDITERRANEAN SEA: ESTIMATES, PATTERNS, AND THREATS. *PLOS ONE* 5(8): e11842. DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0011842.
- COSTA O (2009) FROM RIVALRY TO CONVERGENCE: ENVIRONMENTAL COOPERATION IN THE MEDITERRANEAN. EU4SEAS PAPERS. ENVIRONMENTAL AND MARITIME POLICY.
- COURTEAU R (2011) LA POLLUTION DE LA MEDITERRANEE: ETAT ET PERSPECTIVES A L'HORIZON 2030. RAPPORT OPCEST, ASSEMBLEE NATIONALE N°3589/ SENAT N°652, 188 P.
- D'ORTENZIO F AND RIBERA D'ALCALA M (2009) ON THE TROPHIC REGIMES OF THE MEDITERRANEAN SEA: A SATELLITE ANALYSIS. *BIOGEOSCIENCES* 6:139-148.
- DE BECHILLON D (1997) LA NOTION DE TRANSDISCIPLINARITE. IN GUERRE ET PAIX ENTRE LES SCIENCES. DISCIPLINARITE, INTER ET TRANSDISCIPLINARITE. *REVUE SEMESTRIELLE DU MAUSS* N° 10, 2° SEMESTRE 1997:185-200.
- DE VRIEND HJ AND VAN KONINGSVELD M (2012) BUILDING WITH NATURE: THINKING, ACTING AND INTERACTING DIFFERENTLY. *ECOSHAP, BUILDING WITH NATURE, DORDRECHT, THE NETHERLANDS.*
- DIERCK S, METFIES K, MEDLIN LK (2008) DEVELOPMENT AND ADAPTATION OF A MULTIPROBE BIOSENSOR FOR THE USE IN A SEMI-AUTOMATED DEVICE FOR THE DETECTION OF TOXIC ALGAE. *BIOSENS BIOELECTRON* 23(10):1527-1533.
- DUBOIS C, SOMOT S, SEVAULT F, DÉQUÉ M, LHEVEDER B, LI L, CARILLO A, DELL'AQUILA A, ELIZALDE-ARELLANO A, JACOB D, SCOCCIMARRO E, ODDO P, GUALDI S (2012) FUTURE PROJECTIONS OF THE SURFACE HEAT AND WATER BUDGETS OF THE MEDITERRANEAN SEA IN AN ENSEMBLE OF COUPLED ATMOSPHERE-OCEAN REGIONAL CLIMATE MODELS. *CLIM. DYN.* 39:1859-1884.
- DUNFORD RW, GINN TC AND DESVOUSGES WH (2004) THE USE OF HABITAT EQUIVALENCY ANALYSIS IN NATURAL RESOURCE DAMAGE ASSESSMENT. *ECOLOGICAL ECONOMICS* 48:49-70.
- ECORYS, DELTARES AND OCEANIC DEVELOPPEMENT (2012) BLUE GROWTH: SCENARIOS AND DRIVERS FOR SUSTAINABLE GROWTH FROM THE OCEANS, SEAS AND COASTS. 3RD INTERIM REPORT, EUROPEAN COMMISSION, DG MARE, 126P.
- ESTRELA T, MENENDEZ M, DIMAS M, MARCUELLO C, REES G, COLE G, WEBER K, GRATH J, LEONARD J, OVESON NB, FEHER J, CONSULKT V (2001) SUSTAINABLE WATER USE IN EUROPE. PART 3: EXTREME HYDROLOGICAL EVENTS: FLOODS AND DROUGHTS. ENVIRONMENTAL ISSUE REPORT 21, EEA, COPENHAGEN, 84 PP.
- FAO (2012) SITUATION MONDIALE DES PECHEES ET DE L'AQUACULTURE. FAO-OAA. ROME, ITALY.
- FAO (2010) AQUACULTURE DEVELOPMENT 4. ECOSYSTEM APPROACH TO AQUACULTURE. IN FAO TECHNICAL GUIDELINES FOR RESPONSIBLE FISHERIES N°5, SUPPL. 4 (P. 53), ROME, ITALY: FAO.

- FIRTH LB, THOMPSON RC, BOHNA K, ABBIATI M, AIROLDI L, BOUMA TJ, BOZZEDA F, CECCHERELLI VU, COLANGELO MA, EVANS A, FERRARIO F, HANLEY ME, HINZ H, HOGGART SPG, JACKSON JE, MOORE P, MORGAN EH, PERKOL-FINKEL S, SKOV MW, STRAIN EM, VAN BELZEN J, HAWKINS SJ (2014) BETWEEN A ROCK AND A HARD PLACE: ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING CONSIDERATIONS WHEN DESIGNING COASTAL DEFENCE STRUCTURES. *COSTAL ENGINEERING* 87:122-135.
- FLEMMING CA AND TREVORS JT (1989) COPPER TOXICITY AND CHEMISTRY IN THE ENVIRONMENT: A REVIEW. *WATER, AIR AND SOIL POLL.* 44:143-158.
- FRANCOUR P, BOUDOURESQUE CF, HARMELIN JG, HARMELIN-VIVIEN M, QUIGNARD JP (1994) ARE THE MEDITERRANEAN WATERS BECOMING WARMER? INFORMATION FROM BIOLOGICAL INDICATORS. *MAR. POLL. BULL.* 28(9):523-526.
- GALLETTI F (2014) LA PROTECTION JURIDIQUE DES RESEAUX ECOLOGIQUES MARINS. COMPETENCES ET IMPLICATIONS DU DROIT DE LA MER CONTEMPORAIN, SOBRINO HEREDIA J.M. (DIR.), LA CONTRIBUTION DE LA CONVENTION DES NATIONS UNIES SUR LE DROIT DE LA MER A LA BONNE GOUVERNANCE DES MERS ET OCEANS. THE CONTRIBUTION OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE OF THE LAW OF THE SEE TO GOOD GOVERNANCE OF THE OCEANS AND SEAS, EDITORIALE SCIENTIFICA, NAPOLI, PP.765-791 (VOL. 2), ISBN 978-88-6342-638-0.
- GALLETTI F ET BONNIN M (2011) PROTECTIONS D'ESPACES ET MIGRATIONS D'ESPECES : UNE EVOLUTION DE LA CONSTRUCTION JURIDIQUE DES AIRES MARINES PROTEGEES FACE A L'ENJEU DES MISES EN RESEAUX. COLLOQUE DE L'AGENCE FRANÇAISE DES AIRES MARINES PROTEGEES : CONTRIBUTION DES AMP A LA GESTION ECO-SYSTEMIQUE DES MILIEUX ET DE LEURS USAGES, QUELLE STRATEGIE SCIENTIFIQUE? PARIS, MUSEUM D'HISTOIRE NATURELLE, 22-24 NOVEMBRE 2011, DOCUMENT PUBLIC, 15 P.
- GALLETTI F ET CHABOUD C (2014) AIRES MARINES PROTEGEES ET RESISTANCE AUX RISQUES LIES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE FONCTION RENOVEE POUR DE NOUVELLES POLITIQUES PUBLIQUES ? (EDS) BONNIN M., LAE R., BEHNASSI M., LES AIRES MARINES PROTEGEES EN QUESTION. DEFIS SCIENTIFIQUES ET ENJEUX SOCIETAUX, ED. DE L'IRD, FRANCE, PP-89-100.
- GASTON KJ, PRESSEY RL AND MARGULES CR (2002) PERSISTENCE AND VULNERABILITY: RETAINING BIODIVERSITY IN THE LANDSCAPE AND IN PROTECTED AREAS. *J. BIOSCI. (SUPPL. 2)* 27:361-384.
- GENZER J, EFIMENKO K (2006) RECENT DEVELOPMENTS IN SUPERHYDROPHOBIC SURFACES AND THEIR RELEVANCE TO MARINE FOULING: A REVIEW. *BIOFOULING* 22:339-360.
- GIORGI F (2006) CLIMATE CHANGE HOT-SPOTS. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 33:L08707, DOI:10.1029/2006GL025734.
- GODARD O (1992) LA RELATION INTERDISCIPLINAIRE : PROBLEMES ET STRATEGIES, IN SCIENCES DE LA NATURE, SCIENCES DE LA SOCIETE. LES PASSEURS DE FRONTIERES. JOLLIVET M (ED.), CNRS EDITIONS, PARIS :427-456.
- GRORUD-COLVERT K, CLAUDET J, TISSOT BN, CASELLE JE, CARR MH, ET AL. (2014) MARINE PROTECTED AREA NETWORKS: ASSESSING WHETHER THE WHOLE IS GREATER THAN THE SUM OF ITS PARTS. *PLoS ONE* 9(8):E102298, DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0102298.
- GUNDERSON LH AND HOLLING CS, EDITORS (2002) PANARCHY: UNDERSTANDING TRANSFORMATIONS IN HUMAN AND NATURAL SYSTEMS. ISLAND PRESS, WASHINGTON, D.C., USA.
- HERRMANN M, ESTOURNEL C, DÉQUÉ M, MARSALEIX P, SEVAULT F, SOMOT S (2008) DENSE WATER FORMATION IN THE GULF OF LION SHELF: IMPACT OF ATMOSPHERIC INTERANNUAL VARIABILITY AND CLIMATE CHANGE. *CONTINENTAL SHELF RESEARCH* 28(15): 2092-2112, DOI:10.1016/j.csr.2008.03.003.
- HOUGH P AND ROBERTSON M (2009) MITIGATION UNDER SECTION 404 OF THE CLEAN WATER ACT: WHERE IT COMES FROM, WHAT IT MEANS. *WETLAND ECOLOGY AND MANAGEMENT* 17(1):15-33.
- HUMPHRIES CJ, WILLIAMS PH AND VANE-WRIGHT RI (1995) MEASURING BIODIVERSITY VALUE FOR CONSERVATION. *ANNU. REV. ECOL. SYST.* 26:93-111.
- IPEMED (2008) DEMAIN LA MEDITERRANEE : SCENARIOS ET PROJECTIONS A 2030 ; CROISSANCE, EMPLOI, MIGRATIONS, ENERGIE, AGRICULTURE. C. JOLLY (COORD.).
- ISAAC NJ, TURVEY ST, COLLEN B, WATERMAN C, BAILLIE JE (2007) MAMMALS ON THE EDGE: CONSERVATION PRIORITIES BASED ON THREAT AND PHYLOGENY. *PLoS ONE* 2(3):E296. DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0000296.
- JORDÀ G, GOMIS D, ÁLVAREZ-FANJUL E, SOMOT S (2012) ATMOSPHERIC CONTRIBUTION TO MEDITERRANEAN AND NEARBY ATLANTIC SEA LEVEL UNDER DIFFERENT CLIMATE CHANGE SCENARIOS. *GLOBAL AND PLANETARY CHANGE* 80-81:198-214, DOI: 10.1016/J.GLOPLACHA.2011.10.013.

- JORDÀ G, MARBÀ N AND DUARTE CM (2013) CLIMATE WARMING AND MEDITERRANEAN SEAGRASS. *NATURE CLIMATE CHANGE* 3(1):3-4.
- KOBAYASHI N, OKAMURA H (2002) EFFECTS OF NEW ANTIFOULING COMPOUNDS ON THE DEVELOPMENT OF SEA URCHIN. *MAR. POLLUT. BULL.* 44(8):748-751.
- LANGE M, BURKHARD B, GARTHE S, GEE K, KANNEN A, LENHART H, WINDHORST W (EDS.) (2010) ANALYZING COASTAL AND MARINE CHANGES: OFFSHORE WIND FARMING AS A CASE STUDY. *LOICZ RESEARCH & STUDIES* 36, p. 214.
- LASRAM BEN RAIS F, GUILHAUMON F, ALBOUY C, SOMOT S, THUILLER W, MOUILLOT D (2010) THE MEDITERRANEAN SEA AS A "CUL-DE-SAC" FOR ENDEMIC FISHES FACING CLIMATE CHANGE. *GLOBAL CHANGE BIOLOGY* 16:3233–3245, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02224.x.
- LAZZARI P, MATTIA G, SOLIDORO C, SALON S, CRISE A, ZAVATARELLI M, ODDO P, VICHI M (2013) THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT POLICIES ON THE TROPHIC REGIMES IN THE MEDITERRANEAN SEA: SCENARIO ANALYSES. *JOURNAL OF MARINE SYSTEMS* 135:137–149.
- LLEONART J AND MAYNOU F (EDS) (2014) THE ECOSYSTEM APPROACH TO FISHERIES IN THE MEDITERRANEAN AND BLACK SEAS. *SCIENTIA MARINA* 78S1:9-9.
- LENHART HJ, RADACH G, RUARDIJ P (1997) THE EFFECTS OF RIVER INPUT ON THE ECOSYSTEM DYNAMICS IN THE CONTINENTAL COASTAL ZONE OF THE NORTH SEA USING ERSEM. *J. SEA RES.* 38:249-274.
- LEVREL H, JACOB C, BAILLY D, CHARLES M, GUYADER O, AOUBID S, BAS A, CUJUS A, FRÉSARD M, GIRARD S, HAY J, LAURANS Y, PAILLET J, PEREZ J AND MONGRUEL R (2014) THE MAINTENANCE COSTS OF MARINE NATURAL CAPITAL: A CASE STUDY FROM THE INITIAL ASSESSMENT OF THE MARINE STRATEGY FRAMEWORK DIRECTIVE IN FRANCE, *MARINE POLICY* 49:37-47.
- LEVREL H, PIOCH S, SPIELER R (2012) COMPENSATORY MITIGATION IN MARINE ECOSYSTEMS: WHICH INDICATORS FOR ASSESSING THE "NO NET LOSS" GOAL OF ECOSYSTEM SERVICES AND ECOLOGICAL FUNCTIONS? *MARINE POLICY* 36:1202-1210.
- MACÍAS D, CASTILLA-ESPINO D, GARCIA-DEL-HOYO JJ, NAVARRO G, CATALAN I A, RENAULT L AND RUIZ J (2014) CONSEQUENCES OF A FUTURE CLIMATIC SCENARIO FOR THE ANCHOVY FISHERY IN THE ALBORAN SEA (SW MEDITERRANEAN): A MODELING STUDY. *JOURNAL OF MARINE SYSTEMS* 135:150-159.
- MANGOS A, BASSINO JP, SAUZADE D (2010) VALEUR ÉCONOMIQUE DES BÉNÉFICES SOUTENABLES PROVENANT DES ÉCOSYSTEMES MARINS MEDITERRANEENS. *CAHIERS DU PLAN BLEU* n°8.
- MARGULES C AND PRESSEY R (2000) SYSTEMATIC CONSERVATION PLANNING. *NATURE* 405:243–253.
- MARINO G, BELLO-GOMEZ E, BLANCHETON JP, CALLIER M, RIGOS G, ALISTAIR L, AVILA-ZARAGOZA P, VIELMINI I, ZIZAH S, MOZES N (2013) AQUAMED: THE FUTURE OF RESEARCH ON AQUACULTURE IN THE MEDITERRANEAN REGION. REPORT: 2ND OPEN MULTI-STAKEHOLDER PLATFORM MEETING ISTANBUL, TURKEY, 20-21 MAY 2012.
- MASOJIDEK J, TORZILLO G AND KOBLIZEK M (2013) PHOTOSYNTHESIS IN MICROALGAE. *HANDBOOK OF MICROALGAL CULTURE: APPLIED PHYCOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*, 2ND EDITION. JOHN WILEY & SONS, LTD.
- MERMEX GROUP (2011) MARINE ECOSYSTEMS' RESPONSES TO CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC FORCINGS IN THE MEDITERRANEAN. *PROGRESS IN OCEANOGRAPHY* 91(2):97–166.
- MICHELI F, HALPERN BS, WALBRIDGE S, CIRIACO S, FERRETTI F, ET AL. (2013) CUMULATIVE HUMAN IMPACTS ON MEDITERRANEAN AND BLACK SEA MARINE ECOSYSTEMS: ASSESSING CURRENT PRESSURES AND OPPORTUNITIES. *PLOS ONE* 8(12):E79889. DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0079889.
- MILETI D (1999) DISASTERS BY DESIGN: A REASSESSMENT OF NATURAL HAZARDS IN THE UNITED STATES. WASHINGTON, D.C.: JOSEPH HENRY PRESS.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005) ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING: SYNTHESIS. WASHINGTON, DC: ISLAND PRESS. ISBN 1-59726-040-1.
- MOLINSKI TF, DALISAY DS, LIEVENS SL, SALUDES JP (2009) DRUG DEVELOPMENT FROM MARINE NATURAL PRODUCTS. *NAT REV DRUG DISCOV* 8:69-85.
- MOUILLOT D, VILLÉGER S, SCHERER-LORENZEN M AND MASON NWH (2011) FUNCTIONAL STRUCTURE OF BIOLOGICAL COMMUNITIES PREDICTS ECOSYSTEM MULTIFUNCTIONALITY. *PLOS ONE* 6:E17476.

- MOUILLOT D, CULIOLI J, PELLETIER D, TOMASINI J (2008) DO WE PROTECT BIOLOGICAL ORIGINALITY IN PROTECTED AREAS? A NEW INDEX AND AN APPLICATION TO THE BONIFACIO STRAIT NATURAL RESERVE. *BIOL. CONSERV.* 141:1569–1580.
- NAPOLEON C AND CLAQUIN P (2012) MULTI-PARAMETRIC RELATIONSHIPS BETWEEN PAM MEASUREMENTS AND CARBON INCORPORATION, AN IN SITU APPROACH. *PLOS ONE* 7:e40284.
- NEWMAN DJ, CRAGG GM (2004) MARINE NATURAL PRODUCTS AND RELATED COMPOUNDS IN CLINICAL AND ADVANCED PRECLINICAL TRIALS. *J. NAT. PROD.* 67(8):1216-38.
- NOTARBARTOLO DI SCIARA G, AGARDI D, HYRENBACH D, SCOVAZZI T, VAN KLAVEREN P (2008) THE PELAGOS SANCTUARY FOR MEDITERRANEAN MARINE MAMMALS. *AQUATIC CONSERV.: MAR. FRESHW. ECOSYST.* 18:367–391.
- O'ROURKE T D (2007) CRITICAL INFRASTRUCTURE, INTERDEPENDENCIES AND RÉSILIENCE. *THE BRIDGE – THE JOURNAL OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE* 37 (1):22-31.
- OROZCO J, BAUDART J AND MEDLIN LK (2011) EVALUATION OF PROBE ORIENTATION AND EFFECT OF THE DIGOXIGENIN-ENZYMATIC LABEL IN A SANDWICH HYBRIDIZATION FORMAT TO DEVELOP ALGAE BIOSENSORS. *HARMFUL ALGAE* 10:489–494.
- OTERO M, CEBRIAN E, FRANCOUR P, GALIL B, SAVINI D (2013) MONITORING MARINE INVASIVE SPECIES IN MEDITERRANEAN MARINE PROTECTED AREAS (MPAs): A STRATEGY AND PRACTICAL GUIDE FOR MANAGERS. IUCN, MALAGA, SPAIN, 136 P.
- PANIEL N AND BAUDART J (2013) COLORIMETRIC AND ELECTROCHEMICAL GENOSENSORS FOR DETECTION OF *ESCHERICHIA COLI* DNA WITHOUT AMPLIFICATION IN SEAWATER. *TALANTA* 115:133-142.
- PANIEL N, BAUDART J, HAYAT A, BARTHELMEBS L (2013) APTASENSOR AND GENOSENSOR METHODS FOR DETECTION OF MICROBES IN REAL WORLD SAMPLES. *METHODS* 64:229-240.
- PERROW C (1986) COMPLEX ORGANIGATIONS: A CRITICAL ESSAY (3RD EDN., NEW YORK, 1986).
- PIOCH S, KILFOYLE K, LEVREL H, SPIELER R (2011) "GREEN MARINE CONSTRUCTION". *JOURNAL OF COASTAL RESEARCH* 61:257-268.
- PLANTON S, LIONELLO P, ARTALE V, AZNAR R, CARILLO A, COLIN J, CONGEDI L, DUBOIS C, ELIZALDE ARELLANO A, GUALDI S, HERTIG E, JORDÀ SANCHEZ G, LI L, JUCUNDUS J, PIANI C, RUTI P, SANCHEZ-GOMEZ E, SANNINO G, SEVAULT F, SOMOT S (2012) THE CLIMATE OF THE MEDITERRANEAN REGION IN FUTURE CLIMATE PROJECTIONS (CHAPTER 8) IN: *MEDITERRANEAN CLIMATE VARIABILITY*, ED. LIONELLO, P, ELSEVIER, PP. 449-502.
- PORTILLO E, RUIZ DE LA ROSA M, LOUZARA G, RUIZ JM, MARÍN-GUIRAO L, QUESADA J, GONZÁLEZ JC, ROQUE F, GONZÁLEZ N, MENDOZA H (2014) ASSESSMENT OF THE ABIOTIC AND BIOTIC EFFECTS OF SODIUM METABISULPHITE PULSES DISCHARGED FROM DESALINATION PLANT CHEMICAL TREATMENTS ON SEAGRASS (*CYMODOCEA NODOSA*) HABITATS IN THE CANARY ISLANDS. *MARINE POLLUTION BULLETIN* 01/2014.
- POSTEN C (2009) DESIGN PRINCIPLES OF PHOTO-BIOREACTORS FOR CULTIVATION OF MICROALGAE. *ENG. LIFE SCI.* 9:165-177.
- PUJO-PAY M, CONAN P, JOUX F, ORIOL L, NAUDIN JJ, CAUWET G (2006) IMPACT OF PHYTOPLANKTON AND BACTERIAL PRODUCTION ON NUTRIENT AND DOM UPTAKE IN THE RHONE RIVER PLUME (NW MEDITERRANEAN). *MAR. ECOL. PROG. SER.* 315:43-54.
- QUENAULT B (COORD.), BERTRAND F, BLOND N, GLATRON S, PIGEON P, PEYRACHE-GADEAU V, ROCHER L (2011) VULNERABILITE ET RESILIENCE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN MILIEU URBAIN : VERS DES STRATEGIES DE DEVELOPPEMENT URBAIN DURABLE ? PROJET DE RECHERCHE PIRVE 20-2051, PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE VILLE ENVIRONNEMENT (MEDDAT, CNRS), MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME DE BRETAGNE (MSHB), JUIN, 203 P.
- QUENAULT B (2013) RETOUR CRITIQUE SUR LA MOBILISATION DU CONCEPT DE RESILIENCE EN LIEN AVEC L'ADAPTATION DES SYSTEMES URBAINS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE. *ECHOgé* 24.
- RUIZ J, PRIETO L, ASTORGA D (2012) A MODEL FOR TEMPERATURE CONTROL OF JELLYFISH (*COTYLORHIZA TUBERCULATA*) OUTBREAKS: A CAUSAL ANALYSIS IN A MEDITERRANEAN COASTAL LAGOON. *ECOL MODEL.* 233:59–69.
- SACCHI J (2011) ANALYSE DES ACTIVITES ECONOMIQUES EN MEDITERRANEE: SECTEURS PECHE–AQUACULTURE (P. 87). VALBONNE, FRANCE: PLAN BLEU.

- SANCHEZ-GOMEZ E, SOMOT S, MARIOTTI A (2009) FUTURE CHANGES IN THE MEDITERRANEAN WATER BUDGET PROJECTED BY AN ENSEMBLE OF REGIONAL CLIMATE MODELS. *GEOPHYS. RES. LETT.* 36:L21401, doi:10.1029/2009GL040120.
- SAPP M, WICHELS A, WILTSHIRE KH AND GERDTS G (2007) BACTERIAL COMMUNITY DYNAMICS DURING THE WINTER-SPRING TRANSITION IN THE NORTH SEA. *FEMS MICROBIOL. ECOL.* 59:622-637.
- SCOTT JM, DAVIS FW, MCGHIE RG, WRIGHT RG, GROVES C AND ESTES J (2001) NATURE RESERVES: DO THEY CAPTURE THE FULL RANGE OF AMERICA'S BIOLOGICAL DIVERSITY? *ECOLOGICAL APPLICATIONS* 11(4):999-1007.
- SOMOT S, SEVAULT F, DÉQUÉ M (2006) TRANSIENT CLIMATE CHANGE SCENARIO SIMULATION OF THE MEDITERRANEAN SEA FOR THE 21ST CENTURY USING A HIGH-RESOLUTION OCEAN CIRCULATION MODEL. *CLIMATE DYNAMICS* 27(7-8):851-879.
- SOMOT S, SEVAULT F, DÉQUÉ M, CRÉPON M (2008) 21ST CENTURY CLIMATE CHANGE SCENARIO FOR THE MEDITERRANEAN USING A COUPLED ATMOSPHERE-OCEAN REGIONAL CLIMATE MODEL. *GLOBAL AND PLANETARY CHANGE*, 63(2-3):112-126.
- TERLIZZI A, CONTE E, ZUPO V, MAZZELLA L (2000) BIOLOGICAL SUCCESSION ON SILICONE FOULING-RELEASE SURFACES: LONG-TERM EXPOSURE TESTS IN THE HARBOUR OF ISCHIA, ITALY. *BIOFOULING* 15(4):327-342.
- THORPE RB AND BIGG GR (2000) MODELLING THE SENSITIVITY OF MEDITERRANEAN OUTFLOW TO ANTHROPOGENICALLY FORCED CLIMATE CHANGE. *CLIMATE DYNAMICS* 16(5):355-368.
- TOURNOUD MG, PAYRAUDEAU S, CERNESSON F, SALLES C (2006) ORIGINS AND QUANTIFICATION OF NITROGEN INPUTS INTO A COASTAL LAGOON: APPLICATION TO THE THAU LAGOON (FRANCE). *ECOL. MODELL.* 193:19-33.
- TRICOT A, LOLIVE J (2013) LA PRISE EN CONSIDERATION DE LA QUESTION CLIMATIQUE EN SITUATION CONTROVERSEE : L'EXEMPLE DE DEUX COMMUNES LITTORALES BRETONNES, GAVRES ET GUISSENY. IN FRANÇOIS BERTRAND ET LAURENCE ROCHER (DIR.), LES TERRITOIRES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE. OBSERVATIONS ET REFLEXIONS SUR LA 1^{ÈRE} GENERATION DES POLITIQUES CLIMATIQUES LOCALES. PETER LANG, COLLECTION ECOPOLIS, BRUXELLES, BELGIQUE.
- TSIMPLIS M, MARCOS M, SOMOT S (2008) 21ST CENTURY MEDITERRANEAN SEA LEVEL RISE: STERIC AND ATMOSPHERIC PRESSURE CONTRIBUTIONS FROM A REGIONAL MODEL. *GLOBAL AND PLANETARY CHANGE* 63(2-3):105-111.
- TUCKER CM AND CADOTTE MW (2013) UNIFYING MEASURES OF BIODIVERSITY: UNDERSTANDING WHEN RICHNESS AND PHYLOGENETIC DIVERSITY SHOULD BE CONGRUENT. *DIVERSITY AND DISTRIBUTIONS* 19:845-854.
- UICN (2007) INTERACTION ENTRE AQUACULTURE ET ENVIRONNEMENT. GUIDE POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE DE L'AQUACULTURE MEDITERRANEENNE. FEAP, MMA, ESPAGNE, UICN, 110 P.
- UICN (2009) AQUACULTURE : SELECTION ET GESTION DE SITES. GUIDE POUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE DE L'AQUACULTURE MEDITERRANEENNE. FEAP, MMA, ESPAGNE, UICN, 340 P.
- ULUKAN H (2011) THE USE OF PLANT GENETIC RESOURCES AND BIODIVERSITY IN CLASSICAL PLANT BREEDING. *ACTA AGRIC. SCAND. SECT. B – SOIL PLANT SCI.* 61:97-104.
- UNEP/MAP/MED POL (2003) RIVERINE TRANSPORT OF WATER, SEDIMENTS AND POLLUTANTS TO THE MEDITERRANEAN SEA. MAP TECHNICAL REPORTS SERIES No. 141, UNEP/MAP, ATHENS.
- VANE-WRIGHT RI, HUMPHRIES CJ AND WILLIAMS PH (1991) WHAT TO PROTECT? SYSTEMATICS AND THE AGONY OF CHOICE. *BIOL. CONSERV.* 55:235-254.
- WALKER BH, HOLLING CS, CARPENTER SR AND KINZIG A (2004) RESILIENCE, ADAPTABILITY AND TRANSFORMABILITY IN SOCIAL-ECOLOGICAL SYSTEMS. *ECOLOGY AND SOCIETY* 9(2):5.
- WAWRIK B, PAUL JH, BRONK DA, JOHN D, GRAY M (2004) HIGH RATES OF AMMONIUM RECYCLING DRIVE PHYTOPLANKTON PRODUCTIVITY IN THE OFFSHORE MISSISSIPPI RIVER PLUME. *AQUAT. MICROB. ECOL.* 35:175-184.
- WIJFFELS RH, BARBOSA MJ, EPPINK MHM (2010) MICROALGAE FOR THE PRODUCTION OF BULK CHEMICALS AND BIOFUELS. *BIOFUELS BIOPROD. BIOREFINING* 4:287-295.
- WHITE GF AND HAAS JE (1975) ASSESSMENT OF RESEARCH ON NATURAL HAZARDS. THE MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS. CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS.
- YUCEL-GIER G, YALCIN A AND IDIL P (2010) A SPATIAL ANALYSIS OF FISH FARMING IN THE CONTEXT OF ICZM IN THE BAY OF IZMIR-TURKEY COASTAL MANAGEMENT 38(4):399-411.

ZENETOS AS, GOFAS C, MORRI A, ROSSO D, VIOLANTI JE, GARICA RASO ME, CINAR, ALMOGI-LABIN A, ATEs AS, AZZURRO E, BALLESTEROS E, BIANCHI CN, BILECENOGLU M, GAMBI MC, GIANGRANDE A, GRAVILI C, HYAMS-KAPHZAN O, KARACHILE PK, KATSANEVAKIS S, LIPEJ L, MASTROTOTATO F, MINEUR F, PANCUCCI-PAPADOPOULOU MALOU, A. RAMOS ESPLA A, SALAS C, SAN MARTIN G, SFRISO A, STREFTARIS N AND VERLAQUE M (2012) ALIEN SPECIES IN THE MEDITERRANEAN SEA BY 2012. A CONTRIBUTION TO THE APPLICATION OF EUROPEAN UNION'S MARINE STRATEGY FRAMEWORK DIRECTIVE (MSFD). PART 2. INTRODUCTION TRENDS AND PATHWAYS. MEDITERRANEAN MARINE SCIENCE, 13/2:328-352.

Annexes

Annexe 1 : Méthodologie	iii
Annexe 2 : Synthèse prospective	vii
Annexe 3 : Composition des groupes de travail	xxxii

Annexe 1 : Méthodologie

1. Démarche générale de l'ARP MERMED

Les **objectifs généraux** d'un ARP sont :

- de stimuler la réflexion prospective autour de problématiques scientifiques nouvelles ; il s'agit de réaliser des synthèses de travaux prospectifs, de réfléchir aux tendances lourdes, aux incertitudes majeures, aux futurs possibles, ainsi qu'aux thèmes de recherche prioritaires ;
- de rassembler tous types de partenaires potentiels de projets de recherche autour de ce thème pour les préparer à répondre à d'éventuels appels à projets.

Les **objectifs spécifiques** de l'ARP MERMED, tels que définis dans l'appel à propositions, sont :

- d'identifier des domaines de recherche et d'innovation qui nécessitent, aujourd'hui et dans les dix ans à venir, des coopérations entre l'Europe et les pays de la Méditerranée ;
- de définir des modes opératoires pour faciliter les coopérations entre institutions dans les domaines de la recherche, de la formation et de l'innovation.

Conformément aux termes de référence de l'appel d'offre de l'ANR, l'ARP MERMED visait en particulier à identifier les axes de recherche prioritaires à développer dans les dix à vingt prochaines années pour la Méditerranée, dans les domaines suivants : les ressources biologiques, les risques naturels, les risques liés aux activités humaines, les transports maritimes, les identités culturelles maritimes.

Pour atteindre ces objectifs, la proposition menée par Agropolis International a reposé sur trois caractéristiques fondamentales : une **démarche prospective** ; une **approche transversale et transdisciplinaire** ; un **processus multi-acteurs**, associant aux forces de recherche des acteurs impliqués dans le développement économique et la protection de l'environnement.

a) *Une démarche prospective*

Plutôt que de s'inscrire uniquement dans la continuité des tendances actuelles, l'atelier a reposé sur une démarche prospective originale : il s'est agi, pour le groupe d'expertise transversal (*cf. infra*), d'envisager dans un premier temps des futurs possibles à un horizon assez éloigné (de l'ordre de 20 à 30 ans), de manière à ouvrir largement le champ des possibles. Un cadre prospectif commun a ensuite été établi pour l'identification des axes de recherche à développer dans les dix prochaines années et les modes opératoires à envisager pour les mettre en œuvre.

Ce travail s'est effectué en recourant largement à une centaine d'études prospectives publiées ces dix dernières années, qu'elles soient de portée générale ou plus ciblées, et dont une synthèse a été effectuée (*cf. annexe 2*). Cette exploration a permis d'identifier des scénarios majeurs récurrents quelle que soit la thématique traitée (climat, biodiversité, tourisme...). Cet ensemble de scénarios a alors dessiné un faisceau de futurs possibles au sein duquel des regroupements ont été faits selon quelques critères majeurs pour les enjeux marins en Méditerranée. Les grands types de scénarios résultant de cette analyse ont alors permis de baliser le champ des possibles pour les groupes de travail.

Par cette approche récurrente (déduire les perspectives à développer d'une vision des futurs envisageables plutôt que de prolonger des tendances identifiées sur une trajectoire enracinée dans le passé), la méthode retenue a favorisé la créativité et l'identification de voies de recherche innovantes.

b) *Une approche transversale et transdisciplinaire*

L'ARP couvre un vaste ensemble de domaines thématiques. Afin d'éviter que l'atelier ne se développe de manière segmentée par champ disciplinaire, un groupe d'expertise transversal, clé de voûte de l'atelier prospectif, a été mis en place. Ce groupe, composé d'experts issus de domaines différents, a été chargé d'animer des groupes thématiques centrés sur les principaux domaines de l'ARP, tels qu'ils ont résulté des premières réflexions issues de la confrontation aux exercices de prospectives des thématiques identifiées dans l'appel à propositions, en assurant l'homogénéité de la méthode et des démarches appliquées au sein de chacun de ces groupes.

Le groupe d'expertise transversal a été chargé d'établir une synthèse des productions des différents groupes thématiques, en s'attachant tout particulièrement aux interfaces entre les différents domaines thématiques, afin que les résultats finaux de l'atelier (axes de recherche à développer) soient cohérents par rapport aux grandes problématiques sociétales émergentes, transcendant les frontières disciplinaires classiques.

c) *Un processus multi-acteurs*

Afin de mieux prendre en compte les problématiques sociales et économiques auxquelles le système de recherche est censé répondre, l'ARP MERMED a impliqué, outre les principales institutions de recherche et d'enseignement supérieur actives en Méditerranée, des acteurs du monde socio-économique, du secteur de l'innovation et du développement.

2. Organisation de l'ARP MERMED

Pour assurer la pertinence et l'efficacité de l'ARP et garantir l'effectivité de ses principales caractéristiques – démarche prospective, approche transversale et transdisciplinaire, processus multi-acteurs – le dispositif a reposé sur trois types d'instances et s'est déroulé en quatre phases. La coordination a été assurée par Agropolis International, soutenue par une équipe projet comprenant un représentant du CNRS, de l'IRD et de l'Ifremer.

Les instances (voir leur composition en annexe 3) :

- **Le Comité de Pilotage et d'Orientation (CPO)** : composé d'un représentant de chacune des institutions membres du Consortium, dûment mandaté pour prendre les décisions nécessaires au bon fonctionnement de l'ARP.
- **Le Groupe d'Expertise Transversal (GET)** : ses membres ont été identifiés et désignés par le Comité de Pilotage et d'Orientation (CPO) de l'ARP. Il comprend :
 - des experts ayant des compétences transversales et en matière de prospective ;
 - des experts spécialistes des différents domaines thématiques de l'ARP (ressources biologiques, risques naturels, risques anthropiques, transports maritimes, développement touristique, identité culturelle maritime) ;
 - des experts qualifiés pour traiter des modes opératoires pour faciliter la coopération.
- **Les Groupes de Travail Thématiques (GTT)** : leur composition a été proposée par le GET et validée par le CPO. Ils regroupent chacun une vingtaine d'experts, issus principalement des organisations membres du consortium, mais avec une ouverture à d'autres institutions et à des acteurs du monde socio-économique et de la société civile et à des experts étrangers issus d'autres pays du bassin méditerranéen.

Déroulement :

- **Phase 1 – Synthèse des études prospectives existantes**

L'ARP s'est appuyé sur les résultats des travaux précédents en matière d'études prospectives, qu'il s'agisse de grandes études de portée mondiale ou régionale ou d'études plus ciblées thématiquement ou géographiquement. Afin que l'ensemble des institutions et experts mobilisés à l'occasion de l'ARP puissent travailler sur une base commune, un cadre de référence partagé a été défini sous la forme d'une synthèse préliminaire de ces études prospectives, réalisée par le groupe d'expertise transversal (cf. annexe 2).

- **Phase 2 – Elaboration d'un cadre de réflexion prospective commun**

Afin de permettre aux différents groupes thématiques de situer leurs réflexions dans une démarche prospective, cette seconde phase a eu pour but d'élaborer un cadre prospectif partagé à l'horizon 2030-40. Pour cela, le groupe d'expertise transversal s'est réuni afin d'exploiter les résultats du document de synthèse des études prospectives sous la forme d'un exercice de prospective, ce qui a abouti à la délimitation de cinq groupes de travail thématiques puis à la production d'une note de cadrage pour chacun de ces groupes. Cette phase a déjà permis l'identification de priorités et la hiérarchisation de quelques points forts à mettre en avant parmi tous les thèmes pertinents qu'il serait légitime de développer dans le bassin méditerranéen.

- **Phase 3 – Identification des axes de recherche et des modes opératoires**

Une fois posé le cadre prospectif, les groupes de travail thématiques ont proposé dans chaque domaine des axes de recherche prioritaires à développer dès à présent pour faire face aux évolutions futures. Les cinq groupes ont fonctionné en parallèle. L'animation de chaque groupe a été assurée par des membres du groupe d'expertise transversal.

- **Phase 4 – Mise en cohérence des propositions des groupes de travail, priorisation, thématiques transversales**

Ce rôle intégrateur a été confié au groupe d'expertise transversal. Il a notamment été chargé d'élaborer un rapport intermédiaire basé sur une synthèse des productions des différents groupes thématiques, afin d'aboutir à un ensemble de propositions cohérentes et logiquement articulées entre-elles. Au cours de ce travail de synthèse, une attention toute particulière a été portée aux thématiques transversales débordant du champ de compétences propre à chaque groupe thématique, et se situant aux interfaces de ceux-ci. Ce rapport a ensuite été soumis au Comité de Pilotage et d'Orientation avant d'être finalisé.

Annexe 2 : Synthèse prospective

Le bassin méditerranéen à l'horizon 2030 : Quels défis à relever pour la mer Méditerranée ?

Sommaire

Le bassin méditerranéen : un espace démographique, économique et géopolitique en pleine mutation	viii
Ralentissement de la croissance démographique, aspiration à la démocratie... mais encore de nombreux défis à relever	viii
Une pression qui ne cesse de s'accroître sur la frange littorale	viii
Rive nord-rive sud : des liens économiques à redynamiser	viii
Trouver la voie de l'intégration régionale dans un contexte politique mouvant	ix
Eau, alimentation, énergie : faire face à des besoins croissants dans un contexte de changement climatique	x
Un « hot spot » du changement climatique, un stress hydrique qui s'accroît	x
Des incertitudes sur la sécurité alimentaire régionale.....	x
Des besoins croissants en énergie.....	xi
Des milieux marins et littoraux fragiles	xii
Un littoral vulnérable face aux risques de submersion et d'érosion	xii
Une exposition croissante aux diverses pollutions	xiii
Préserver les écosystèmes et la biodiversité, pourvoyeurs de nombreux biens et services	xiv
Des challenges qui se multiplient en mer Méditerranée	xv
Toujours plus de touristes sur les côtes, une évolution nécessaire de l'offre	xv
Un trafic maritime qui ne tarit pas	xv
Pêche et aquaculture : vers une exploitation plus durable ?.....	xvi
Révéler le potentiel des technologies et biotechnologies marines	xvi
Quelle gouvernance pour la mer Méditerranée ?.....	xvii
Vers une intégration des données et des observatoires marins en Méditerranée ?.....	xviii
Liste des fiches de synthèse des études prospectives.....	xix

Le bassin méditerranéen : un espace démographique, économique et géopolitique en pleine mutation

Ralentissement de la croissance démographique, aspiration à la démocratie... mais encore de nombreux défis à relever

Globalement, la croissance démographique se ralentit, du fait de l'accélération de la transition démographique au sud et de la convergence des indices de fécondité entre rives nord et sud, mais en 2025, la région accueillera près de 100 millions de personnes supplémentaires par rapport à 2005 (soit un accroissement de 22%). La pression démographique se fait sentir surtout dans les régions littorales, tandis que la population rurale se maintient à un niveau constant. La population vieillit, d'abord sur la rive nord, mais aussi sur la rive sud dans un second temps. Au sud toutefois, dans les années qui viennent, le problème essentiel reste le chômage avec l'arrivée massive de jeunes sur le marché du travail (3 millions de nouveaux entrants chaque année). Les pressions migratoires du sud vers le nord restent fortes. En matière d'éducation, de gros progrès ont déjà été réalisés et l'amélioration de l'accès à l'éducation se poursuit, ce qui devrait favoriser l'emploi nomade et la coopération entre les pays du sud et de l'est de la Méditerranée (PSEM) et l'Union européenne (UE). D'un point de vue culturel, la sécularisation des sociétés dans les PSEM, les aspirations à plus de droits et de libertés (notamment *via* les femmes) mais aussi les peurs des conservateurs de tous bords, risquent d'entraîner des turbulences dans les trajectoires d'évolution des pays.

Une pression qui ne cesse de s'accroître sur la frange littorale

Le littoral méditerranéen, terrestre comme maritime, est particulièrement sensible aux changements globaux en cours : c'est l'espace le plus précieux, le plus convoité et le plus menacé de la Méditerranée. Il constitue un patrimoine unique : écosystèmes originaux de grande valeur à multiples fonctions, sites, monuments et paysages de qualité exceptionnelle. Les pressions anthropiques sur ce milieu s'accroissent, compromettant les possibilités de résilience des écosystèmes : par rapport à la situation de 2005, 5000 km de côte supplémentaires seront artificialisés d'ici 2025. Assurer un aménagement équilibré du littoral et stopper la dégradation des zones côtières constitue un enjeu majeur pour la région. L'entrée en vigueur du Protocole relatif à la gestion intégrée des zones côtières en Méditerranée dans le cadre de la Convention de Barcelone suffira-t-elle à préserver cet espace fragile ?

Rive nord-rive sud : des liens économiques à redynamiser

Le marché au cours de l'antiquité a fait exister la Méditerranée, mais les clivages nationaux ou politiques, prédominants aujourd'hui, l'ont émietlée. L'économie des PSEM est encore largement rentière, peu innovante et manque de dynamisme. Malgré un taux soutenu d'investissements directs étrangers, les investissements en technologie sont encore faibles et les fuites de cerveaux importantes. Bien que des réformes aient été engagées par certains pays pour restructurer et mettre à niveau le secteur financier des PSEM, l'offre de crédit reste globalement très insuffisante, tandis que l'épargne privée est souvent captée par les Etats afin de pallier à des systèmes fiscaux faillibles. Ainsi, le système bancaire peine à jouer son rôle de levier du développement. Les infrastructures font encore largement défaut dans les PSEM. Le risque est fort de voir le commerce méditerranéen s'enfoncer dans un cul-de-sac économique, devenant une zone de transit entre l'UE et l'Afrique subsaharienne, plutôt qu'un véritable marché. Même si l'UE reste le partenaire économique privilégié des PSEM, sa part dans les échanges mondiaux tend à diminuer. Il existe néanmoins des marges de progrès importantes dans les échanges commerciaux, la coopération institutionnelle, les services, la finance...

Trouver la voie de l'intégration régionale dans un contexte politique mouvant

Les résultats du processus de Barcelone restent mitigés malgré les nombreux réseaux publics et privés qui maillent les deux rives, mais s'ignorent le plus souvent. Dans les années à venir, on peut prévoir que les forces centrifuges resteront dominantes, justifiant bien des autoritarismes. Mais les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), dont les réseaux sociaux, feront probablement évoluer les institutions et les mentalités par des voies imprévues. De grands acteurs externes continueront à exercer leur influence (Etats-Unis, Russie, pays du Golfe...), ce qui ne facilitera pas l'avènement d'une politique euro-méditerranéenne opérationnelle. Celle-ci se confronte à l'absence de vision partagée, de volonté politique, de confiance mutuelle, de ressources et d'institutions adaptées.

A moyen terme, trois lignes d'évolution dominent : une présence renforcée des Etats-Unis dans la région (sur le plan militaire, économique, diplomatique), l'installation durable d'un Islam politique, surtout à l'est, et des tentations nationalistes qui pourraient favoriser un conflit international. Trois scénarios sont envisagés : une relation de forte dépendance de certains pays vis-à-vis de l'UE, l'exacerbation des conflits d'intérêts jusqu'à la rupture, ou bien la survenue d'un choc exogène favorisant une structuration volontariste et raisonnée de la région.

Les problématiques communes sont aussi des opportunités de coopération. Un agenda euro-méditerranéen réaliste et convaincant reste à trouver, élaboré en commun (UE+PSEM). La recherche, l'innovation et la formation ont un rôle essentiel à jouer afin de passer de situations largement subies à des situations maîtrisées. Cette approche implique de quitter le cadre national et d'aborder les problèmes en considérant la région dans sa globalité. Il est urgent de s'engager dans une démarche résolument exploratoire afin de développer des capacités d'anticipation et de gestion des sociétés urbaines comme rurales. La région devrait s'ouvrir à une logique de développement plus intégrée, fondée sur la préservation des ressources naturelles, la valorisation des atouts et spécificités de la région et la cohésion sociale et territoriale.

Eau, alimentation, énergie : faire face à des besoins croissants dans un contexte de changement climatique

Un « hot spot » du changement climatique, un stress hydrique qui s'accroît

Le bassin méditerranéen sera particulièrement sensible au changement climatique. Les projections prévoient un réchauffement de 1°C d'ici 2025, +2 à 5°C d'ici 2100, ainsi qu'une baisse généralisée des précipitations pouvant atteindre -25% (et même jusqu'à -50% en été). Le cycle de l'eau en sera perturbé avec une raréfaction des ressources et un fort risque de pénurie estivale. L'enjeu de la maîtrise de l'eau au niveau du bassin est crucial : de nombreux pays riverains sont confrontés à des pénuries d'eau (qui toucheraient 290 millions de personnes en 2050) et à une surexploitation des ressources en eau (notamment les PSEM), affectant la disponibilité future des ressources en eau (salinisation des nappes, épuisement des nappes fossiles...).

De plus, les conséquences sur le milieu marin seront importantes : augmentation de la température et de la salinité de l'eau, diminution prévisible du pH de l'eau due à l'augmentation du taux de CO₂ dissout. Les organismes marins à exosquelette calcaire s'en trouveront fragilisés. La fonte des glaciers provoquera une hausse du niveau marin pouvant atteindre 50 cm sur les rives méditerranéennes d'ici la fin du siècle, accroissant les risques de tempêtes maritimes et d'inondations côtières.

Les événements météorologiques extrêmes qui marquent la région, notamment à l'automne, sont liés à l'interaction entre le réservoir de chaleur et d'humidité que constitue la mer Méditerranée et les montagnes qui la ceignent. L'augmentation de la température de l'eau et les modifications du régime hydrologique provoquées par le changement climatique auront sans doute une incidence sur la fréquence et l'intensité des aléas climatiques (sécheresse, canicules, inondations, tempêtes...). Le projet HyMex a pour objectif d'étudier et de modéliser le cycle hydrologique de la Méditerranée afin de pouvoir mieux prédire les effets du changement climatique.

En matière de changement climatique, il est nécessaire d'améliorer la capacité prospective dans la région et de créer des institutions régionales permettant un rapprochement des experts et des décideurs, afin que les effets du changement climatique puissent être pris en compte dans les décisions d'investissement à long terme (transport, énergie, gestion de l'eau, agriculture...). Il est à noter que les évolutions de la mer Méditerranée sous l'effet du changement climatique sont mal connues et difficiles à modéliser actuellement en raison d'un manque d'observations aux échelles pertinentes. Il faudrait également mettre en commun des moyens pour réagir et prévenir : réseaux d'observation météo et hydrologiques, services d'alertes, moyens aériens anti-feux, brigades de sécurité civile spécialisées dans la gestion des catastrophes...

Des incertitudes sur la sécurité alimentaire régionale

La production agricole du bassin méditerranéen est fortement contrainte par sa disponibilité limitée en terres arables et en eau. Cette situation est aggravée dans les pays du sud et de l'est du bassin par la faiblesse structurelle, technique et économique des acteurs des filières agricoles et agroalimentaires : alors que l'agriculture emploie 30% des actifs, elle ne reçoit que 4% de l'investissement public et 4% de l'aide publique au développement. Ainsi, la région Afrique du Nord/Moyen Orient est l'une des plus déficitaires en termes de disponibilité alimentaire par habitant, situation qui risque de s'aggraver à l'horizon 2030, en raison d'une demande alimentaire croissante et de ressources qui s'amenuisent. A long terme, les effets du changement climatique, provoquant une raréfaction des ressources en eau, menacent fortement la productivité agricole de la région. Le recours aux importations permet certes de pallier l'insuffisance de la production, mais au prix d'une forte dépendance vis-à-vis du marché international, avec tous les aléas que cela comporte,

comme l'ont montré les crises alimentaires récentes. Des stratégies ambitieuses de développement rural devront être adoptées au niveau régional pour réduire risques et instabilité.

Des besoins croissants en énergie

Dans les PSEM, la croissance démographique, le taux d'urbanisation et les besoins importants en matière de développement socio-économique font croître la demande énergétique, notamment en électricité. Dans les pays nord-méditerranéens (PNM) les économies d'énergies se généralisent, la demande énergétique se stabilise et la part des énergies renouvelables dans l'offre tend à augmenter. Il est à noter que dans la région méditerranéenne, le changement climatique aura probablement pour conséquence une diminution des ressources en eau et donc du potentiel hydro-électrique et parallèlement une croissance des besoins en climatisation, donc en énergie.

Globalement, les hydrocarbures resteront la première source énergétique dans les 20 ans à venir, tandis que la production de pétrole au niveau mondial devrait commencer à décroître à l'horizon 2020-2030. Face à ce déclin, l'exploitation des ressources offshore profondes, pour l'instant limitée par des contraintes importantes en termes de coûts d'exploitation et d'impact environnemental, deviendra un enjeu de taille pour les compagnies pétrolières. Des réserves considérables existent notamment en Méditerranée orientale. Ces ressources risquent d'être très fortement convoitées à court terme.

Les contraintes environnementales pousseront également les énergies renouvelables marines à se développer, en premier lieu l'éolien offshore, mais aussi l'énergie thermique des mers et la biomasse marine. D'autres sources d'énergie telles que les marées, les courants et les vagues sont encore soumises à des contraintes technologiques entravant leur développement, qui ne pourront être levées sans une forte volonté.

Des milieux marins et littoraux fragiles

Un littoral vulnérable face aux risques de submersion et d'érosion

Les risques naturels maritimes et côtiers sont importants en Méditerranée et potentiellement dangereux dans une région où la population des zones côtières est dense. La plupart de ces événements sont liés aux processus géologiques associés aux frontières de plaques et aux failles actives. La subduction de la plaque africaine sous la plaque eurasiennne est à l'origine d'une activité volcanique et sismique, qui peut à son tour engendrer glissements de terrains et tsunamis. Les séismes constituent l'aléa le plus fréquent en Méditerranée, notamment dans le bassin oriental. La plupart des sources de séismes se situent à proximité des zones côtières, avec un risque élevé de tsunamis (75% des tsunamis sont générés par des séismes peu profonds) et des temps de propagation très courts (de quelques minutes à une à deux heures maximum pour traverser le bassin).

L'identification, l'analyse et la surveillance des géo-risques marins constitue donc une priorité pour la sécurité des populations riveraines. Les connaissances sont lacunaires concernant les processus physiques à l'origine des glissements de terrain, l'activité des failles et les études paléo-sismiques. La réduction de ces risques passe nécessairement par une amélioration de la connaissance du milieu (cartographie des fonds, bathymétrie et topographie côtière), des processus générateurs, de l'historique et de la récurrence des événements, des réseaux de surveillance (volcanisme et séismes) et d'alerte (tsunamis), avec une couverture complète du bassin.

L'érosion côtière résulte de multiples facteurs (géomorphologie, géodynamique interne et externe, conditions hydrométéorologiques et climatiques et facteurs humains). Les phénomènes affectant le trait de côte peuvent être de différentes natures : surcote et tempêtes marines, réduction des apports terrigènes à l'exutoire des fleuves, montée du niveau des eaux, réduction/redistribution des stocks sableux littoraux, modification du régime des vagues, démantèlement des structures de défenses naturelles et perturbation du transit sédimentaire liés aux aménagements côtiers. De nombreux aménagements côtiers sont expérimentés, avec plus ou moins de succès, pour stabiliser les plages (rechargements, enrochements, drainage, digues...), dans différents contextes.

La fréquence des catastrophes naturelles affectant la rive sud de la Méditerranée et le Moyen-Orient a considérablement augmenté ces trente dernières années, et les risques associés plus encore du fait de l'exposition accrue des populations et infrastructures. En effet, la croissance démographique, combinée aux effets du changement climatique (montée du niveau marin et fréquence accrue des événements climatiques extrêmes), se conjuguent pour accroître fortement la vulnérabilité des villes côtières des façades sud et est de la Méditerranée. Parmi les 20 métropoles côtières mondiales dont la vulnérabilité augmentera le plus face aux risques de submersion entre 2005 et 2050, la moitié se situent sur les rives de la Méditerranée, y compris sur la rive nord.

Agir pour la résilience et l'adaptation des villes côtières méditerranéennes au changement climatique devient donc une priorité : les plans d'urbanismes doivent tenir compte des risques, les institutions doivent évoluer vers plus d'efficacité et une meilleure coordination et les infrastructures urbaines de protection doivent être améliorées et renforcées. Dynamique naturelle et gestion du littoral sont indissociables dans une nouvelle « philosophie des rivages » qui vise la compréhension globale des processus naturels et humains et qui sous-tend une variété d'approches méthodologiques complémentaires et d'échelles d'études spatiales et temporelles.

Une exposition croissante aux diverses pollutions

Dresser un inventaire de la pollution en mer Méditerranée est une tâche énorme, avec 100 000 molécules en circulation dans la région, dont 3 000 classées dangereuses et 2 000 transportées par la mer. La majeure partie de la pollution de la mer est d'origine continentale (70 à 80% pour les déchets solides, essentiellement des plastiques, provenant en grande partie du tourisme et des décharges : 80% des décharges ne sont pas surveillées dans les PSEM - plus de 50% des zones urbaines méditerranéennes de plus de 100 000 habitants n'ont pas de système de traitement des eaux usées), véhiculée principalement par les cours d'eau, mais aussi l'atmosphère (issus des activités industrielles et de transport : métaux tels que plomb, cadmium, mercure ; éléments nutritifs tels qu'azote et phosphore...). Le reste provient directement des activités en mer. Tous les milieux sont touchés : les macro-déchets s'accumulent dans les canyons côtiers, à l'abri des courants. 70% d'entre eux se déposent au fond des océans, tandis que 15% restent en surface et 15% se retrouvent sur le littoral. Les polluants organiques persistants, les métaux et les radio-isotopes s'accumulent au fond des océans et le long des chaînes trophiques. L'ouest du bassin est plus fortement touché par les micropolluants organiques, tandis que l'est du bassin concentre plus les micropolluants métalliques.

En tant que mer fermée, la Méditerranée est encore plus vulnérable que les océans aux pollutions chroniques. Les impacts de ces déchets sur les organismes et milieux marins, mais aussi sur la santé humaine, sont encore largement méconnus. Les études existantes se sont concentrées sur les molécules connues comme les plus dangereuses (PCB et HAP essentiellement), mais les connaissances concernant les phytotoxines, les polluants secondaires issus de la dégradation des macro-déchets, les contaminants émergents tels que les molécules médicamenteuses, non filtrées par les stations d'épuration, sont quasiment inexistantes. Les études concernant les transferts de polluants et leurs effets croisés font encore largement défaut, mais il est à craindre que la pollution accentue la vulnérabilité des écosystèmes marins au changement climatique.

Comme la majeure partie de la pollution marine est d'origine terrestre, le niveau de pollution dépend donc avant tout des politiques nationales. Sur la rive nord, le cadre législatif et réglementaire a nettement progressé : interdiction des polluants les plus dangereux, surveillance des eaux continentales, maillage des stations d'épuration, recyclage industriel... avec des résultats positifs en matière de réduction des pollutions (diminution des concentrations en plomb et en cadmium, DDT, etc.). Pour autant, la pollution de la mer Méditerranée va continuer d'augmenter dans les années à venir, en raison de l'expansion démographique des villes côtières, de l'artificialisation croissante du littoral, du développement des activités maritimes, et de l'absence de priorité sur les politiques environnementales dans les PSEM. Le risque est grand de voir l'écart se creuser entre rives nord et sud. Or, le problème de la pollution de la mer Méditerranée ne pourra être résolu sans une gouvernance commune s'appliquant à l'ensemble du bassin. Des initiatives existent déjà telles que l'amélioration du dispositif de Barcelone, une intervention renforcée de l'UE, et la création de l'Union pour la Méditerranée. Malgré l'existence de ces conventions régionales, il existe très peu d'instruments légaux qui soient efficaces à cette échelle. Les actions de coopération en matière de gouvernance environnementale doivent donc se renforcer, avec des financements dédiés. L'évaluation des conséquences économiques de la pollution de la Méditerranée devrait d'ailleurs aider à la prise de conscience. Il est également nécessaire de renforcer le suivi des polluants, d'améliorer le traitement des effluents et le contrôle des rejets, de favoriser l'utilisation de matériaux biodégradables, d'anticiper sur les futurs polluants émergents... L'éducation à l'environnement est également primordiale pour réduire les déchets à la source.

Préserver les écosystèmes et la biodiversité, pourvoyeurs de nombreux biens et services

Les écosystèmes marins méditerranéens fournissent un certain nombre de biens et services environnementaux tels que la production de ressources alimentaires, le support d'aménités et d'activités récréatives, la régulation du climat, l'atténuation de l'érosion. Le maintien de ces biens et services n'est possible que si ces écosystèmes sont préservés ou exploités de manière durable. Or, il est avéré depuis l'antiquité que les activités de pêche menées de manière trop intensive ont de graves répercussions sur l'état des écosystèmes : 98% des réductions de populations d'organismes marins et 100% des extinctions sont dues à une surexploitation. De nombreuses espèces de haut niveau trophique sont aujourd'hui menacées (thon rouge, phoque moine, tortues...). Par ailleurs, la dégradation des habitats par les activités humaines (chalutage de fond, sur-fréquentation, pollutions diverses, modification des rapports stœchiométriques des éléments minéraux...) constitue actuellement la principale menace pour les écosystèmes marins méditerranéens, notamment des marges continentales. Enfin, les effets du changement climatique (augmentation de la température, de la salinité et de l'acidité de l'eau, modification des régimes hydrodynamiques de surface et en profondeur) sur le fonctionnement des écosystèmes marins se font déjà sentir et vont aller croissant. Certains coraux sont déjà à la limite de tolérance de leur habitat. La barrière de température observée au niveau de la Sicile entre le bassin nord-ouest, plutôt froid, et le bassin sud-est, plutôt chaud, risque de s'effacer, permettant aux espèces atlantiques ou lessepsiennes de se répartir dans l'ensemble de la Méditerranée. L'habitat climatologique (en termes de température) des poissons des marges continentales va probablement disparaître, menaçant de disparition 20% des espèces. Des micro-organismes toxiques, potentiellement dangereux pour l'homme, sont apparus : *Gambierdiscus* (agent de la ciguatera) et *Ostreopsis*. Des espèces invasives en provenance de la mer Rouge prolifèrent.

Par ailleurs, la synergie entre augmentation de température et événements extrêmes est préoccupante : elle est responsable de remplacements d'espèces et de phénomènes de mortalité massive d'invertébrés, dues à des dépassements de seuils physiologiques, mais aussi au développement de pathogènes favorisés par la température. Ce type d'événements, dont les plus marquants se sont manifestés en 1999 et 2003, s'est multiplié à partir des années 80.

De plus, l'homogénéisation de la température et la modification des régimes de circulation thermohaline auront des effets sur la prolifération d'espèces invasives et opportunistes. Les biorégions caractérisées par un cycle saisonnier du phytoplancton seront bouleversées, sans que l'on puisse prédire de quelle façon ni dans quelle mesure, mais avec des conséquences certaines le long des chaînes trophiques. La modification des paramètres de production en surface a en effet des répercussions jusque sur les écosystèmes profonds. Des changements brutaux dans les régimes de circulation peuvent avoir des effets dramatiques sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes.

Les réseaux d'aires marines protégées constituent le principal outil de conservation en Méditerranée. Elles ne couvrent que 5% de sa surface mais capturent bien les « *hot spots* » de biodiversité. En revanche, elles couvrent mal les zones sensibles cumulant biodiversité importante et fortes menaces, et encore moins les zones de forte diversité fonctionnelle et phylogénétique. Ces dimensions, ainsi que la connectivité entre zones, doivent être mieux intégrées aux politiques de conservation.

De nombreuses données de base (sur les cycles de vie, la reproduction, la structuration génétique, la connectivité, l'adaptation au stress *via* la plasticité phénotypique et les processus micro-évolutifs, etc.) font encore défaut pour être en mesure d'évaluer les aspects liés à l'adaptation (des organismes, des espèces, des communautés, des écosystèmes) aux changements globaux. Par ailleurs, en plus d'un approfondissement des connaissances sur les écosystèmes marins, leurs interactions et leur résilience face aux changements globaux (conjonction des changements climatiques avec les autres perturbations anthropiques : effets sur la physiologie, les cycles de vie, les distributions, les capacités d'adaptation...), il serait nécessaire de développer une approche économique se basant sur l'évaluation dynamique des bénéfices provenant de ces écosystèmes.

Des challenges qui se multiplient en mer Méditerranée

Toujours plus de touristes sur les côtes, une évolution nécessaire de l'offre

Le bassin méditerranéen concentre un tiers des flux mondiaux de tourisme (300 millions d'arrivées internationales en 2008), avec 45% des touristes qui se concentrent sur les zones littorales. Le secteur des croisières a également connu une importante croissance depuis 15 ans, avec un fort impact en termes de nombre de personnes au m² au niveau des destinations. Le bassin est aussi un espace privilégié pour la navigation de plaisance. D'une manière générale, la région est confrontée à un problème de sous-équipement en haute saison (congestion des ports et des sites touristiques) et de suréquipement en basse saison.

Avec l'augmentation globale des flux touristiques mondiaux, les prévisions pour 2025 tablent sur plus de 630 millions de touristes dans le bassin méditerranéen, dont une majeure partie sur les côtes. Cependant, les destinations méditerranéennes vont perdre de l'attractivité face à la concurrence accrue d'autres destinations à l'échelle mondiale, notamment en ce qui concerne la demande traditionnelle « mer-soleil ». Le secteur est, de plus, particulièrement sensible aux crises économiques et politiques, et le changement climatique risque d'exacerber les problèmes existants (pénurie d'eau, canicules...) avec pour effet une baisse de l'attractivité de certaines zones, et/ou un décalage des saisons touristiques.

Par ailleurs, l'avènement des NTIC a profondément modifié les pratiques des touristes : + de 75% d'entre eux préparent leur voyage sur Internet, notamment la réservation de leur hébergement. Les attentes des voyageurs évoluent également vers un « tourisme autrement » plus riche en échanges avec les populations locales. Les professionnels du tourisme étant très peu préparés à ces évolutions, l'adaptation des formations est nécessaire. Face à ces évolutions, miser davantage sur le tourisme domestique, qui constitue une source de stabilisation, peut être un pari gagnant. Une meilleure planification est nécessaire dans les stratégies de développement des territoires, prenant en compte les impacts socio-économiques et environnementaux de la fréquentation touristique, afin de déterminer une « capacité optimale d'accueil » pour préserver les ressources et l'attractivité des sites.

Un trafic maritime qui ne tarit pas

Zone stratégique de passage des échanges de l'UE avec le reste du monde, la Méditerranée est l'une des zones où le transport maritime est le plus dense. L'Asie reste le principal partenaire commercial de l'UE et la principale source de marchandises à l'origine des flux maritimes. Quant à la Méditerranée, elle ne représente qu'une zone de transit et ce sont les ports du nord de l'Europe qui accueillent la grande majorité des marchandises, y compris celles en provenance des PSEM. Les flux intra-méditerranéens ne représentent qu'un quart du trafic, dominés par les exportations de pétrole et de gaz des PSEM vers la rive nord de la Méditerranée.

En 10 ans (1997-2006), la capacité de transport en Méditerranée a augmenté de plus de 50%, soutenue par l'augmentation du trafic (+15%) et l'augmentation de la taille des navires (+40% en moyenne). Le transport de conteneurs (36% des échanges) a notamment connu une croissance particulièrement forte : +71% en termes de trafic et +55% en termes de taille des navires. Le transport maritime sera peu impacté par l'augmentation des prix du carburant ou de la tonne de CO₂.

Il existe donc une grande marge de manœuvre pour que le transport maritime contribue à l'intégration méditerranéenne, en renforçant les échanges de proximité, en favorisant la complémentarité du système productif méditerranéen et en sortant du système du « gigantisme ». Mais ceci ne sera pas possible sans une forte intégration politique et économique du bassin méditerranéen.

Pêche et aquaculture : vers une exploitation plus durable ?

Les activités de pêche sont en déclin en Méditerranée, en raison d'une surcapacité de pêche entraînant une surexploitation des ressources, qui atteint aujourd'hui 60% des espèces commerciales. En termes de captures, le pic a été atteint en 1995 (1 million de tonnes contre 420 000 tonnes en 1950), et on assiste depuis à une décroissance faible mais continue. En termes de valeur, le pic a été atteint dès 1985 (3 milliards de \$, tombé aujourd'hui à 1,5 milliards de \$), indiquant que la surexploitation a d'abord touché les espèces commerciales les mieux valorisées sur le marché. Depuis les années 80, le nombre de navires de pêche a légèrement diminué, mais pas les capacités de pêche (80% de la flotte est artisanale, mais les navires industriels ne cessent de croître en taille et capacité). Les politiques de régulation des activités de pêche ont été un échec : 75% des subventions au secteur ont eu pour conséquence soit une augmentation des capacités de pêche, soit des effets « ambigus » qui n'ont pas permis d'améliorer la durabilité de l'activité. Les quotas ou « totaux autorisés de capture » sont toujours supérieurs à ceux préconisés par les scientifiques et les contrôles sont défectueux. Par ailleurs, les effets des changements globaux sur le secteur de la pêche sont encore difficiles à prévoir, mais des impacts sur la fécondité, le recrutement et les réseaux trophiques sont probables. Les risques de pollution augmentent également, et ainsi le risque de contamination chimique ou biologique des produits, avec des impacts sur la santé humaine et un déficit d'image des produits de la mer vis-à-vis des consommateurs. La traçabilité des produits et la mise en place d'écolabels sera une demande croissante des consommateurs.

Par ailleurs, l'aquaculture s'est fortement développée ces 30 dernières années et continuera sa croissance (notamment sur la rive sud), avec des marges de progrès considérables, tant en quantité qu'en qualité (alimentation des poissons, sélection génétique assistée par marqueurs, systèmes recirculés pour réduire les effluents et la consommation énergétique, vaccination, détection précoce des maladies...).

Un rapport du Plan Bleu préconise une diminution des capacités de pêche de l'ordre de 50% en Méditerranée afin d'atteindre l'objectif d'une gestion durable des pêches. Le coût estimé de cette réduction de capacité s'élève à 3 milliards de \$, mais les bénéfices attendus sur le long terme (50 ans) représenteraient 6 à 8 fois le coût de la mesure. Par ailleurs, il faudra passer d'une gestion des espèces marines exploitées à une gestion intégrée des espaces marins : cela inclut l'approche écosystémique des pêches (AEP) et la mise en place et le maillage d'aires marines protégées pour assurer le renouvellement des espèces. Le succès d'une telle approche dépendra, d'une part, de notre capacité à traduire les objectifs généraux de l'AEP en objectifs opérationnels, avec des méthodes d'évaluation fiables et efficaces. D'autre part, une telle approche doit impliquer tous les acteurs concernés, y compris ceux ayant des intérêts divergents voire conflictuels (rétablir le dialogue entre pêcheurs, scientifiques, décideurs politiques et société civile), et nécessite une coordination forte à l'échelle méditerranéenne. La pêche artisanale et les circuits courts doivent être encouragés, et les professionnels du secteur doivent devenir les premiers acteurs de la gestion des pêches, *via* des quotas individuels transférables par exemple, avec l'appui d'un réseau scientifique régional pour aboutir à l'émergence de pôles régionaux de gestion des stocks.

Révéler le potentiel des technologies et biotechnologies marines

La mer abrite de vastes ressources de nature minérale, énergétique, biologique, spatiale... et offre de nombreux services écosystémiques, dont l'exploitation durable constitue un enjeu de taille. A côté des secteurs économiques classiques tels que la pêche, la construction navale, les ports et la logistique, le pétrole et le gaz, le tourisme côtier et la protection du littoral, le potentiel de « croissance bleue » basé sur l'exploitation des ressources marines non conventionnelles est considérable. Les secteurs émergents sont notamment les productions aquatiques marines (algoculture en particulier), les biotechnologies de la mer, l'éolien marin, les mesures et moyens de

surveillance à la mer, l'industrie de la croisière et du loisir. D'autres secteurs n'en sont qu'à leurs balbutiements comme les énergies renouvelables marines autres qu'éolienne, les minéraux marins.

L'évolution des technologies permet des développements dans les domaines de l'océanographie (systèmes de mesure et d'intervention sous-marine), de l'industrie (ressources minérales et énergétiques, énergies renouvelables, pêche) et de la surveillance (capteurs, automatisation). Les ressources minérales hydrothermales sous-marines, qui font actuellement l'objet d'importants programmes de prospection, seront très probablement soumises à une forte pression d'exploitation à l'avenir, avec la pénurie de certains métaux d'origine terrestres. Les écosystèmes marins ont été encore peu explorés en comparaison des écosystèmes terrestres. Grâce à l'évolution des méthodes d'analyse et de criblage, les organismes invertébrés, les micro-organismes, les microalgues, les co-produits de la mer offrent un potentiel considérable en matière de nouveaux produits et services pour la santé, la cosmétique et l'agro-alimentaire, l'environnement (bio-rémédiation, biocapteurs, biomatériaux), l'industrie (bioprocédés et bioproduits), les bioénergies (biocarburant). Les réglementations européennes telles que REACH (1/3 des matériaux et produits chimiques d'origine biologique en 2030) vont probablement stimuler la bio-prospection et les découvertes dans ce domaine. Les molécules actives entrent, comme les autres ressources biologiques ou minérales, dans les discussions à propos des extensions de ZEE (zones économiques exclusives).

Quelle gouvernance pour la mer Méditerranée ?

Malgré une prise de conscience de la nécessité d'une gestion durable de la mer et des zones littorales depuis le début des années 70, la Méditerranée peut être considérée aujourd'hui comme un puzzle de zones disparates et faiblement délimitées. Les appellations et typologies des aires marines protégées sont très diverses et étroitement liées à des contextes législatifs et réglementaires nationaux. En 2010, les aires marines protégées en Méditerranée sont au nombre de 677 et couvrent une superficie de 115 000 km², soit 4,6% de la Méditerranée, bien loin des objectifs affichés de couvrir 10% de la surface de la mer. Elles sont essentiellement côtières et localisées dans le nord du bassin, ne sont pas représentatives des écorégions et couvrent mal les aires de répartition des espèces menacées. Beaucoup n'ont pas encore de gestionnaire ni de plan de gestion opérationnel.

L'entrée en vigueur du protocole relatif à la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) adopté en janvier 2008 par les parties contractantes à la Convention de Barcelone, constitue le premier instrument juridique supra-étatique visant spécifiquement la gestion des zones côtières. Deux grandes approches de la mise en œuvre de la GIZC sont observées : d'un côté la prolifération d'une approche par projet, s'appuyant sur l'expérimentation, avec une portée locale et, d'un autre côté, une approche par les instruments juridiques, assise sur des engagements internationaux, contraignants ou non, et qui se déploie lentement au niveau régional et national. Il persiste une difficulté à dépasser le temps du projet et à inscrire l'approche GIZC de manière durable dans les politiques. Il faut encore améliorer la prise de conscience par les décideurs, démontrer la valeur ajoutée pour les populations locales et prendre en compte les enjeux économiques et sociaux.

Au-delà des zones côtières, la conservation de la biodiversité et l'exploitation durable des ressources appellent une approche écosystémique, prenant en compte le système et ses processus, le besoin de zones de protection et de corridors, la nécessité d'intégrer les réseaux trophiques et l'importance de l'incidence des activités humaines. La planification spatiale maritime constitue un outil intéressant pour analyser et planifier la distribution spatiale et temporelle des activités humaines et des usages spécifiques au sein de l'espace maritime.

Pour aborder efficacement l'ensemble de ces questions, la coopération entre Etats est la clé, elle doit être supportée par une volonté politique forte. En effet, une telle approche est impossible à mettre en œuvre efficacement en haute mer ou de manière coordonnée dans des zones sous juridictions disparates et hétérogènes. La création coordonnée de ZEE est une solution potentielle, à condition

que ces ZEE soient gérées de manière cohérente et harmonisée. Dans les zones situées au-delà des juridictions nationales (eaux internationales au-delà des 200 miles marins pour la haute mer et au-delà du plateau continental des Etats), le cadre juridique de création d'aires marines protégées apparaît incomplet. Plusieurs scénarios d'évolution sont possibles, allant du patchwork de statuts juridiques jusqu'à un système harmonisé. Une telle harmonisation pourrait se réaliser dans le cadre de la Convention de Barcelone, permettant le développement d'un régime juridique intégré adapté à la conservation de la biodiversité et à la pêche durable. Cela nécessitera une volonté politique commune, il faudra agir à la fois au régional et au niveau international, *via* la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) et la Convention des Nations Unies sur le Droit de la Mer (CNUDM).

Vers une intégration des données et des observatoires marins en Méditerranée ?

En dépit des efforts d'observation et de recherche entrepris en mer Méditerranée depuis plus d'un siècle, une vision intégrée du fonctionnement de ce bassin fait toujours défaut pour être en mesure de prévoir son évolution face au changement climatique et aux pressions exercées par les activités humaines. En effet, la plupart des systèmes d'observation actuels manquent d'intégration et de pérennité. De plus, des modèles numériques prédictifs doivent pouvoir être élaborés à différentes échelles spatiales et temporelles.

L'évolution actuelle de solutions technologiques de mesure *in situ* (véhicules sous-marins autonomes, miniaturisation des capteurs biologiques et chimiques, transmission des données en temps réel...) apporte de nouvelles solutions adaptées à la standardisation, à l'automatisation et à la réduction des coûts, pour une observation du milieu marin et de son évolution à long terme. Ainsi, il semble plus que jamais nécessaire de réfléchir à la mise en place d'un système d'observation intégré à l'échelle méditerranéenne, permettant de relier et coordonner les données acquises par les différents systèmes existants, des zones côtières aux grands fonds, de la météorologie aux pêches, des aspects biophysiques aux aspects socio-économiques... Le déluge de données acquises doit répondre à certains enjeux : comment passer des données aux informations et aux connaissances ? Les référentiels et descriptifs (métadonnées) doivent être harmonisés, un langage commun doit être adopté faisant consensus entre les différentes thématiques concernées. Les modèles numériques doivent quant à eux progresser au niveau des changements d'échelles et de l'intégration des incertitudes.

Un atelier de la CIESM (Commission méditerranéenne pour la science) a défini les caractéristiques d'un système d'observation « idéal » : couvrir toute la Méditerranée, en considérant les sous-régions, les différents écosystèmes et les zones frontalières ; être ouvert à l'accueil de toutes les disciplines, fédérer les activités et archiver les données ; définir les paramètres-clés à suivre et les « sorties » intéressant les acteurs ; s'appuyer sur un maximum d'outils (plateformes profondes et côtières, navires, plateformes autonomes) et de technologies ; mesurer les échanges aux détroits ; suivre les sites de formation d'eaux profondes ; établir des liens avec la météorologie et l'hydrologie continentale. Au niveau français, la coopération, la complémentarité et les synergies entre organismes doit encore être renforcée. L'observatoire SOERE MOOSE est destiné à devenir la composante française d'un réseau méditerranéen global d'observation marine. Au niveau européen, il existe une forte volonté de se doter d'un système d'accès aux résultats d'observation de l'océan. Mais au niveau méditerranéen, il est indispensable d'associer également les PSEM. La question des financements se pose : au niveau national et européen, la nécessité de financements pérennes pour maintenir les conditions opérationnelles et les services associés fait son chemin. D'autant plus que le risque d'une prise de contrôle des données environnementales par des opérateurs privés n'est pas négligeable.

Liste des fiches de synthèse des études prospectives

(les fiches sont consultables en ligne :

<http://www.agropolis.fr/gestion-projets/atelier-reflexion-prospective-mermed-mer-mediterranee-recherche-partenariats.php>)

Le bassin méditerranéen : un espace démographique, économique et géopolitique en pleine mutation

	Titre	Auteur	Année
1	State of the environment and development in the Mediterranean	PNUE	2009
2	Méditerranée : les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement.	Plan Bleu, dirigé par G. Benoit et A. Comeau	2005
3	The Blue Plan's sustainable development outlook for the Mediterranean	Plan Bleu	2008
4	Méditerranée 2030	G. Almeras et C. Jolly	2009
5	Euro-Med 2030 - long term challenges for the Mediterranean area	Commission Européenne DG Recherche et innovation	2011
6	Demain, la Méditerranée - scénarios et projections à 2030	IPEMED, coordonné par C. Jolly et N. Macarena	2011
7	Medpro - Mediterranean prospects	Centre for European Studies	2013
8	ARP PARME: Partenariats et recherches en Méditerranée	Coordonné par B. Hubert	2010

Eau, alimentation, énergie : faire face à des besoins croissants dans un contexte de changement climatique

Titre	Auteur	Année
<i>Changement climatique</i>		
1 The climate of the Mediterranean region: from the past to the future	Edité par P. Lionello	2012
2 Région méditerranéenne et changement climatique	S. Hallegatte, S. Somot et H. Nassopoulos	2009
3 Climate changes, impacts and vulnerability in Europe in 2012	Coordonné par H.M. Fussel	2012
4 Rapport du GIEC	GIEC	2014
5 Hymex wxhite paper	P. Drobinski, V. Ducrocq et al.	2008
<i>Agriculture et alimentation</i>		
1 Agrimonde	Cirad-Inra	2008
2 Le défi alimentaire à l'horizon 2050	Coordonné par Y. Collin	2012
<i>Energie</i>		
1 L'énergie en Méditerranée : situation perspectives, contraintes et enjeux	M.K. Faïd	2007
2 Energies 2050 : les choix et les pièges	B. Tissot	2007
3 Energie (offshore : pétrole, gaz, énergies renouvelables)	L. Lemoine et P. Cochonat	2003
4 Ressources marines énergétiques en 2030	L. Lemoine et P. Cochonat	2008
5 Les énergies renouvelables marines: étude prospective Ifremer à l'horizon 2030	M. Paillard, D. Lacroix, V. Lamblin	2009
6 Le pari de l'éolien	Centre d'Analyse Stratégique	2009
7 Energie: sciences et techniques, remparts contre la pénurie	P. Papon	2008
8 Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources of the Levant Basin Province, Eastern Mediterranean	C.J. Schenk <i>et al.</i>	2010

Des milieux marins et littoraux fragiles

Risques littoraux

Titre	Auteur	Année
1 Risques littoraux en Méditerranée	Edité par C. Morhange, N. Marriner, F. Sabatier, C. Vella	2007
2 Marine geo-hazards in the Mediterranean	CIESM	2011
3 An atlas of Mediterranean seismicity	G. Vannucci <i>et al.</i>	2004
4 Les villes côtières d'Afrique du Nord confrontent les désastres naturels et le changement climatique	A.G. Bigio, S. Hallegate, S. Rouhana, A. Tiwari, O. Hamad, T. Carrington	2011
5 Vulnerability of sandy coasts to climate variability	D. Idier <i>et al.</i>	2013
6 MISEEVA : Vulnérabilité sociale, économique et environnementale de la zone côtière à la submersion dans un contexte de changement climatique. Application au Languedoc-Roussillon	Coordonné par C. Vinchon	2012
7 BEACHMED-E: la gestion stratégique de la défense des littoraux pour un développement soutenable des zones côtières de la Méditerranée.	Coordonné par P. Lupino	2008
8 Atlas sédimentologique des côtes françaises (chap Med)	Direction des études et recherche d'Electricité de France	1984

Pollution

Titre	Auteur	Année
1 La pollution de la Méditerranée : état et perspectives à 2030	R. Courteau	2012
2 Les contaminants chimiques en Méditerranée. Etat, sources et devenir	J.F. Cadiou et L.A. Romana	2009
3 Marine litter: a global challenge	L. Jeftic, S. Sheavly, E. Adler	2009
4 Pollution du milieu marin par les déchets solides : Etat des connaissances. Perspectives d'implication de l'Ifremer en réponse au défi de la Directive Cadre Stratégie Marine et du Grenelle de la Mer	M. Henry	2010
5 Horizon 2020 - Elaboration of a Mediterranean Hot Spot Investment	C. Haffner-Sifakis et C. Sommer	2008
6 ADIOS: atmospheric deposition and impact of pollutants, key elements and nutrients on the open Mediterranean sea	Coordonné par S. Heussner	2003
7 MATER: Mediterranean Targeted Project – Mass Transfer and Ecosystem Response	Coordonné par A. Monaco	2002
8 Projets européens EUROSTRATAFORM - HERMES - HERMIONE	Coordonné par P.E. Weaver	2002-2012
9 Riverine transport of water-sediment-pollutants to Med. Sea	W. Ludwig, M. Meybeck, F. Abousamra	2003
Rivers of the Med. Sea – Water discharge & nutrient fluxes	O. Montreuil et W. Ludwig	2013

Ecosystèmes et biodiversité

	Titre	Auteur	Année
1	Valeur économique des bénéfices soutenable provenant des écosystèmes marins méditerranéens	A. Mangos, D. Sauzade, J.P. Bassino	2010
2	Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean	The MERMEX group	2011
3	Impact des changements climatiques sur la biodiversité marine et côtière en mer Méditerranée : état actuel des connaissances	PNUE / PAM	2010
4	The Mediterranean Sea under siege: spatial overlap between marine biodiversity, cumulative threats and marine reserves.	M. Coll <i>et al.</i>	2012
	The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats.	M. Coll <i>et al.</i>	2010
	Protected and threatened components of fish biodiversity in the Mediterranean Sea.	D. Mouillot <i>et al.</i>	2011
	Projected climate change and the changing biogeography of coastal Mediterranean fishes	Albouy <i>et al.</i>	2013
5	On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis	V. F. D'Ortenzio et M. Ribera d'Alcala	2009
6	SESAME - Southern European Seas: Assessing and Modelling Ecosystem Changes	Coordonné par E. Papathanssiou	2011
7	Temporal Change in Deep-Sea Benthic Ecosystems: A Review of the Evidence From Recent Time-Series Studies	A.G. Glover <i>et al.</i>	2010
8	Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea	C. Lejeusne <i>et al.</i>	2010

Des challenges qui se multiplient en mer Méditerranée

Transport maritime et tourisme

Titre	Auteur	Année
1 Les transports maritimes de marchandises en Méditerranée: perspectives 2025	P. Vallouis	2010
2 Croisières et plaisance en Méditerranée	A. Cappato	2011
3 Le tourisme littoral en Méditerranée : tendances et perspectives face au changement climatique	A. Magnan	2009
4 ARP FUTOURAUMED: futur du tourisme autour de la Méditerranée	Coordonné par le Sénateur Laffitte	2011

Pêche et aquaculture

Titre	Auteur	Année
1 Greening the Mediterranean fisheries: tentative assessment of the economic leeway	Sauzade D., Rousset N.	2013
2 Pêche et transformation des produits	L. Antoine / P. Larnaud	2004
3 Approche écosystémique des pêches : priorités de recherche ?	JM Fromentin, B. Planque & O. Thébaud	2006
4 CREAM Project - Deliverable 6.1: Executive report of the intermediate meeting including a scientific strategy to achieve EAF objectives for 2020	P. Cury <i>et al.</i>	2012
5 FEUFAR (Pêche et aquaculture en Europe à 2015 - 2020)	C. Cahu et L. Antoine	2008
6 Priorités de la recherche en aquaculture en 2020	Université de Kiel	2009
7 Marée amère : pour une gestion durable de la pêche	M.P. Cléach	2008
8 Analyse des activités économiques en Méditerranée : Secteurs pêche – aquaculture	J. Sacchi	2011
9 La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2012	FAO	2012

Biotechnologies marines

	Titre	Auteur	Année
1	Blue growth : scenarios and drivers for sustainable growth from the oceans, seas and coasts	Ecorys, Deltares & Oceanic development	2012
2	Ressources minérales marines profondes à l'horizon 2030	Y. Fouquet et D. Lacroix	2011
3	Biotechnologies	J. Guézennec	2008
4	Technologies marines et sous-marines	P. Chauchot, P. Farcy M. Nokin	2008
5	Trends in the Discovery of New Marine Natural Products from Invertebrates over the Last Two Decades – Where and What Are We Bioprospecting?	Leal <i>et al.</i>	2012
6	Marine biotechnology: new vision and strategy for Europe	J. Querellou <i>et al.</i>	2010
7	Feuille de route stratégique Pole Mer Méditerranée	Pôle Mer Méditerranée et Pôle Mer Bretagne	2013

Gouvernance

Titre	Auteur	Année
1 A legal scenario analysis for marine protected areas beyond national jurisdiction	IDDRI	2011
2 Final ICZM policy report: the way forward for the Mediterranean coast. A framework for implementing regional ICZM policy at the national and local level	B. Shipman, Y. Henocque, C.N. Ehler	2009
3 Les aires spécialement protégées en Méditerranée : bilan et perspectives	PNUE / PAM	2010
4 Statut des Aires Marines Protégées en Mer Méditerranée	C. Gabrié <i>et al.</i>	2012
5 Gouvernance de la mer Méditerranée : régime juridique et prospectives	C. Chevalier	2005
6 Déclaration de Paris	PNUE / PAM	2012
7 Vers une meilleure gouvernance de la Méditerranée	UICN	2010
8 Stratégie nationale pour la création et la gestion des aires marines protégées.	Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, Agence des aires marines protégées (AAMP)	2012
9 Final report "Exploring the potential of Maritime Spatial Planning in the Mediterranean Sea"	Policy Research Corporation	2011
10 Enjeux et perspectives de mise en œuvre du protocole GIZC en Méditerranée [ProtoGIZC]	IDDRI	2013
11 DCSMM	divers	2013

Observatoires et données

Titre	Auteur	Année
1 Towards an integrated system of Mediterranean marine observatories	CIESM	2008
2 SOERE MOOSE : Mediterranean Ocean Observing System on Environment.	P. Raimbault, L. Petit De La Villeon, L. Coppola	2011
3 Societal need for improved understanding of climate change, anthropogenic impacts, and geo-hazard warning drive development of ocean observatories in European Seas.	H.A. Ruhl <i>et al.</i>	2011
4 Objectif Inria 2020: plan stratégique	Inria	2013
5 Systèmes de banques de données	P. Marchalot et G. Maudire	2008

Mer et littoral non ciblé thématiquement ou sur la Méditerranée

Titre	Auteur	Année
1 Strategic research agenda for the Mediterranean Sea Basin	GSRT (Greece), MICINN (Spain)	2012
2 State of the Mediterranean marine and coastal environment	PNUE / PAM	2012
3 Prospective mer 2013	Coordonné par B. David et M. Trousselier	2013
4 Le Programme Mer : État des lieux et enjeux de la recherche et de l'innovation en sciences marines	Groupe mer de l'Allenvi	2012
5 Environnement littoral et marin en France	Commissariat général au développement durable	2011
6 Impact des changements globaux dans le domaine marin	Coordonné par C. Bacher et P. Gros	2008
7 Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain	Commissariat général au développement durable	2011
8 Atlas 2012 des enjeux maritimes	Edité par "Le Marin"	2012
9 The oceans and climate change: tools and guidelines for action	D. Herr et G. Galland	2009
10 Développement durable et changement climatique en Languedoc-Roussillon: facteurs clés, évolutions et	Coordonné par D. Lacroix et N. Marlin	2007
11 Terre, mer, un équilibre à inventer	Veolia Environnement	2010

Annexe 3 : Composition des groupes de travail

Liste des participants aux réunions du Comité de Pilotage et d'Orientation (CPO)

Nom	Prénom	Organisme
Arnaud	Nicolas	CNRS
Chagué	Véronique	CNRS
Changeux	Thomas	IRD
Cochonat	Pierre	Ifremer
Desdevises	Yves	UPMC
Guennoc	Pol	BRGM
Guillard	Hervé	Inria
Le Tellier	Julien	Plan Bleu
Lebaron	Philippe	UPMC
Leroux	Miriam	GID
Masski	Hicham	INRH
Michel	Edouard	CNRS
Migeon	Sébastien	UNSA
Norcy	Laura	Inria
Person	Julie	Pôle Mer Méditerranée
Rey	Vincent	USTV
Ruellan	Etienne	CNRS
Sauzade	Didier	Plan Bleu
Sempéré	Richard	AMU
Thomas	Yildiz	CNRS
Topin	Jean-Claude	GID
Troussellier	Marc	CNRS
Tusseau	Marie-Hélène	Ifremer
Wendling	Bertrand	CNPMEM
Yucel Gier	Guzel	Université d'Izmir
Zaki	Yehia	Bibliothèque d'Alexandrie

Liste des participants au Groupe d'Expertise Transversale (GET)

Nom	Prénom	Organisme
Avellan	Christophe	Pôle Mer Méditerranée
Boissery	Pierre	Agence de l'eau RMC
Bouchette	Frédéric	UM2
Brisset	Hugues	USTV
Cahu	Chantal	Ifremer
Cappato	Alberto	Université de Gênes
Chaboud	Christian	IRD
Changeux	Thomas	IRD
Charvis	Philippe	IRD
Chevaldonné	Pierre	CNRS
Dezileau	Laurent	UM2
D'Ortenzio	Fabrizio	CNRS
Faget	Daniel	AMU
Francour	Patrice	UNSA
Géli	Louis	Ifremer
Guerfi	Mokhtar	DGRSDT
Guiot	Joël	CNRS
Herrouin	Guy	Pôle Mer Méditerranée
Irisson	Jean-Olivier	UPMC
Jacob	Céline	CNRS
Lacroix	Denis	Ifremer
Le Corre	Gildas	Ifremer
Le Cozannet	Gonéri	BRGM
Le Loc'h	François	IRD
Le Tellier	Julien	Plan Bleu
Le Visage	Christophe	LittOcéan
Legendre	Louis	UPMC
Moizo	Bernard	IRD
Monaco	André	CNRS
Mortier	Laurent	ENSTA-ParisTech
Pioch	Sylvain	UM3
Radakovitch	Olivier	AMU
Rambert	Patrick	Inria
Robert	Philippe	PhilMer
Robert	Samuel	CNRS
Vinchon	Charlotte	BRGM

Liste des participants au GTT1 (les animateurs sont soulignés)

« *Caractériser et réduire la vulnérabilité du littoral aux changements globaux et aux risques naturels* »

Nom	Prénom	Organisme
Balouin	Yann	BRGM
Barroca	Bruno	UPEM
Ben Souissi	Jamila	INAT
<u>Bouchette</u>	<u>Frédéric</u>	<u>UM2</u>
Chami	Malik	UPMC
<u>Charvis</u>	<u>Philippe</u>	<u>IRD</u>
Dimou	Michail	USTV
D'Ortenzio	Fabrizio	CNRS
El Moumni	Bouchta	Université A. Essaâdi
<u>Géli</u>	<u>Louis</u>	<u>Ifremer</u>
Georgopoulos	Dimitris	HCMR
Hébert	Hélène	CEA
Idier	Déborah	BRGM
Le Visage	Christophe	LittOcéan
Marcos	Marta	CSIC
Monaco	André	CNRS
Provitolo	Damienne	CNRS
Sabatier	François	AMU
Schaffar	Alexandra	USTV
Serre	Damien	UPD
Sous	Damien	USTV
Tricot	Anne	CNRS
Vinchon	Charlotte	BRGM

Liste des participants au GTT2 (les animateurs sont soulignés)

« Concevoir un usage des biens et services de la mer Méditerranée contribuant au développement durable de la région »

Nom	Prénom	Organisme
Avellan	Christophe	Pôle Mer Méditerranée
Ben Khemis	Inès	INSTM
<u>Cahu</u>	<u>Chantal</u>	<u>Ifremer</u>
Chaboud	Christian	IRD
Changeux	Thomas	IRD
Chatain	Béatrice	Ifremer
Cury	Philippe	IRD
Dabbadie	Lionel	Cirad
Faget	Daniel	AMU
Fouilland	Eric	CNRS
Gros	Philippe	Ifremer
Herrouin	Guy	Pôle Mer Méditerranée
Lebaron	Philippe	UPMC
<u>Legendre</u>	<u>Louis</u>	<u>UPMC</u>
Metian	Marc	IAEA
Pedrotti	Maria-Luisa	CNRS
Rabouille	Sophie	CNRS
Sacchi	Jacques	Ifremer
Troussellier	Marc	CNRS
Yucel Gier	Guzel	Université d'Izmir

Liste des participants au GTT3 (les animateurs sont soulignés)

« Maîtriser les effets et les conséquences des activités maritimes et terrestres qui impactent la mer Méditerranée »

Nom	Prénom	Organisme
Andral	Bruno	Ifremer
Barthelmebs	Lise	UPVD
Baudart	Julia	UPMC
<u>Brisset</u>	<u>Hugues</u>	<u>USTV</u>
Francour	Patrice	UNSA
Gattuso	Jean-Pierre	CNRS
Guieu	Cécile	CNRS
Herrouin	Guy	Pôle Mer Méditerranée
Laabir	Mohamed	UM2
<u>Lacroix</u>	<u>Denis</u>	<u>Ifremer</u>
Lami	Raphaël	UPMC
Le Saout	Gwen	EMA
Leboulanger	Christophe	IRD
Lombard	Fabien	UPMC
Migon	Christophe	UPMC
Mousseau	Laure	UPMC
Ollivier	Bernard	IRD
Pringault	Olivier	IRD
Pioch	Sylvain	UM3
Radakovitch	Olivier	AMU
Robert	Philippe	PhilMer
Robert	Samuel	CNRS
Siokou-Frangou	Ioanna	HCMR
Souche	Jean-Claude	EMA

Liste des participants au GTT4 (les animateurs sont soulignés)

« Évaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages »

Nom	Prénom	Organisme
Ayata	Sakina-Dorothee	UPMC
Boero	Ferdinando	CNR
Changeux	Thomas	IRD
Chevaldonné	Pierre	CNRS
Claudet	Joaquim	CNRS
Francour	Patrice	UNSA
Galletti	Florence	IRD
Guidetti	Paolo	UNSA
Guilhaumon	François	IRD
Guizien	Katell	CNRS
Hénocque	Yves	Ifremer
<u>Irisson</u>	<u>Jean-Olivier</u>	<u>UPMC</u>
Jeudy de Grissac	Alain	UICN
Le Tellier	Julien	Plan Bleu
Magnan	Alexandre	IDDDRI
Moizo	Bernard	IRD
Mouillot	David	UM2
Reygondeau	Gabriel	UPMC
Webster	Chloé	MedPAN

Liste des participants au GTT5 (les animateurs sont soulignés)

« Développer et organiser la collecte et la gestion des données, la modélisation interdisciplinaire et la simulation »

Nom	Prénom	Organisme
Arsouze	Thomas	ENSTA-ParisTech
Blayo	Eric	Université Joseph Fourier
Chevaldonné	Pierre	CNRS
D'Ortenzio	Fabrizio	CNRS
Estournel	Claude	CNRS
Francour	Patrice	UNSA
Ghribi	Mounir	INOGS
Giraud	Jean-Pierre	Plan Bleu
Grégoire	Marilaure	Université de Liège
Lellouche	Jean-Michel	Mercator Océan
<u>Mortier</u>	<u>Laurent</u>	<u>ENSTA-ParisTech</u>
Petit de la Villeon	Loïc	Ifremer
Raimbault	Patrick	CNRS
<u>Rambert</u>	<u>Patrick</u>	<u>Inria</u>
Rapaport	Alain	Inra
Ruti	Paolo	ENEA
Sainte-Marie	Jacques	Inria
Sempéré	Richard	AMU
Siegel	Anne	CNRS
Somot	Samuel	CNRM
Testor	Pierre	CNRS

ARP MERMED : Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée – Résumé

Mer intercontinentale presque entièrement fermée, la Méditerranée présente des caractéristiques uniques - physiques, climatiques, biologiques, humaines et géopolitiques - qui en font une zone particulièrement sensible aux changements globaux, qu'ils soient d'ordre climatique (augmentation de l'intensité et de la fréquence d'événements extrêmes, augmentation de la température et de l'acidité de la mer, élévation du niveau marin) ou démographique et humain (littoralisation, intensification des activités, surexploitation des ressources, pollutions, accroissement du tourisme, introductions d'espèces potentiellement invasives...). En conséquence, les écosystèmes marins et les biens et services qui leur sont associés, services de prélèvement comme de régulation, seront de plus en plus affectés. La recherche, l'innovation et la formation ont un rôle essentiel à jouer pour accompagner les nécessaires processus d'adaptation à ces changements. Dans cette optique, **l'objectif de l'atelier de réflexion prospective sur l'avenir de la mer Méditerranée face aux changements globaux (ARP MERMED), commandité par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et coordonné par Agropolis International, consistait à identifier les domaines de recherche et d'innovation prioritaires, qui permettront de développer les capacités d'anticipation et de gestion adaptative des sociétés méditerranéennes.**

L'ARP MERMED a ainsi mobilisé plus de 130 experts, appartenant à une quarantaine d'organisations dans dix pays, issus de diverses disciplines (océanographie, biologie, écologie, chimie, sciences humaines...). D'avril 2013 à septembre 2014, dix-sept ateliers de travail thématiques et transversaux ont été organisés dans le cadre de cet ARP. L'étude s'est déroulée en quatre phases : (i) la synthèse d'une centaine d'études prospectives récentes intéressant la Méditerranée, mettant en avant les grands enjeux pour l'avenir de la mer Méditerranée ; (ii) le cadrage et la mise en place, à partir de cette analyse, de groupes de travail thématiques sur ces principaux enjeux ; (iii) l'identification, au sein de chaque groupe, d'axes de recherche prioritaires pour faire face à ces enjeux ; (iv) l'analyse transversale et l'intégration des propositions de chaque groupe, pour aboutir au rapport final.

Ce processus a conduit à formuler des propositions relevant de cinq grands domaines. Tout d'abord, il est indispensable d'approfondir la **connaissance du fonctionnement du système « mer Méditerranée »** dans son ensemble, intégrant les composantes physiques et biologiques du milieu et leurs dynamiques d'évolution à différentes échelles spatiales et temporelles, notamment *via* des approches d'écorégionalisation et de modélisation. Ensuite, une meilleure **caractérisation des risques liés au milieu marin** est nécessaire pour développer les capacités d'anticipation et de gestion de ces risques, qu'ils soient d'origine naturelle (submersion, érosion côtière), anthropique (notamment liés à la pollution du milieu marin), ou qu'ils résultent de l'interaction entre phénomènes naturels et perturbations anthropiques (prolifération ou invasion d'espèces par exemple). Par ailleurs, le **maintien d'activités productives en Méditerranée** nécessite de mieux prendre en compte les trois dimensions de leur durabilité (environnementale, économique et sociale), afin de préserver les métiers de la petite pêche artisanale - prédominante en Méditerranée, d'accompagner le développement de l'aquaculture et l'émergence des biotechnologies « bleues » et de favoriser les innovations technologiques minimisant l'impact environnemental des activités maritimes. Les **modes de gouvernance et de gestion de la mer Méditerranée** doivent ainsi constamment évoluer pour mieux prendre en compte l'évolution des connaissances scientifiques et les objectifs de prévention des risques pour les populations et de durabilité des activités humaines. Ceci passe notamment par une meilleure compréhension des échelles spatio-temporelles de structuration et de fonctionnement des systèmes biologiques et des activités anthropiques, et l'adéquation des mesures de gestion à ces échelles. Atteindre de tels objectifs nécessite une **coopération renforcée à l'échelle méditerranéenne** en matière de génération, de collecte, d'organisation et de réutilisation des données, à même de nourrir les modèles et scénarios indispensables pour anticiper les évolutions futures du système complexe qu'est la mer Méditerranée et permettre aux sociétés de se doter des outils nécessaires pour s'adapter aux changements qu'elles ont et auront à affronter.