

Atelier de Réflexion Prospective **MERMED**

Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée

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 géologique, notamment 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 rassemblent 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 (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 de la fréquence des perturbations liées au changement climatique (augmentation de la température et acidification de l'eau, élévation du niveau de la mer, submersion et érosion des côtes...) 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. Ainsi, l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR) a été à l'initiative d'un atelier de réflexion prospective sur l'avenir de la mer Méditerranée face aux changements globaux (ARP MERMED), 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, l'ARP MERMED a ainsi incité 18 institutions françaises, étrangères et internationales à collaborer, sous la coordination d'Agropolis International, et mobilisé 130 experts de divers pays méditerranéens (cf. p. 12). Cinq grands domaines de recherche, présentés dans cette synthèse, ont ainsi été mis en avant par les experts :

- **Caractériser, évaluer et prévenir les risques liés au milieu marin pour les sociétés méditerranéennes (p. 2-3)**
- **Conduire des recherches en appui au développement d'activités durables en mer Méditerranée (p. 4-5)**
- **Évaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages pour en améliorer la gouvernance (p. 6-7)**
- **Comprendre le fonctionnement intégré du « système dynamique mer Méditerranée » (p. 8-9)**
- **Suivre les évolutions et développer les capacités de modélisation et d'analyse prospective nécessaires à la prise de décision et au développement des capacités d'adaptation (p. 10-11)**

A noter que deux autres ARP consacrés à l'espace méditerranéen ont été menés en 2010-2011, l'un consacré aux espaces continentaux (ARP PARME), l'autre au tourisme (ARP FUTURAUMED). L'ARP MERMED n'a donc pas directement traité de la question du tourisme en Méditerranée.

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

Les littoraux méditerranéens sont exposés à des risques multiples, imbriqués et complexes. Les aléas naturels, de nature géologique ou hydrométéorologique, se traduisent par des risques de submersion et d'érosion des zones côtières. Les effets des changements climatiques et sociétaux sur les milieux et les organismes marins (pollutions, prolifération d'organismes éventuellement toxiques...) se traduisent par des risques pour la santé humaine et pour la pérennité des services écosystémiques, dont dépendent les populations riveraines. La concentration des populations et des activités sur le littoral, l'artificialisation croissante des côtes, conjuguées à l'élévation du niveau marin, contribuent à augmenter la vulnérabilité des sociétés littorales face aux risques.

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

Situé dans le domaine de convergence Afrique-Eurasie, le bassin méditerranéen est tectoniquement très actif. La sismicité est particulièrement importante en Méditerranée orientale dans la zone de subduction hellénique et vers l'Est le long de la faille nord-anatolienne, tandis qu'elle est plus diffuse en Méditerranée occidentale, répartie sur un grand nombre de failles encore mal connues, notamment en mer. Dans ce contexte, des avalanches sous-marines ou des éruptions volcaniques se produisent également. Tous ces événements telluriques peuvent provoquer des tsunamis dévastateurs.

Les aléas hydrométéorologiques sont aussi à l'origine de risques de submersion marine, actuels et à venir. L'influence des marées étant faible sur une grande partie du bassin, les phénomènes de surcote marine prédominent. La dépression atmosphérique génère une élévation temporaire du niveau de la mer, à laquelle s'ajoute une surcote liée au vent et aux vagues, souvent accentuée par une pente relativement forte de l'avant côte. L'existence de circulations générales, influençant significativement le niveau de la mer, rendent particulièrement difficiles 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 (Nil, Rhône), ont également une influence non négligeable sur l'inondation des plaines côtières.

Conjugués aux aléas hydrométéorologiques, les phénomènes sédimentologiques, parfois modifiés par les activités humaines (aménagement des rivières, ouvrages de « défense contre la mer »), jouent un rôle important sur l'évolution et l'érosion des littoraux, mais restent mal décrits du fait des difficultés à obtenir des mesures *in situ* des flux sédimentaires à différentes échelles spatio-temporelles. La Méditerranée est particulièrement sensible aux transferts sédimentaires vers le bassin profond (du fait de la faible largeur du plateau continental dans de nombreux secteurs), à l'altération mécanique des côtes rocheuses et à l'érosion des plages.

Le changement climatique induira une élévation du niveau de la mer, une modification du régime hydrologique (et donc des apports sédimentaires) et du régime des tempêtes, avec des répercussions sur les aléas côtiers. Sur les côtes basses de la Méditerranée, il en résultera une perte progressive d'espace côtier, associée à une érosion de la bande côtière, ainsi que des submersions temporaires liées aux surcotes de tempête atteignant des secteurs terrestres de plus en plus lointains. Par ailleurs, une plus grande fréquence des

crues continentales augmentera les possibilités de concomitance des deux types d'inondations. L'étendue des territoires exposés est ainsi appelée à fortement évoluer dans les décennies à venir. Ces modifications de l'aléa peuvent également entraîner une translation du biseau salé vers la terre, contaminant les captages d'eau douce des aquifères côtiers. Cet enjeu est crucial dans de nombreux pays de l'Est et du Sud de la Méditerranée, en particulier dans le delta du Nil.

Améliorer la prédiction et la prévention des risques de submersion et d'érosion des zones côtières en Méditerranée nécessite de mieux connaître l'ensemble de ces phénomènes et leurs interactions :

- **Évaluer la récurrence des séismes à partir d'approches paléo-sismologiques, caractériser les grandes failles actives, mieux coordonner les réseaux géophysiques d'observation et d'alerte (caractériser les séismes en temps réel, cartographier les mouvements forts du sol, améliorer la prédiction des effets des tsunamis).**
- **Évaluer la récurrence des submersions à partir de l'étude d'archives sédimentaires, mieux comprendre les interactions entre aléas et la propagation de l'inondation, les forçages et les circulations des masses d'eau, en vue d'améliorer les modèles et d'anticiper l'occurrence des aléas hydrométéorologiques et des phénomènes de submersion associés, à l'échelle des écorégions (cf. p. 9).**
- **Identifier, cartographier, dimensionner et suivre les modifications des unités sédimentaires ; modéliser le transport sédimentaire à différentes échelles.**
- **Observer et comprendre les interactions hydrodynamiques entre les niveaux, les vagues et les courants dans la zone littorale, les réponses morphologiques et leurs rétroactions sur l'hydrodynamique, afin d'améliorer la modélisation des processus de surcote en tenant compte de l'ensemble des contributions.**
- **Analyser les liens entre vulnérabilité écologique et économique (notamment dans la propagation de l'aléa), les effets d'échelles et la dimension spatiale des impacts ; cartographier la vulnérabilité des côtes méditerranéennes aux aléas de submersion et d'érosion ; évaluer la valeur des biens exposés selon le contexte, notamment pour les biens intangibles.**

© Shutterstock





© Shutterstock

Approfondir la connaissance des sources, flux, devenir et impacts des polluants en mer Méditerranée

Les activités humaines en Méditerranée sont sources de nombreux déchets, polluants et perturbations. Les rejets issus des villes côtières (de plus en plus peuplées) dans l'atmosphère (particules émises par les transports, les incinérateurs) ou en mer (apports fluviaux, effluents des stations d'épuration), ou bien du secteur récréatif (baignade, plaisance, croisière), sont plus ou moins bien traités. Le trafic maritime transitant par la Méditerranée (un tiers des flux mondiaux) est source de nuisances supplémentaires, chroniques (relargage de composés toxiques des peintures antifouling, combustion des hydrocarbures, pollution sonore) ou accidentelles (naufrages, perte de containers). L'aquaculture conduit parfois à concentrer localement une grande quantité de matière organique dans le milieu marin. Les polluants affectent d'abord le milieu côtier, puis les zones hauturières et s'accumulent dans des réservoirs secondaires.

Ces pollutions contaminent l'eau et les organismes vivants, affectant l'équilibre des écosystèmes marins et menaçant certaines activités et usages (pêche, aquaculture, tourisme...). En Méditerranée, les spécificités de la circulation océanique rendent le temps de résidence des eaux profondes très court, induisant des impacts particulièrement rapides. Les concentrations extrêmement élevées de certains éléments toxiques (mercure, PCB), retrouvées dans des prédateurs supérieurs consommés par l'homme, induisent des risques significatifs pour la santé des populations.

Les besoins de connaissance portent en particulier sur :

- la caractérisation des apports (polluants émergents notamment), des flux (en particulier lors des crues) et du devenir des contaminants (processus de transformation par les microorganismes, mise en place de réservoirs secondaires) ;
- la mesure de leurs impacts (sur le développement et la reproduction des espèces) et de leurs effets combinés (sensibilité des zones de décharge) ;
- l'étude du processus de contamination le long de la chaîne trophique jusqu'au consommateur final, primordiale en Méditerranée (couplage entre cycles des éléments nutritifs et des contaminants, modélisation, toxicologie, populations à risques, normes) ;
- la conception de solutions techniques pour réduire les rejets à la source, les traiter et décontaminer les milieux.

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

Le développement des activités humaines et les effets du changement climatique ont aussi pour effet de modifier la composition et la répartition des espèces au sein du bassin méditerranéen, par l'introduction de nouvelles espèces, la modification des aires de répartition de certaines espèces, ou encore la prolifération d'espèces lorsque les conditions du milieu changent. Ainsi, la biodiversité du bassin méditerranéen évolue constamment sous l'effet de l'arrivée passive de nouvelles espèces, par le détroit de Gibraltar (espèces herculéennes, issues de l'Atlantique tropical) ou le canal de Suez (espèces lessepsiennes, issues de la mer Rouge). De plus, les changements globaux ont un impact sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux méditerranéennes (température, salinité, pH...), non sans conséquences sur le développement et la répartition des espèces. Les changements récents (par exemple, la diffusion d'Est en Ouest des très nombreuses espèces lessepsiennes) indiquent une tendance à l'homogénéisation du *biota* méditerranéen et à la disparition des barrières biogéographiques du bassin, selon un processus de « méridionalisation ». 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. A ces évolutions s'ajoutent les introductions accidentelles d'espèces non indigènes (*via* les eaux de ballasts, les bioalissures sur les coques de navires, le transfert d'espèces conchylicoles, les micro-déchets...) qui peuvent s'avérer invasives ou toxiques pour l'homme.

Ces changements comportent un certain nombre de risques pour les écosystèmes marins et les populations humaines : perte de biodiversité, impact sur les services rendus (marées rouges, événements d'anoxie, algues toxiques rendant impropres à la consommation des stocks aquacoles entiers, prolifération de méduses impactant le tourisme...) et toxicité pour l'homme.

Les facteurs qui déclenchent ces proliférations d'organismes sont encore mal connus et les dispositifs de détection et de suivi font défaut, d'où les priorités suivantes :

- Etudier les voies et vecteurs majeurs d'introduction d'espèces en Méditerranée, leur impact sur les réseaux trophiques, leurs interactions génétiques avec les espèces indigènes, les mécanismes d'émergence et de prolifération des populations d'espèces pathogènes.
- Concevoir et proposer des solutions techniques pour éviter le transfert d'espèces invasives et toxiques et faciliter leur détection.
- Explorer 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 organismes soient exploitables par la pêche, l'aquaculture, ou les biotechnologies marines).

Conduire des recherches en appui au développement d'activités durables en mer Méditerranée

L'interaction entre les conditions du milieu (changeantes), les services écosystémiques (parfois encore mal identifiés et compris) et leur utilisation durable (par des populations en forte croissance et, pour certaines, en mutation sociale, économique et politique) est une vision relativement nouvelle, qui requiert des recherches innovantes. En Méditerranée, ces recherches concernent tout autant des activités anciennes, comme la petite pêche artisanale, peu étudiée et peu prise en compte jusqu'à présent malgré sa prédominance et sa valeur patrimoniale, mais aussi des activités en plein essor, telles que l'aquaculture et les biotechnologies marines, ou encore des développements technologiques visant à réduire l'impact de l'exploitation par l'homme ou restaurer les milieux, dans les champs de l'éco-conception et de l'ingénierie écologique.

Donner un avenir à la petite pêche artisanale méditerranéenne

Même si la pêche industrielle, comme celle du thon rouge, occupe souvent le devant de la scène, l'essentiel de la pêche méditerranéenne est en fait artisanale : elle est composée, d'une part, de flottilles dédiées à des métiers spécialisés, alimentant un marché interrégional et, d'autre part, de flottilles utilisant diverses techniques pour satisfaire de façon opportuniste une demande localisée, réduite et versatile. Les premières se déploient plus au large sur de grands plateaux continentaux et nécessitent des moyens techniques et financiers importants, tandis que les secondes exploitent les zones littorales étroites, les lagunes, les estuaires et les accores non chalutables, n'utilisant que des moyens parfois rudimentaires. Cette petite pêche artisanale côtière constitue souvent une pépinière de marins pêcheurs pour les métiers du large. Mais la rareté des ressources profondes, la surface limitée des plateaux continentaux et la faible productivité des eaux en Méditerranée ont limité plus qu'ailleurs cette expansion vers le large. Ainsi, la pêche méditerranéenne demeure une activité essentiellement de pêche fraîche journalière, où les « petits métiers » occupent une place numériquement prédominante et structurante pour l'ensemble de la filière et de son économie.

Or, les métiers du secteur de la pêche sont aujourd'hui en crise. Ils doivent surmonter de multiples défis : concurrence d'usages sur l'espace maritime (notamment par les usages récréatifs), compétition au niveau de la mise sur le marché, réduction des stocks de certaines espèces, détérioration des écosystèmes côtiers sous l'effet de la pression anthropique et des impacts du changement climatique (augmentation de la température et acidification de l'eau, prolifération d'espèces invasives) sur les ressources. La nécessité de définir les normes d'un développement durable de l'activité halieutique en Méditerranée impose donc de mieux prendre en compte les données biologiques, historiques et humaines qui conditionnent le maintien, l'adaptation et la diversification des petits métiers de la pêche artisanale.

Ainsi, plusieurs pistes doivent être explorées :

- Évaluer l'impact des petits métiers de la pêche sur la ressource et les écosystèmes et analyser les modalités d'adaptation des communautés de pêche aux fluctuations de la ressource, à la demande du marché et aux évolutions sociétales, avec une perspective historique.

- Explorer les potentialités offertes par les espèces autochtones non exploitées et les espèces allochtones et invasives pour contribuer au maintien et au développement de la pêche côtière (potentiel alimentaire ou biotechnologique, valorisation des produits, modalités de gestion des ressources, formation professionnelle des pêcheurs...).
- Connaître les pratiques et savoir-faire patrimoniaux liés aux petites pêches artisanales, pour permettre l'adaptation des pratiques anciennes au contexte actuel et valoriser la richesse du patrimoine culturel des pêches méditerranéennes, notamment en termes d'éco-tourisme.
- Mettre au point des méthodes adaptées à la mesure de l'impact des usages récréatifs, notamment de la pêche de loisir, dont le développement rentre en compétition avec la petite pêche artisanale.
- Inventer des modalités de régulation adaptées aux pêches artisanales, leur permettant de maintenir leur polyvalence tout en se conformant aux principes de la pêche durable, notamment en les associant au développement des aires marines protégées.

Accompagner le développement d'une aquaculture méditerranéenne durable

L'aquaculture est devenue une activité économique majeure en Méditerranée, avec le développement pionnier de la conchyliculture durant 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 (1,7 million de tonnes en 2008) dépassent les captures liées à la pêche, et leur croissance devrait se poursuivre à un rythme soutenu dans les décennies à venir. Cet accroissement rapide (et parfois illégal) est préoccupant en Méditerranée : il peut être à l'origine de conflits d'usage et de phénomènes de pollution, de salinisation des terres basses, d'érosion de la biodiversité... Le développement d'une aquaculture durable repose sur l'adoption d'une approche écosystémique, visant à optimiser la fourniture de services marchands (production d'aliments ou de substances d'intérêt économique, patrimoine culturel pour le tourisme...) tout en assurant la pérennité des services mobilisés pour la production aquacole (qualité de l'eau, production de juvéniles/naissains...).

Les efforts de recherche devraient ainsi se concentrer sur :

- les organismes élevés (architecture génétique des caractères d'intérêt, physiologie du développement sexuel et bases biologiques de la domestication), en mettant notamment l'accent sur les espèces herbivores ;
- leurs systèmes de production (intégration à l'environnement, recyclage, diminution des coûts énergétiques, conception de systèmes de « polyculture » pour minimiser les impacts, voire améliorer le bilan écologique) ;
- l'ingénierie microbiologique pour tenter d'adapter les capacités digestives des animaux marins élevés aux aliments végétaux et la mise au point d'aliments aquacoles innovants ;
- le développement socioéconomique et la gouvernance du secteur (analyse prospective, nouveaux outils et méthodes de gestion).



V. Simmoneux © IFD

Développer l'éco-conception pour les activités maritimes et l'ingénierie écologique des milieux marins et côtiers

Des innovations d'ordre réglementaire et technologique seront nécessaires pour réduire les impacts des activités humaines en mer Méditerranée (réduction des déchets et des pollutions chimiques, sonores et lumineuses, prévention du transport d'espèces exotiques, restauration des habitats dégradés...). Répondant à ce besoin, l'ingénierie écologique et l'éco-conception sont des filières émergentes en milieu côtier. L'éco-conception vise à réduire les impacts environnementaux des produits tout au long de leur cycle de vie. L'ingénierie écologique se base sur l'utilisation de populations, de communautés ou d'écosystèmes dans le but d'orienter les dynamiques de l'environnement dans un sens favorable à la société et compatible avec le maintien des équilibres écologiques. Le génie écologique regroupe les activités de conception, d'étude et de suivi, de maîtrise d'œuvre et les travaux s'appuyant sur les principes de l'ingénierie écologique.

Parmi les champs de recherche jugés prioritaires dans ce domaine en Méditerranée, on peut citer :

- **La conception d'aménagements côtiers durables et la co-conception d'ouvrages à usages multiples, comme des marinas ou des éoliennes marines : analyse du réseau des acteurs et leurs interactions, moyens juridiques et incitations économiques pour favoriser une construction « responsable » (par exemple, mise en place de labels de type « côte bleue » ou « île bleue de Méditerranée »), innovations technologiques.**
- **La connaissance et le contrôle des mécanismes écologiques et du fonctionnement des écosystèmes permettant la restauration des habitats dégradés ou la mise en place d'habitats artificiels.**
- **Le développement d'alternatives aux procédés actuels de lutte contre le dépôt des salissures marines sur les structures immergées (peintures *antifouling*) dont l'impact écologique est important, étant donnée la densité du trafic maritime en Méditerranée, et l'enjeu économique, majeur.**



D. Lacroix © Ifremer

Faire émerger les « biotechnologies bleues » de demain

Les progrès technologiques, permettant un accès croissant à la connaissance du milieu marin, ouvrent la voie à la découverte et à l'exploitation de nouvelles ressources biologiques marines, qui peuvent être la cible ou la source de nombreuses applications biotechnologiques, dont l'intérêt économique est avéré ou potentiel (production de nourriture, d'énergie et de matériaux ; extraction de molécules d'intérêt pharmaceutique ou industriel ; développement de nouveaux procédés...). En particulier, les organismes phototrophes unicellulaires présentent des rendements photosynthétiques élevés et une grande plasticité métabolique, sans mobiliser de terres arables ni d'eau douce. Les micro-organismes marins sont source de métabolites secondaires et de composés bioactifs spécifiques, et peuvent être cultivés à grande échelle à des coûts réduits. Le développement des technologies « omiques » permet un accès sans précédent à l'exploration de la biodiversité microbienne méditerranéenne. Les macro-organismes marins présentent eux aussi un potentiel important pour la production de molécules d'intérêt.

De nombreux défis restent toutefois encore à relever pour pouvoir révéler ce potentiel en Méditerranée et l'exploiter de manière durable : l'isolement, la caractérisation et la sélection des souches les plus prometteuses ainsi que la description des voies de biosynthèse des molécules d'intérêt ; l'optimisation des méthodes de cultures des organismes phototrophes afin de maximiser la productivité tout en minimisant le coût énergétique ; l'industrialisation des procédés de production, la réduction des coûts et de l'impact environnemental.

Évaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages pour en améliorer la gouvernance

Malgré la longue histoire des pratiques d'exploitation, mais aussi de gestion, des ressources marines par les civilisations méditerranéennes, la mise en œuvre opérationnelle des mesures actuelles de gestion apparaît souvent déficiente et leur efficacité, quand elle est évaluée, n'est pas toujours démontrée : la gestion des pêcheries, essentiellement monospécifique, n'a pas empêché la surpêche, la disposition des aires marines protégées ne permet pas de préserver efficacement les dimensions fonctionnelles et dynamiques de la biodiversité (cf. p.8)... Ces mesures de gestion sont souvent délimitées dans l'espace, non seulement pour des questions pratiques (il est plus facile de contrôler un espace géographique défini), mais aussi en raison des modes de gouvernance (la Méditerranée est divisée entre les Etats, les régions, les zones d'exclusivité économiques...). Un facteur primordial de l'efficacité des mesures de gestion repose donc sur la compatibilité de leurs échelles spatiales 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 : définir les échelles de structuration spatio-temporelle des écosystèmes, cartographier les usages et les dispositifs de gestion, analyser la congruence entre les échelles de structuration fonctionnelle des ressources, des usages et de la gouvernance afin de faire évoluer les mesures de gestion actuelles vers une efficacité renforcée.

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 des espèces et des habitats qui le composent. Les fonctions assurées par cette communauté fonctionnelle d'organismes (susceptibles de fournir des services écosystémiques) sont nécessaires au maintien de l'écosystème lui-même et peuvent aussi être exploitées par l'homme. Le cadre de gestion mis en place peut alors répondre à différents objectifs, en lien avec la conservation des écosystèmes et de la biodiversité et le maintien des fonctions produc-

tives exploitées par l'homme. 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. 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.

Afin d'être en mesure d'évaluer la persistance de ces communautés fonctionnelles et de tester l'impact de plusieurs scénarios de conservation, l'identification des échelles spatio-temporelles du fonctionnement d'un écosystème nécessite l'intégration dans des modèles démographiques mécanistes des connaissances suivantes :

- **Identifier la communauté fonctionnelle d'un écosystème : composition spécifique, relations trophiques et distribution spatio-temporelle (mise au point de méthodologies spécifiques, collectes de données spatialisées et utilisation de modèles conceptuels pour décrire le fonctionnement).**
- **Identifier les habitats des espèces formant la communauté fonctionnelle aux différents stades de leur cycle de vie : cela requiert, pour les habitats pélagiques, d'évaluer la pertinence des descripteurs des masses d'eau obtenus à partir des images satellites ; pour les habitats benthiques de substrats durs, d'évaluer la pertinence des descripteurs de la nature des fonds ; et pour la définition des habitats mésopélagiques, de mettre en place de stratégies d'observation dédiées.**
- **Caractériser les transferts d'individus entre ces habitats (connectivité) : identifier les traits contrôlant la dispersion des espèces à phase larvaire pélagique, développer une approche multi-échelle et multi-espèces de la connectivité, avec une résolution spatiale et temporelle suffisante.**





© Shutterstock

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

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. Au niveau régional méditerranéen, les quatre principaux instruments que sont la Convention de Barcelone, la Commission Générale des Pêches en Méditerranée (sous l'égide de la FAO), l'accord ACCOBAMS (*Agreement on the Conservation of Cetaceans in the Black Sea Mediterranean Sea and Contiguous Atlantic Area*) et la CIESM (*the Mediterranean science commission*) sont tous liés par des *memoranda* de coopération permettant d'améliorer la connectivité institutionnelle et de ce fait leur efficacité. Au niveau subrégional européen, l'influence de l'Europe sur les institutions nationales et régionales est importante, visant une normalisation des structures et des réglementations.

Parmi les processus ou les outils majeurs soutenus par les différentes institutions internationales, régionales ou nationales, on peut citer : l'approche écosystémique (EcAp), la gestion intégrée des zones côtières (GIZC), la planification spatiale marine et les aires marines à gestion particulière (pêche, navigation), de conservation (e.g. Natura 2000 Mer) et protégées (AMP).

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) et des modes d'intervention des Etats dans leurs eaux ; des mandats, des programmes et des différents niveaux d'intervention des instruments, des institutions et des processus engagés ; des outils utilisés et de leur efficacité et enfin des impacts des activités humaines et de la sensibilité des écosystèmes, notamment aux effets combinés des différents impacts.

Une étape significative consisterait déjà à :

- Analyser l'articulation, au niveau méditerranéen, entre les instruments et les administrations (connectivité institutionnelle) ; évaluer la compatibilité des modes de gouvernance actuellement en place dans différents pays (en particulier européens/non-européens), compte tenu de la disparition annoncée des eaux internationales au profit des zones d'exclusivité économique.
- À l'échelle du bassin méditerranéen, recenser, cartographier et suivre l'évolution des usages, des institutions et des domaines de gouvernance, prenant en compte l'intensité des activités et pressions humaines s'exerçant sur les milieux et la sensibilité de ces derniers aux impacts cumulés.

Améliorer les mesures de gestion actuelles

Une stratégie d'amélioration des mesures de gestion repose nécessairement, dans un premier temps, sur l'évaluation de l'efficacité des mesures actuelles, par rapport aux objectifs fixés. Or ces évaluations sont relativement rares et difficiles à mettre en œuvre. Les causes d'une efficacité limitée peuvent être multiples, depuis le défaut de mise en œuvre effective des mesures (en raison de l'absence de contrôle, de la non-opérationnalité des mesures, de l'absence d'appropriation par les usagers...) jusqu'à un déficit de connaissance des usages et/ou des ressources (par exemple, le taux de renouvellement pour les stocks de pêche, ou les relations trophiques à la base de la gestion écosystémique) conduisant à une inadéquation entre mesures de gestion et fonctionnement du système. Par ailleurs, 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. Les mesures proposées doivent s'appuyer sur les dispositifs en place : Directive européenne Cadre Stratégie pour le Milieu Marin — DCSMM, Plan d'Action pour la Méditerranée — PAM (dans le cadre de la Convention de Barcelone), Commission Générale des Pêches en Méditerranée — CGPM (sous l'égide de la FAO)... En outre, plusieurs modèles de gouvernance existent au niveau mondial, suivant 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 ou *cofradías* 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.

Il en découle les questions scientifiques suivantes :

- Conduire des projets pilotes en Méditerranée pour transférer et évaluer l'applicabilité de ces modèles de gestion du point de vue de la gouvernance environnementale et de la gestion écologique des écosystèmes.
- Développer une méthode « maritime » d'évaluation des fonctions écologiques (voire des services écosystémiques) à partir d'une standardisation des indicateurs et des métriques (sur la base des indicateurs de la Directive Cadre sur l'Eau — DCE et de la DCSMM) avec la création de points de référence (atlas des standards de référence fonctions/services) pour l'évaluation du succès des mesures de gestion.
- Formuler des propositions juridiques et réglementaires nationales et internationales pour mieux encadrer et surveiller les sources de rejets de polluants, parfois localisés loin des sites d'observation et de contrôle nationaux (évaluation 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 »), ainsi que pour limiter l'introduction d'espèces exotiques (analyse des modalités d'élaboration, de mise en œuvre et de contrôle du droit international sur les conventions type *Ballast Water Management Convention* — BWM).

Comprendre le fonctionnement intégré du « système dynamique mer Méditerranée »

Comparé au milieu terrestre, le milieu marin est plus difficile d'accès et son exploration a donc été plus lente, dépendante des progrès technologiques. Ainsi, de nombreux défis restent encore à relever de la part de la communauté scientifique s'intéressant aux dynamiques physiques, chimiques, biologiques et biogéochimiques de la mer Méditerranée et à leurs interactions, malgré les progrès considérables accomplis ces dernières décennies. Face aux changements climatiques et sociétaux particulièrement rapides en Méditerranée, la compréhension des processus en jeu est essentielle pour pouvoir agir en vue de réduire les perturbations affectant le « milieu marin » au sens large.

Étudier 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. À 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.

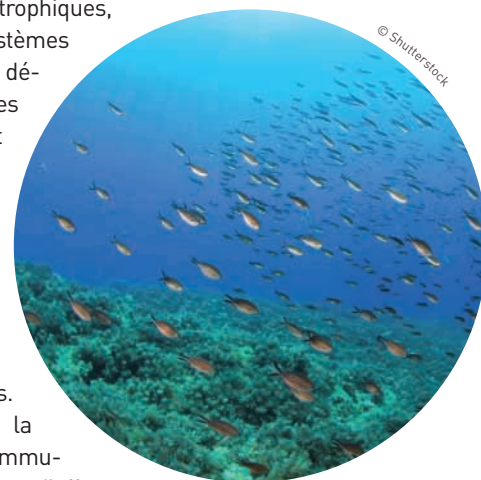
Du point de vue hydrodynamique, deux processus caractérisent la Méditerranée : des transferts horizontaux rapides (interface terre-mer et circulation de bord) et des transferts verticaux lents (remontées d'eaux profondes très anciennes, plongées et *cascading* d'eaux froides, courants hyperpycniaux) qui régulent le renouvellement des eaux méditerranéennes, la formation des masses d'eau et la circulation thermohaline. La physiographie terre-mer contrastée des régions méditerranéennes se caractérise par des régions côtières basses ou montagneuses, des 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 considérables éventails sédimentaires profonds. L'activité géologique (notamment sismique) peut aussi générer des instabilités sédimentaires ainsi que des transferts en masse pente-bassin et des courants de turbidité plus ou moins importants. 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 profond) ou côtier-côtier (transport latéral le long de la côte) sont ainsi fortement dépendants des forçages hydrométéorologiques, physiographiques et géodynamiques.

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. En particulier, la compréhension des mécanismes en jeu et leur modélisation à différentes échelles spatiales et temporelles constitue un enjeu majeur.

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

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 les procaryotes. Mais d'autres facettes de la biodiversité méditerranéenne ont fait l'objet d'exploration récente, à travers 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 peuvent 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 abritant les plus fortes diversités en espèces n'étant pas gage de préservation des autres facettes.

Tout autant essentielle au fonctionnement et à la résilience des systèmes écologiques méditerranéens, la diversité des interactions entre compartiments trophiques reste peu explorée. Les interactions entre organismes façonnent les équilibres géochimiques, trophiques, énergétiques des systèmes écologiques et se sont développées à différentes échelles de temps et d'organisation du vivant, jusque dans les milieux les plus extrêmes ou ceux soumis à des pressions multiples, comme les écosystèmes lagunaires méditerranéens. Les modifications de la composition des communautés d'organismes sous l'effet des changements globaux pourraient s'y accélérer, au point que nombre de *taxa* et/ou groupes fonctionnels pourraient disparaître avant même d'avoir été répertoriés.



Il reste donc un long chemin à parcourir pour mieux appréhender :

- les divergences et convergences des différentes facettes de la biodiversité (taxonomique, phylogénétique, fonctionnelle) avec les pressions anthropiques aux différentes échelles d'organisation des systèmes méditerranéens ;
- l'hétérogénéité spatiale et la variabilité temporelle de la diversité au sein des compartiments biologiques et le rôle des interactions entre organismes dans les dynamiques spatio-temporelles de la biodiversité marine et du fonctionnement des écosystèmes ;
- les relations entre diversité et fonctions des principaux compartiments biologiques impliqués dans la fourniture des biens et services écosystémiques.



© Shutterstock

Intégrer les dynamiques physiques et biologiques du milieu marin par l'écorégionalisation

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 physique et décrire la distribution des espèces, mais aussi sur des outils de statistiques inférentielles. Il s'agit donc d'une méthode descriptive complémentaire à la connaissance fine des habitats et du fonctionnement des écosystèmes (c'est-à-dire des communautés fonctionnelles qui le composent). Dans le cadre d'une approche écorégionale, les données collectées doivent reposer sur des stratégies d'observation spatialisées multi-échelles, permettant d'identifier les échelles pertinentes qui structurent les communautés fonctionnelles.

L'écorégionalisation constitue ainsi une base scientifique solide 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 (cf. p. 10) et de gestion des ressources marines (cf. p. 6).

Grâce aux nombreux programmes européens passés et en cours, les écorégions sont relativement bien identifiées dans les trois sous-bassins de la rive nord. Les collaborations déjà établies dans ce contexte avec certains pays des rives sud et est devraient permettre d'étendre l'identification des écorégions à l'ensemble du bassin.

Développer des modèles intégrés pour comprendre le fonctionnement du bassin méditerranéen et son évolution

La mer Méditerranée constitue un espace original posant des défis scientifiques spécifiques dans le domaine de l'observation et de la modélisation intégrée. Système emblématique, véritable concentré des problématiques mondiales, la Méditerranée est donc un objet d'étude très pertinent, elle regroupe à la fois des écosystèmes oligotrophes (pauvres en phytoplancton, e.g. la mer Ionienne) à l'image de ceux rencontrés dans les océans ouverts ; des écosystèmes côtiers plus productifs (e.g. le golfe du Lion), avec des enjeux socio-économiques significatifs (risques d'effondrements et d'avalanches sous-marines, proliférations de plancton gélatineux sur le littoral...) ; jusqu'aux lagunes eutrophisées qui sont le siège de crises environnementales et socioéconomiques majeures (pollutions, contaminations des productions exploitées, crises dystrophiques et anoxies, prolifération de microorganismes toxiques). 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 plus marquée au Sud et à l'Est du bassin et de ses littoraux vers la zone hauturière.

Les changements globaux affectent les masses d'eaux dans leur circulation (courantologie) et les espèces qu'elles abritent dans leur physiologie (e.g. problème de formation des structures carbonatées du fait de l'acidification), leur biologie (e.g. modifications de la phénologie du fait des changements de température), leur répartition (e.g. plus d'espèces thermophiles et/ou sténothermes) ou leur écologie (e.g. modifications des relations interspécifiques suite à l'arrivée d'espèces non-indigènes). Le réchauffement climatique pourrait en effet 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 la nécessité, mais aussi les difficultés spécifiques, de l'observation et de la modélisation. Enfin, les scénarios d'évolution, tant climatique et environnementale qu'économique et sociétale, sont d'une grande variété. Leur étude nécessite des séries de long terme et une capacité de simulation qui ouvrent de nouveaux défis aux systèmes d'observation et modèles actuels.

La compréhension des effets des changements globaux sur le fonctionnement du système méditerranéen nécessite donc une approche pluridisciplinaire et le développement de modèles globaux. L'avènement d'une nouvelle ère en matière de collecte de données (cf. p. 10) va permettre de faire progresser de manière significative les modèles existants, en favorisant notamment la collecte de données « sur mesure » et leur exploitation pour la modélisation. Des modèles plus complets et plus globaux vont ainsi pouvoir être développés, avec les enjeux suivants : (i) intégrer les dimensions physiques, climatiques, biogéochimiques, biologiques et écologiques et leurs multiples interactions et (ii) inclure la zone littorale et prendre en compte les processus de transfert, tant au sein de la zone côtière que selon un gradient côte-large.

Suivre les évolutions et développer les capacités de modélisation et d'analyse prospective nécessaires à la prise de décision et au développement des capacités d'adaptation

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. Ces outils vont 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.

Générer des données, concevoir des indicateurs et organiser les réseaux de collecte

De nombreuses données sont collectées en mer et le long du pourtour méditerranéen par différents types d'acteurs, dans des cadres extrêmement divers. Qu'elles soient relatives aux sociétés et à l'économie ou au milieu physique et biologique, elles demeurent encore éparpillées, pas toujours accessibles, ni compatibles ou interopérables, même si les systèmes d'observations du milieu marin au large amorcent une intégration de façon à mieux répondre aux besoins de la recherche et de l'océanographie opérationnelle. Si le recueil de données est bien développé rive nord, notamment grâce aux instruments européens (directives cadres, stratégie marine, politique commune de la pêche...), le manque d'observation *in situ* systématique au Sud hypothèque toutefois le suivi des paramètres importants pour comprendre le fonctionnement global et suivre les évolutions à l'échelle de l'ensemble du bassin. Ainsi, une meilleure structuration de ces données, leur partage et leur harmonisation pourraient grandement bénéficier à l'avancée des connaissances scientifiques, à la genèse d'informations utiles au pilotage pour les gestionnaires et les décideurs et à l'efficacité des systèmes de surveillance et d'alerte. 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.

■ **Au niveau de la collecte des données sources** : des observations sont conduites depuis l'espace, mais aussi *in situ*, tant à terre que dans la colonne d'eau et en fond de mer. Ceci implique des développements technologiques importants (moyens satellitaires, engins autonomes, transfert des données, techniques « omiques »...).

■ Ces outils doivent permettre à la fois une surveillance environnementale efficace (risques côtiers, détection précoce d'espèces invasives ou toxiques, qualité des eaux) et le développement d'approches conjointes données-modèles permettant de mieux comprendre le fonctionnement du bassin méditerranéen et de suivre son évolution.



© Shutterstock

■ **Au niveau de l'organisation des dispositifs de collecte des données** : ces évolutions technologiques permettent de multiplier les sources de données. L'exploitation de plateformes d'opportunités (bateaux, *crowdsourcing*, aires marines protégées...), bien développée dans certaines mers européennes, reste un défi à relever pour la Méditerranée, notamment au Sud. Par ailleurs, la question de la propriété des données et de leur accessibilité demeure un problème majeur en Méditerranée. Les observatoires commencent à se structurer et à mutualiser leurs données pour répondre à différents besoins et services, même si un effort reste à faire pour favoriser l'interopérabilité et l'intégration des plateformes de mesure de manière à couvrir toute la gamme d'échelles spatio-temporelles requise.

■ Les caractéristiques de la Méditerranée (dimensions, accessibilité) permettent d'envisager des performances élevées des systèmes d'observation. En particulier, la création d'un réseau de zones ateliers à l'échelle du bassin, répondant à des enjeux scientifiques (couvrant notamment les principales écorégions, cf. p.9) et socio-économiques spécifiques, permettrait de mener, en coopération Nord-Nord, Nord-Sud et Sud-Sud, des travaux complémentaires et comparatifs, basés sur la mutualisation des méthodes, des données, des modèles et des techniques pour une approche coordonnée au niveau de la région Méditerranée.

■ **Au niveau du traitement et de l'analyse des données** : ces évolutions technologiques génèrent également un accroissement continu du volume et de la complexité des bases de données.

■ Si les questions liées au « big data » et au « data mining » constituent un domaine scientifique à part entière, la recherche scientifique en Méditerranée y est confrontée dans ses aspects les plus complexes, liés à une forte multi-dimensionnalité et une grande diversité des structures de collecte. Par ailleurs, l'exploitation des données collectées est facilitée par l'utilisation d'index synthétiques : bien développés au sein des sciences du climat ou des surfaces continentales, ils le sont moins au sein des sciences marines, où les efforts doivent se poursuivre dans la mise au point d'index physiques, biogéochimiques ou biologiques.

S'appuyer sur la modélisation pour connaître l'état passé et anticiper l'état futur de la mer Méditerranée

Un des défis de la recherche actuelle consiste à mettre au point des modèles qui, en se fondant sur les prévisions de changement climatique et les scénarios économiques, permettent d'évaluer les impacts à l'échelle régionale. Toutefois, une des limites inhérentes aux modèles décrivant des systèmes complexes réside dans notre difficulté à appréhender leur comportement global, leurs forces et leurs faiblesses, leur validation et le degré d'incertitude de leurs résultats.

Un des moyens de répondre à ces questions consiste à réaligner, 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, européens et de l'ensemble du bassin en associant les rives nord et sud.

De tels exercices ont déjà été menés en Méditerranée sur l'impact du changement climatique au niveau continental (régime hydrologique, surcotes), mais jamais au niveau des mers régionales, ce qui limite fortement la portée des études d'impact océanique des changements globaux en Méditerranée (biogéochimie, biodiversité, écologie, pêche, tourisme, transport...).

Un autre défi consiste à décrire le plus précisément possible l'état passé de l'océan afin de connaître sa variabilité et de reconstituer son évolution. Ce défi peut être relevé par la ré-analyse de données anciennes à l'aide des modèles actuels. L'élaboration d'une ré-analyse s'appuie sur 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 afin de pouvoir effectuer les couplages nécessaires.

De nombreux verrous doivent être levés pour atteindre ces objectifs, en matière de modélisation numérique (amélioration des modèles d'océan, de leurs paramétrisations et de leurs couplages, notamment physique-biogéochimique), d'assimilation de données (mieux caractériser et analyser les erreurs de prévisions des modèles, adopter des approches probabilistes) et de ressources informatiques (qui constituent un facteur dimensionnant pour les ré-analyses).

Construire des scénarios pour explorer le futur des ressources et des usages en Méditerranée

La communauté scientifique doit se doter d'une stratégie scientifique à long terme, afin d'améliorer sa capacité à fournir une expertise adaptée pour l'approche écosystémique des ressources marines. Récemment, l'approche écosystémique des pêches (AEP) a considérablement transformé la façon d'envisager la gestion des ressources halieutiques marines. De nombreux cadres conceptuels scientifiques permettent aujourd'hui d'envisager sa mise en œuvre effective, si bien que l'Organisation des Nations Unies s'est basée sur cette approche pour définir des objectifs concrets pour les pêches même si, en Méditerranée, l'AEP reste encore balbutiante dans sa

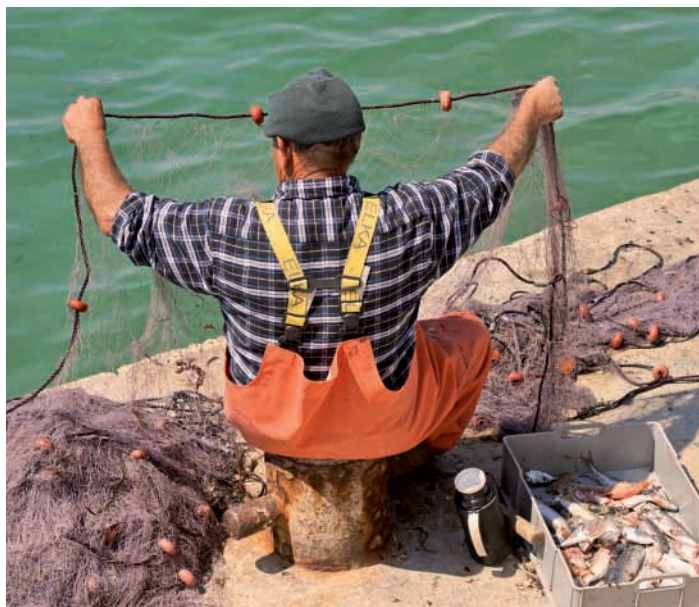
mise en œuvre. La surveillance et la gestion des autres services rendus par la mer Méditerranée pourraient ainsi grandement s'inspirer des méthodologies et approches développées pour la gestion des stocks halieutiques, tandis que l'observation, la prévision et la gouvernance d'autres services pourraient en retour alimenter l'AEP. En effet, les connaissances sur les services environnementaux marins sont fragmentaires et manquent d'intégration, en particulier vis-à-vis du comportement des acteurs. Pourtant, la plupart des usages de la mer génèrent des perturbations environnementales, tout en souffrant de ces modifications. La vulnérabilité des principaux services rendus par la mer Méditerranée aux futurs changements de l'environnement est actuellement inconnue et son impact économique n'est pas chiffré, de même que les coûts et les bénéfices d'actions potentielles de gestion de ces services. Il apparaît donc nécessaire, suivant le modèle de la gestion des stocks halieutiques, de disposer d'un tableau de bord de l'état des services environnementaux, permettant d'établir les bases d'une future gestion écosystémique des activités en Méditerranée.

Les outils d'une telle gestion durable ne pourront émerger sans une démarche collaborative et pluridisciplinaire alliant écologie, sociologie, économie et gouvernance, se basant sur une connaissance approfondie de la dynamique des écosystèmes et de leurs usages et passant par la construction de scénarios normatifs à moyenne échelle temporelle. Ceux-ci permettraient d'explorer le futur des écosystèmes marins méditerranéens, ainsi que les trajectoires possibles menant à des objectifs souhaitables, selon différentes projections environnementales, économiques et sociales, pour aboutir à des recommandations pour les décideurs et les gestionnaires.

Promouvoir les capacités d'adaptation des sociétés littorales aux changements globaux

Il convient enfin de s'interroger sur les capacités des sociétés littorales à faire face aux risques systémiques et multidimensionnels, liés aux impacts des changements globaux, auxquels elles vont être confrontées.

De telles analyses devront intégrer les évolutions des territoires, tant du point de vue socioéconomique (mode d'occupation du sol, structures démographiques, désir croissant des populations à vivre dans ces espaces...) que géographique (évolution de la morphologie des zones côtières, artificialisation des espaces littoraux...) et prendre en compte les contrastes entre les rives nord et sud. Elles se baseront sur une évaluation des mesures d'adaptation mises en place au niveau méditerranéen, à différentes échelles, et de l'articulation de stratégies ayant différents objectifs. Elles prendront également en compte les effets de seuils (économiques, sociaux, environnementaux...) à partir desquels l'adaptation devient difficile ou très coûteuse.



© Shutterstock

Structure

Un **comité de pilotage et d'orientation** (CPO) composé de 19 membres :

- **5 organismes français de recherche** : BRGM, CNRS, Ifremer, Inria, IRD
- **5 universités françaises** : Aix-Marseille Université, Université de Montpellier 2, Université de Nice — Sophia Antipolis, Université Pierre et Marie Curie, Université du Sud Toulon — Var
- **3 structures françaises d'interface** : Agropolis International, Pôle mer Méditerranée, Confédération Nationale des Pêches Maritimes et des Élevages Marins (CNPMM)
- **2 organismes étrangers** : *Bibliotheca Alexandrina* (Égypte), *Dokuz Eylül University* (Turquie)
- **4 structures internationales** : Plan Bleu, Groupement Inter-académique pour le Développement (GID), Réseau Maghrébin des Instituts Nationaux de Recherche Halieutique, Union Internationale de Conservation de la Nature (IUCN)



Un **groupe d'expertise transversale** (GET) pluridisciplinaire, composé d'une quarantaine d'experts, couvrant les différents domaines de l'ARP MERMED, chargé d'assurer la synthèse des études prospectives, le cadrage des groupes thématiques et la synthèse de leurs travaux.

Cinq **groupes de travail thématiques** (GTT), composés chacun de 17 à 33 experts, dans les domaines suivants :

- Caractériser et réduire la vulnérabilité du littoral aux changements globaux et aux risques naturels
- Concevoir un usage des biens et services de la mer Méditerranée contribuant au développement durable de la région
- Maîtriser les effets et les conséquences des activités maritimes et terrestres qui impactent la mer Méditerranée
- Évaluer et définir les échelles de structuration et de gestion des ressources et des usages
- Développer et organiser la collecte et la gestion des données, la modélisation interdisciplinaire et la simulation

Déroulement

Dix-sept ateliers thématiques, transversaux ou de pilotage, sur 18 mois (avril 2013 à septembre 2014) organisés en quatre phases :

- Synthèse des études prospectives existantes par le GET
- Identification des thèmes et élaboration du cadre de réflexion prospective des GTT
- Identification des axes de recherche prioritaires au sein de chaque GTT
- Analyse transversale par le GET des propositions des GTT et structuration du rapport final, validé par le CPO

130 experts mobilisés (dont 18 étrangers) dans toutes les disciplines concernées (océanographie physique, biologie, écologie, sciences humaines...), provenant de 47 institutions ou organisations et de 10 pays (France, Italie, Espagne, Grèce, Algérie, Maroc, Tunisie, Égypte, Turquie, Belgique).

Un **rapport final de 150 pages** et une centaine de fiches de synthèse d'études prospectives compilées, documents consultables en ligne : www.agropolis.fr/arp-mermed

L'ARP MERMED a été financé par l'**Agence Nationale de la Recherche (ANR)**, contrat 2013ANIM00501.

Liste des participants et contributeurs

Andral Bruno	Chagué Véronique	Galletti Florence	Idier Déborah	Magnan Alexandre	Provitolo Damienne	Siegel Anne
Arnaud Nicolas	Chami Malik	Gattuso Jean-Pierre	Irisson Jean-Olivier	Marcos Marta	Rabouille Sophie	Siokou-Frangou Ioanna
Avellan Christophe	Changeux Thomas	Géli Louis	Jacob Céline	Masski Hicham	Radakovitch Olivier	Somot Samuel
Arsouze Thomas	Charvis Philippe	Georgopoulos Dimitris	Jedy de Grissac Alain	Metian Marc	Raimbault Patrick	Souche Jean-Claude
Ayata Sakina-Dorotheé	Chatain Béatrice	Ghribi Mounir	Laabir Mohamed	Michel Édouard	Rambert Patrick	Sous Damien
Balouin Yann	Chevaldonné Pierre	Giraud Jean-Pierre	Lacroix Denis	Migeon Sébastien	Rapaport Alain	Testor Pierre
Barroca Bruno	Claudet Joaquim	Grégoire Marilaure	Lami Raphaël	Migon Christophe	Rey Vincent	Thomas Yildiz
Barthelmebs Lise	Cochonat Pierre	Gros Philippe	Le Corre Gildas	Moizo Bernard	Reygondeau Gabriel	Topin Jean-Claude
Baudart Julia	Cury Philippe	Guennoc Pol	Le Cozannet Gonéri	Monaco André	Robert Philippe	Tricot Anne
Ben Khemis Inès	Dabbadie Lionel	Guerfi Mokhtar	Le Loch François	Mortier Laurent	Robert Samuel	Troussellier Marc
Ben Souissi Jamila	Desdevises Yves	Guidetti Paolo	Le Saout Gwen	Mouillot David	Ruellan Etienne	Tusseau Marie-Hélène
Blayo Eric	Dezileau Laurent	Guiou Cécile	Le Tellier Julien	Mousseau Laure	Ruti Paolo	Vinchon Charlotte
Boero Ferdinando	Dimou Michail	Guilhaumon François	Le Visage Christophe	Norcy Laura	Sabatier François	Webster Chloé
Boissery Pierre	D'Ortenzio Fabrizio	Guillard Hervé	Lebaron Philippe	Ollivier Bernard	Sacchi Jacques	Wendling Bertrand
Bouchette Frédéric	El Mounni Bouchta	Guiot Joël	Leboulanger Christophe	Pedrotti Maria-Luisa	Sainte-Marie Jacques	Yucel Gier Guzel
Brisset Hugues	Estournel Claude	Guizien Katell	Legendre Louis	Petit De La Villeon Loïc	Sauzade Didier	Zaki Yehia
Cahu Chantal	Faget Daniel	Hébert Hélène	Lellouche Jean-Michel	Pioch Sylvain	Schaffar Alexandra	
Cappato Alberto	Fouilland Éric	Hénocque Yves	Leroux Miriam	Person Julie	Sempéré Richard	
Chaboud Christian	Francour Patrice	Herrouin Guy	Lombard Fabien	Pringault Olivier	Serre Damien	

- **Financement de l'ARP** : Agence Nationale de la Recherche (ANR), contrat 2013ANIM00501
- **Coordination de l'ARP** : Bernard Hubert et Mélanie Broin, *Agropolis International*
- **Équipe projet** : Fabien Boulrier, *Agropolis International* — Véronique Chagué, *CNRS* — Thomas Changeux, *IRD* — Denis Lacroix, *Ifremer*
- **Mise en page** : Olivier Piau, *Agropolis Productions*
- **Publication** : Septembre 2015



AGROPOLIS
INTERNATIONAL

Agropolis International,
1000 Avenue Agropolis, 34394 Montpellier CEDEX 5, France
Tél. : +33 (0)4 67 04 75 75 — Fax. : +33 (0)4 67 04 75 99
agropolis@agropolis.fr — www.agropolis.fr — m.agropolis.fr