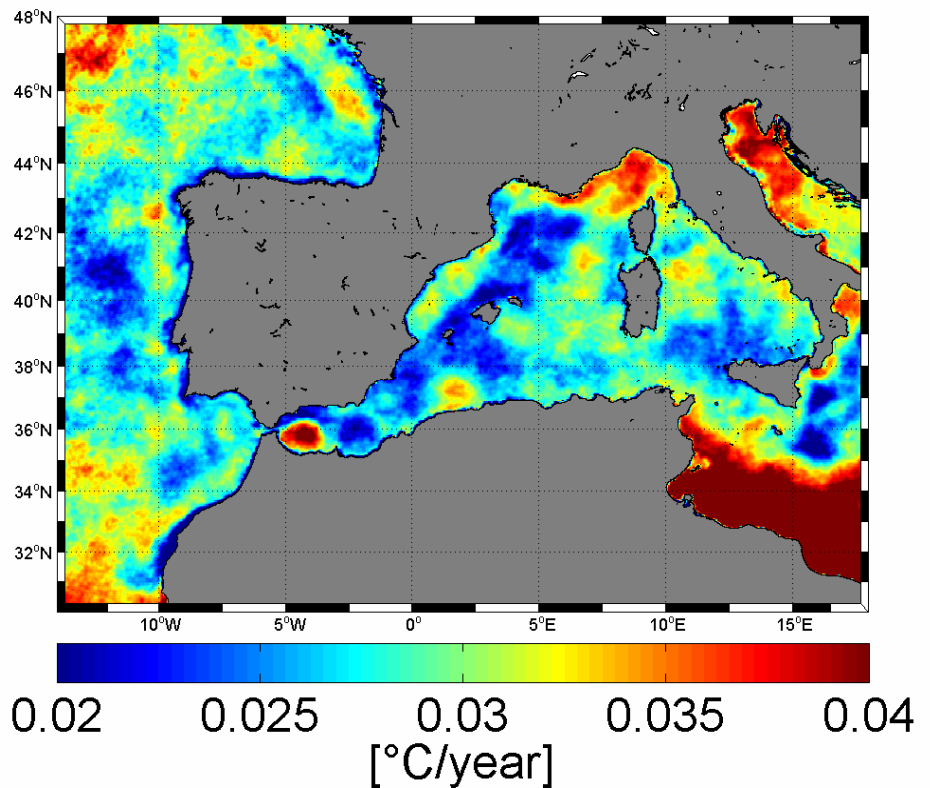


Bases scientifiques et techniques d'un observatoire du changement global en mer



Taux de réchauffement sur la partie Occidentale du bassin Méditerranéen estimé à partir des mesures satellites AVHRR depuis 1985 (travail effectué au LOS).

Bases scientifiques et techniques d'un observatoire du changement global en mer

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : RST.ODE/LER-PAC/14-09 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : Bruno Andral Adresse électronique : bandral@ifremer.fr		date de publication : Août 2014 nombre de pages : 60 bibliographie : oui illustration(s) : oui langue du rapport : FR
Titre de l'article : Bases scientifiques et techniques d'un observatoire du changement global en mer		
Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
Auteur principal : Andral Bruno	Organisme / Direction / Service, laboratoire ODE/UL/LER-PAC	
Collaborateurs : M.Bouchoucha, I. Pairaud, S. Sartoretto, N. Reul.		
Cadre de la recherche : Définition d'un observatoire du changement global		
Destinataire : AERM&C		
Résumé <p>La Méditerranée constitue un des pôles mondiaux de biodiversité et un lieu clé des changements climatiques globaux, avec des taux de réchauffement constatés en surface parmi les plus élevés de la planète (~+ 0.06°C/an). Nous pouvons en constater aujourd'hui les premiers symptômes : transformation des écosystèmes et habitats, augmentation de la température de l'eau et son cortège d'espèces exotiques, espèces invasives animales et végétales et leurs impacts sur les espèces indigènes.</p> <p>Les îles, par leur taille, et du fait qu'elles sont moins soumises aux pressions anthropiques directes, sont des laboratoires idéaux pour suivre l'impact des changements globaux sur la biodiversité, sans être perturbé par des effets locaux. Dans le cadre de l'initiative "Petites Îles de Méditerranée" http://www.initiative-pim.org/ portée par le Conservatoire du Littoral et en s'appuyant sur son réseau d'une vingtaine d'îles « sentinelles », l'objectif de cette étude est de proposer les bases d'un observatoire du changement global à l'échelle de la Méditerranée.</p> <p>Limité dans un premier temps au bassin occidental, il repose sur les outils et les méthodologies développés par Ifremer et plus particulièrement le LER/PAC et le LOS et mis en œuvre par les gestionnaires chargés de la protection des îles. Cet observatoire, s'il se développait, devrait être incrémenté par de nouveaux indicateurs développés en partenariat avec la communauté scientifique, compte tenu de la complexité du phénomène étudié et de son emprise spatiale.</p>		
Mots-clés Changement global, biodiversité, communautés benthiques, poissons, phytoplancton.		

sommaire

Préambule.....	9
Introduction.....	11
1. Caractéristiques générales de la Méditerranée.....	15
2. Conséquences du changement global	19
2.1. Impacts physiques.....	19
2.2. Impacts sur la biodiversité marine.....	21
3. Les programmes de suivi et d'observation.....	29
3.1. Paramètres physiques et biochimiques	29
3.2. Paramètres biologiques.....	31
4. Propositions pour un observatoire du Changement Global	33
4.1. Objectifs.....	33
4.2. Zones d'intérêt majeur en Méditerranée Occidentale.....	37
4.3. Descripteurs pris en compte et méthodologie.....	38
4.3.1. Paramètres biologiques.....	38
4.3.2. Paramètres physiques.....	42
4.3.3. Suivi des pressions anthropiques.....	45
4.4. Bancarisation des données.....	49
5. Développements méthodologiques	51
6. Conclusion	53
Bibliographie.....	55



Préambule

La Méditerranée constitue un des pôles mondiaux de biodiversité et un lieu clé des changements climatiques globaux, avec des taux de réchauffement constatés en surface parmi les plus élevés de la planète ($\sim + 0.06^\circ\text{C}/\text{an}$). Les impacts de ces derniers (augmentation de la température, acidification, élévation du niveau de la mer), l'introduction de nouvelles espèces parfois invasives (migrants lessepsiens, fouling, eaux de ballast des navires) et les différentes activités anthropiques (pêche, tourisme, rejets domestiques et industriels, déchets) impactent et impacteront de plus en plus, tant les écosystèmes et leur biodiversité que le secteur économique.

Nous pouvons en constater aujourd'hui les premiers symptômes : transformation des écosystèmes et habitats, augmentation de la température moyenne de l'eau et son cortège d'espèces exotiques, espèces invasives animales et végétales et leurs impacts sur les espèces indigènes.

Dans le contexte du changement global, une des questions fondamentales qui est posée pour la mer Méditerranée est celle des effets de l'augmentation de la température et de la variabilité du climat sur les modifications des régimes thermiques, principalement sur la stratification thermique saisonnière, et de leurs impacts à moyen et long terme sur les écosystèmes côtiers aux échelles locale, de façade et régionale.

Malgré la très forte vulnérabilité des écosystèmes côtiers, il n'existe que très peu de données sur les impacts locaux du changement climatique, en particulier pour les rives Sud et Est de la Méditerranée. La rapidité des changements en cours et la gravité potentielle des impacts biologiques (non linéaires) causés par les stress thermiques montrent qu'il est urgent d'acquérir les connaissances de base sur les indicateurs physiques et biologiques de ces changements, afin de développer nos capacités à anticiper les trajectoires futures des écosystèmes (habitats et peuplements).

Les îles, par leur taille, et du fait qu'elles sont moins soumises aux pressions anthropiques directes, sont des laboratoires idéaux pour suivre l'impact des changements globaux sur la biodiversité, sans être perturbé par des effets locaux.

Dans le cadre de l'initiative "**Petites Îles de Méditerranée**" <http://www.initiative-pim.org/> portée par le Conservatoire du Littoral et en s'appuyant sur son réseau d'une vingtaine d'îles « sentinelles », l'objectif de cette étude est de proposer **les bases d'un observatoire du changement global à l'échelle de la Méditerranée**.

Le document présente la problématique du changement global à l'échelle du bassin, en précisant les principales cibles physiques et biologiques impactées par ce phénomène. Un bilan des programmes d'observation existants ou en cours de lancement pour l'étudier est également présenté, en recommandant les principaux

descripteurs et paramètres à suivre. Enfin ce document propose une première ébauche de réseau d'observation à l'échelle du bassin occidental, reposant sur les outils et les méthodologies développés par Ifremer et plus particulièrement le LER-PAC et le LOS.

Il va de soi que cet observatoire, s'il se développait, devrait être incrémenté par de nouveaux indicateurs développés en partenariat avec la communauté scientifique, compte tenu de la complexité du phénomène étudié et de son emprise spatiale.

La bibliographie traitant de cette problématique est importante et de nombreuses synthèses ont été réalisées sur le sujet que ce soit dans le cadre des activités de la CIESM ou du PNUE (CAR/ASP et Plan Bleu).

A ce titre, l'étude bibliographique, réalisée dans le cadre de cette étude, repose sur les synthèses réalisées dans les trois rapports suivants :

- PNUE ó PAM - CAR/ASP, 2008. Impact des changements climatiques sur la biodiversité en mer Méditerranée. Perez T.eds., CAR/ASP publ., Tunis.
- CIESM 2008. Climate warming and related changes in Mediterranean marine biota. N° 35 in CIESM Workshop Monographs (F. Briand, Ed), 152 p, Monaco.
- PNUE - PAM - Plan Bleu, 2008. Changement Climatique et Energie en Méditerranée.

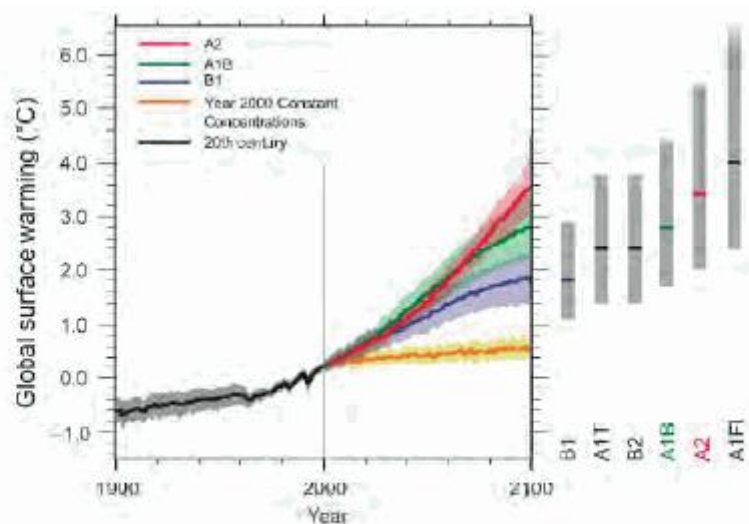


Globicéphales en Méditerranée. © Ifremer

Introduction

Selon le quatrième rapport du GIEC (Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), paru en 2007 « *Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, car il ressort désormais de l'observation de l'augmentation des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et des océans, de la fonte généralisée des neiges et des glaces, et de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer* ». Le rapport confirme l'origine anthropique de ce dernier : « *L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XXe siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques* ».

D'ici la fin de ce siècle il existera, parmi les six scénarios étudiés par le GIEC (figure 1), une dispersion de l'augmentation moyenne de la température de l'air en surface, variant entre près de 2°C pour le scénario le moins élevé (nommés B1 et A2, au sein d'une fourchette probable comprise entre 1,1°C et 2,9°C) et environ 4°C pour le scénario le plus élevé (nommé A1F1, au sein d'une fourchette probable comprise entre 2,4°C et 6,4°C). Les scénarios sont basés sur des hypothèses estimant les niveaux de croissance de la population, les activités économiques et commerciales, ainsi que les niveaux de consommation d'énergie. Pour un scénario moyen (nommé A1B), la meilleure estimation est de 3,4°C (au sein d'une fourchette probable comprise entre 2°C et 5,4°C). Les fourchettes sont dues au fait que les mécanismes physiques, qui comprennent des rétroactions entre le climat et les cycles du carbone et du dioxyde de carbone, sont encore mal compris.



Moyennes selon six scénarios clés du GIEC, notamment : B1 (bleu), A1T, B2, A1B (vert), A2 (rouge), A1F1. La courbe orange suppose une concentration en GES stable à partir de l'an 2000

Figure 1 : Les moyennes multi modèles et les intervalles estimés du réchauffement global en surface (°C) au cours du 21^{ème} siècle (source rapport GIEC 2007)

Selon une étude du Plan Bleu, bien que les valeurs du réchauffement des températures moyennes présentées dans les différents scénarios puissent paraître peu élevées, 5°C seulement nous séparent de la dernière période glaciaire. Ainsi, une évolution relativement faible des températures moyennes pourrait entraîner des événements météorologiques extrêmes beaucoup plus intenses, responsables d'un grand nombre des impacts régionaux et locaux considérables qui touchent l'ensemble de la société humaine. Il est très probable, par exemple, que les canicules s'intensifient (en fréquence, en intensité et en durée), tandis que les fortes précipitations (ou leur absence) seront réparties différemment par rapport à la climatologie connue.

Plusieurs séries de données mesurées *in-situ* montrent que le réchauffement des eaux côtières du bassin Ouest est une certitude sur les 30 dernières années (1,4°C à 25 m). A ces séries sont venues s'ajouter d'autres jeux de données contemporains réunis en Méditerranée Nord Occidentale le long des côtes de Provence en particulier (Série SOMLIT-INSU de Villefranche-sur-mer, série Estartit, série Marine Nationale Île du Levant) (figure 2). Ces trois séries confirment toute la même tendance d'un réchauffement de l'ordre de 1°C au cours des 30 dernières années sur le littoral de Méditerranée Nord Occidentale.

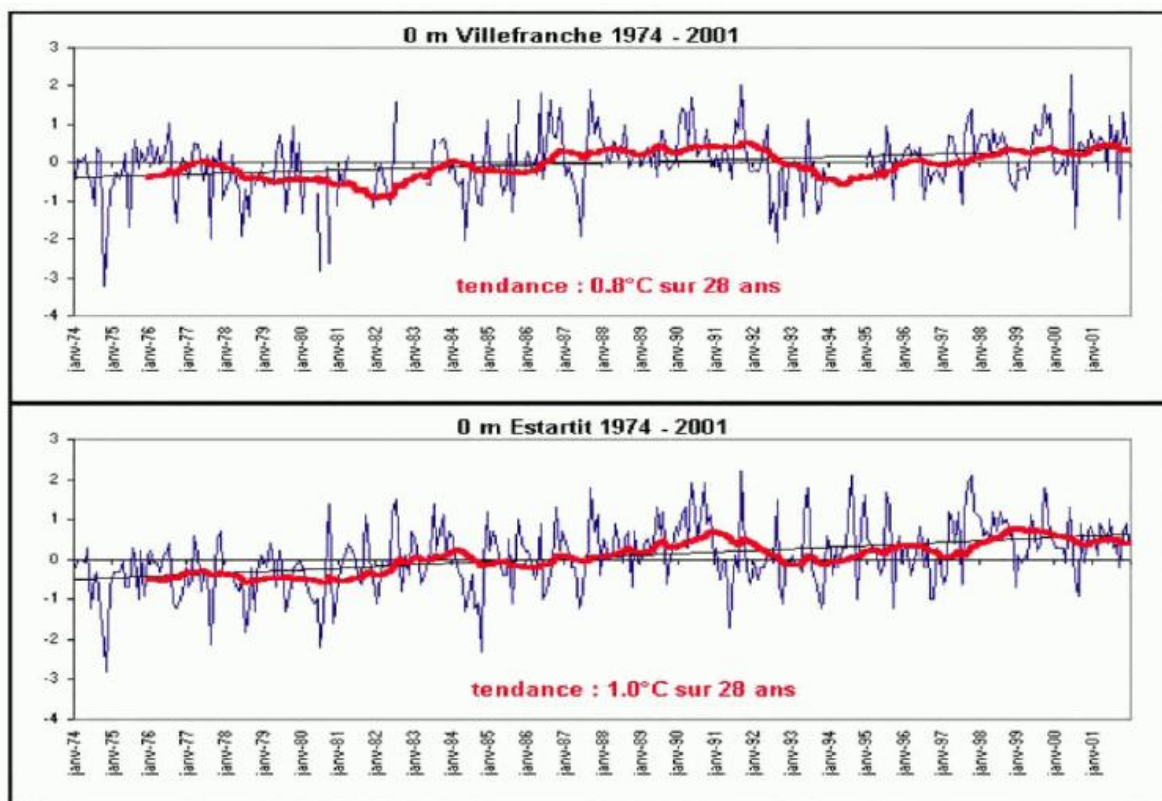


Figure 2 : Séries SOMLIT-INSU de Villefranche sur Mer et Série Pascual de l'Estartit. Présentation des écarts mensuels à la moyenne pluriannuelle (bleu) avec moyenne mobile (rouge) et estimation d'une tendance linéaire depuis 1974 (D'après Bensoussan & Romano, in Boury-Esnault et *al.* 2006).

Malheureusement, on ne possède pas encore de données comparables issues du Sud de la Méditerranée ou de la Méditerranée Orientale.

Les impacts du changement climatique sont extrêmement divers. Leurs effets se croisent et s'amplifient mutuellement, ils amplifient les effets des activités et des aménagements côtiers.

Ces variations liées aux changements climatiques (températures, précipitations, vents, augmentation des teneurs en gaz carbonique, élévation du niveau de la mer), conjuguées aux activités humaines (pollution, littoralisation, surexploitation des ressources naturelles, introductions d'espèces allogènes) impactent et impacteront de plus en plus tant les secteurs socio-économiques que les systèmes naturels.

Les sociétés du Sud et de l'Est de la Méditerranée et leur environnement sont les plus vulnérables aux changements climatiques, pour des raisons naturelles (déficit hydrique notamment) et de modes de vie et de développement concentrés sur l'espace littoral. Ces pays émergents sont d'autant plus vulnérables qu'ils sont insuffisamment outillés aux plans technique et financier pour faire face aux besoins en matière d'amélioration des connaissances, comme en matière de mise en oeuvre de réponses adaptatives pour prévenir ou réduire les effets du changement climatique.



1. Caractéristiques générales de la Méditerranée

La région méditerranéenne est bordée par 21 états riverains aux caractéristiques géo-politiques, démographiques et socio-économiques différentes. La mer Méditerranée a une superficie de 2,51 millions de km² et un linéaire côtier de 46 000 km sans compter les 19 000 km de côtes des îles.

La mer Méditerranée a une profondeur moyenne de 1 500 m et le point enregistré le plus profond est de 5 121 m en mer Ionienne au creux de la fosse de Matapan (au large du Péloponnèse). Le volume de la Méditerranée est de 3,7 millions de km³.

Du point de vue hydrologique, la mer Méditerranée se divise en deux bassins profonds, celui de l'Ouest et celui de l'Est, séparés par le seuil siculo-tunisien (hauts fonds situés entre la Sicile et la Tunisie), avec un déficit hydrique compensé par des flux importants venant de l'Atlantique et de la mer Noire. Le canal de Suez la relie à la mer Rouge.

La Méditerranée est composée d'un certain nombre de sous-systèmes : Ligure, mer Tyrrhénienne, mer Ionienne, Adriatique, Egée, du Levant, et les grandes zones marines du Sud - hydrologiquement elle compte un total de 11 sous-bassins. L'influence continentale s'exerce principalement à travers les grands fleuves - Rhône, Ebre, Pô, Nil - et les cours d'eau. Les zones côtières sont également diversifiées, avec des sous-systèmes spécifiques comme l'Adriatique, mer semi-fermée bordée par les Apennins et les Dinarides, l'Arc Alpin au nord de la Méditerranée, les reliefs côtiers dépendant de l'Atlas au Maghreb, et les bandes côtières plates s'étendant de la Libye à l'Égypte soumises à l'influence immédiate du Sahara, le système insulaire Egéen, les littoraux méditerranéens du Moyen-Orient.

D'une manière générale, le plateau continental est relativement réduit, sauf dans trois zones : la mer Adriatique, la mer Égée, et la plate-forme s'étendant entre la Sicile et la Libye au large de la Tunisie.

Circulation générale

La circulation de surface en Méditerranée a fait l'objet de nombreuses études en France comme à l'étranger.

Elle est relativement complexe de par la géométrie du bassin divisé en plusieurs petites mers et sa géomorphologie sous marine accidentée, composée de bassins d'effondrement profonds séparés par des seuils élevés (Gibraltar, Bosphore, Dardanelles).

Deux bassins principaux apparaissent : le bassin occidental et le bassin oriental, dont la frontière peut être matérialisée par une ligne reliant la Tunisie à la Sicile et à la botte italienne, la mer Adriatique étant rattachée au bassin oriental.

Très schématiquement, la circulation de surface en Méditerranée suit une boucle anticyclonique (figure 3), localement perturbée par des phénomènes de moyenne



échelle. L'eau atlantique peu salée pénètre en surface par le détroit de Gibraltar. Au cours de son cheminement dans le bassin, elle est transformée en eau méditerranéenne plus dense qui ressort à son tour par Gibraltar, avec un temps de renouvellement qui en moyenne varie de 50 à 100 ans. Les courants de surface influencés par la météorologie et les saisons présentent des variabilités temporelles allant de la journée à la saison et suivent des trajectoires tortueuses. Ils peuvent former de grands tourbillons de quelques centaines de kilomètres, dont la durée de vie varie de quelques mois à quelques années. Certaines de ces structures sont bien connues à l'instar du tourbillon Ierapetra que l'on peut observer au sud-est de la Crète.

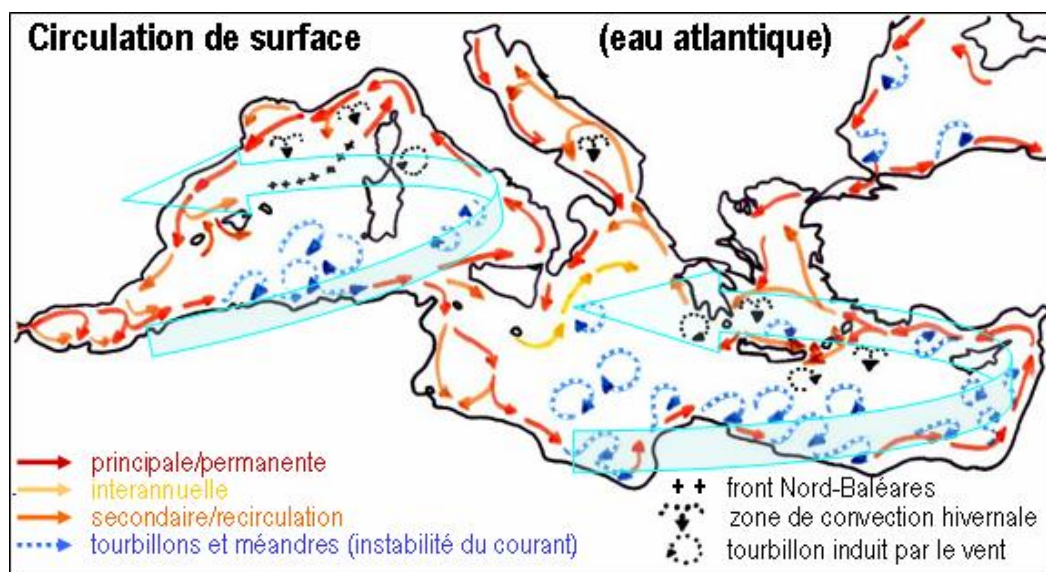


Figure 3 : schéma simplifié de la circulation des eaux de surface en Méditerranée.
Source: Millot et Taupier-Letage (2005).

Le climat de la région est de type « méditerranéen », sous-tropical et tempéré, avec des différences significatives entre les côtes nord et sud, des micro-climats, et de grandes différences dans les précipitations et les caractéristiques et les conséquences qui en résultent. Ces influences s'exercent sur les masses d'eau, un gradient croissant de températures est perceptible du nord au sud et d'ouest en est, marqué par les apports atlantiques.

Biodiversité

En Méditerranée, les inventaires font état de 10 000 à 12 000 espèces, ce qui équivaut à 4-18% (en fonction des groupes taxonomiques) des espèces marines connues dans le monde, et ce, sur respectivement 0,82% et 0,32% de la surface et du volume de l'océan mondial, elle constitue l'un des 25 pôles de biodiversité reconnus à l'échelle planétaire. C'est aussi le cas pour le domaine continental du bassin méditerranéen qui, tout en ne représentant que 1,6% de la surface des continents, englobe 10% de la biodiversité mondiale.

Cette petite mer semi-fermée est riche de nombreuses îles et bancs sous-marins. Il s'agit aussi d'une aire majeure d'hivernage, de reproduction et de migration.

Certaines espèces y forment les fondations de cette densité de la vie. En équilibre dynamique et fragile avec leur environnement, elles construisent les principaux paysages remarquables de la zone côtière méditerranéenne, comme les herbiers de posidonies et les fonds à coralligène. On y recense de nombreux autres habitats sensibles : les communautés à coraux profonds, les grottes sous-marines, les zones dunaires, les forêts littorales et les lagunes méditerranéennes, les zones humides d'importance internationale pour les oiseaux.



Herbier de Posidonie sur roche. © Ifremer

L'endémisme est plus important en Méditerranée qu'en Atlantique. Sur le plan biogéographique, le biote méditerranéen comporte 55 à 77% d'espèces atlantiques, 3 à 10% d'espèces pantropicales, 5% d'espèces ilesespiciennes et entre 20 et 30% d'espèces endémiques.

Cette forte diversité biologique est à mettre en relation avec les caractéristiques géomorphologiques et hydrographiques particulières du bassin méditerranéen, son

histoire géologique et sa position d'interface entre les biomes tempérés et tropicaux, qui lui permettent d'accueillir à la fois des espèces à affinités froides et chaudes.

Ces côtes subissent une pression humaine, constante et accrue, générée par l'activité de 150 millions d'habitants et l'affluence de 200 millions de touristes par an, dont les conséquences n'ont pu être maîtrisées pendant des décennies.

L'urbanisation effrénée et intensive, la surexploitation des ressources, la prolifération d'espèces introduites, les transports maritimes et la pollution ont mené de façon directe à la dégradation de la biodiversité, à la raréfaction des espèces les plus sensibles et surtout à la menace d'habitats côtiers remarquables, dont certains forment des sites extraordinaires, comme le Parc National de Port-Cros ou l'archipel de Zembra.



2. Conséquences du changement global

La conséquence la plus médiatisée du changement climatique sur le littoral est bien sûr l'élévation du niveau de la mer, qui suscite dès aujourd'hui de nombreuses recherches portant sur l'adaptation des écosystèmes, la gestion du trait de côte ou la préservation des enjeux socio-économiques. Mais d'autres implications du changement climatique impactent dès aujourd'hui les milieux côtiers : l'acidification et le réchauffement des océans modifient les équilibres écologiques, et par conséquent les secteurs de l'aquaculture, de la pêche ou du tourisme.

Enfin, des évolutions importantes sont à prévoir sur la qualité et la disponibilité des ressources en eau douce. L'élévation du niveau de la mer accroît le risque d'intrusions salines dans les nappes phréatiques. La tension sur la ressource sera encore accrue par les modifications annoncées du régime des précipitations, couplées à un accroissement des besoins sociétaux (pour l'irrigation par exemple). Ces impacts préfigurent des enjeux de gestion majeurs, dont la prise en compte par la sphère de la recherche est encore naissante.

2.1. Impacts physiques

Température et salinité

Les eaux peu profondes de la mer Méditerranée se sont déjà réchauffées de pratiquement 1°C depuis les années 1980 et les températures de surface de la mer devraient se réchauffer d'environ 2,5°C d'ici 2100 selon les scénarios actuels. D'ici la fin du 21^{ème} siècle, le cumul des précipitations en baisse et de l'évaporation en hausse risque d'avoir pour effet une augmentation du déficit en eau douce de la mer (d'environ 15 cm par an), ce qui ensuite contribuera à une hausse progressive de la salinité à la surface de la mer (SSS) de l'ordre de 0,5 unité au cours des 100 prochaines années.

Ces changements de température et de salinité pourraient avoir des effets sur d'autres processus océanographiques et se traduire par des modifications de la circulation thermohaline (circulation des masses d'eau contrôlée par leur densité, sous l'effet des variations de température et de salinité), une plus faible intensité des remontées d'eau et une baisse de la formation des masses d'eau profonde.

Précipitations

Pour les précipitations, les modèles convergent vers des sécheresses en nette augmentation, avec une baisse du nombre de jours de précipitations et une augmentation de la durée des épisodes les plus longs sans pluie.

Les événements extrêmes seront plus fréquents, ils se traduiront par une augmentation des inondations, tant en terme d'occurrence que d'intensité. Concernant les vagues et les inondations dues aux tempêtes, les résultats des



modèles sont préliminaires mais la diminution du nombre de dépressions et du vent devrait diminuer ces risques même si cette appréciation doit être nuancée à l'échelle locale.

Niveau de la mer

La hausse de la température de l'eau de mer sous-entend une plus faible densité de l'eau et donc un plus grand volume d'eau. L'augmentation de la salinité a un effet contraire car la densité de l'eau augmente en fonction de la salinité.

Ces deux facteurs pourraient se compenser l'un l'autre mais en raison des doutes existant actuellement quant à l'ampleur de cette variation, il est difficile de prédire avec précision l'évolution du niveau de la mer dans cette région. De plus, la masse d'eau marine totale de la Méditerranée est susceptible de croître, puisque la masse d'eau au niveau mondial augmentera avec la fonte des glaciers et des calottes glacières.

La hausse du niveau de la mer demeure encore difficile à prévoir au niveau régional, en particulier dans le bassin Méditerranéen. Elle pourrait atteindre 23 à 47 cm d'ici la fin du 21^{ème} siècle selon le GIEC, d'après les projections de 2007 considérées aujourd'hui comme optimistes (figure 4). De nombreuses régions méditerranéennes seraient dès lors soumises à un risque important de submersion et d'érosion, parmi lesquelles on peut citer les cas extrêmes de Venise, de l'archipel des Kerkennah en Tunisie, Alexandrie et le delta du Nil en Egypte.

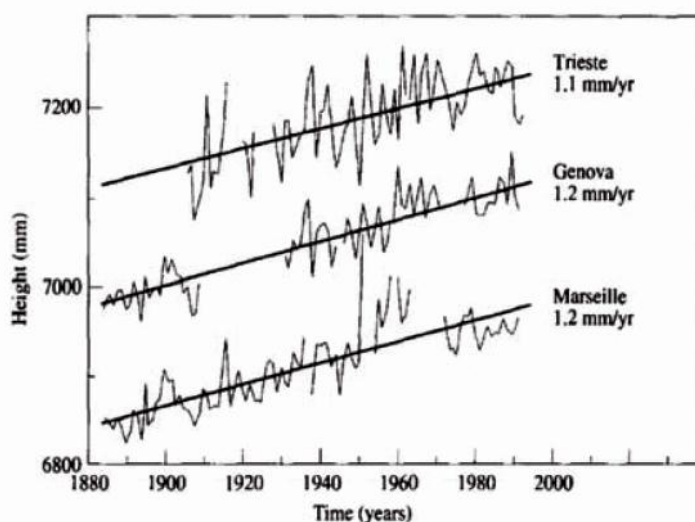


Figure 4 : Trois séries de données de Méditerranée occidentale démontrant l'élévation du niveau de la mer. Données disponibles au « Service permanent pour le niveau moyen de la mer » (<http://www.nbi.ac.uk/psmsl/Nicholls & Hoozcmans 1996>).

(Source: PNUE-PAM-CAR/ASP, 2008)

Les conséquences à craindre sont principalement les suivantes :

- Aggravation des submersions sur les côtes basses, en particulier les espaces deltaïques, les littoraux à lagunes, les marais maritimes et certaines îles ;
- Accélération de l'érosion des falaises et des plages ;
- Renforcement de la salinisation dans les estuaires ;
- Réduction du volume d'eau douce des nappes phréatiques.

Acidification

Le réchauffement climatique s'accompagne d'une série d'évolutions des équilibres chimiques. Alors que la concentration en oxygène des eaux marines tend à diminuer, la concentration en CO₂ connaît un accroissement significatif : on estime que les océans absorbent 25 à 30 % du CO₂ émis par les activités humaines. Cette absorption entraîne une **acidification** des eaux superficielles marines, qui ont connu une diminution de leur pH moyen d'environ 0,1 depuis 1800 et avec toujours des disparités géographiques.

La dynamique couplée du réchauffement et de l'acidification de l'océan mondial se caractérise par une grande complexité, incluant différents mécanismes de rétroaction. Par exemple, l'élévation de la température diminue la solubilité du CO₂ dans l'eau.

Des impacts sont attendus sur les écosystèmes, et les premières communautés biologiques concernées pourraient être les bivalves à coquilles carbonées, dont la physiologie est liée au pH du milieu.

2.2. Impacts sur la biodiversité marine

Les effets potentiels du changement global (réchauffement climatique et augmentation de la fréquence des événements extrêmes) agissent à différents niveaux d'organisation biologique, depuis des perturbations physiologiques d'individus jusqu'à des modifications d'une communauté et de son fonctionnement, et ce par des extinctions locales ou/et des extensions de certaines espèces (figure 5).



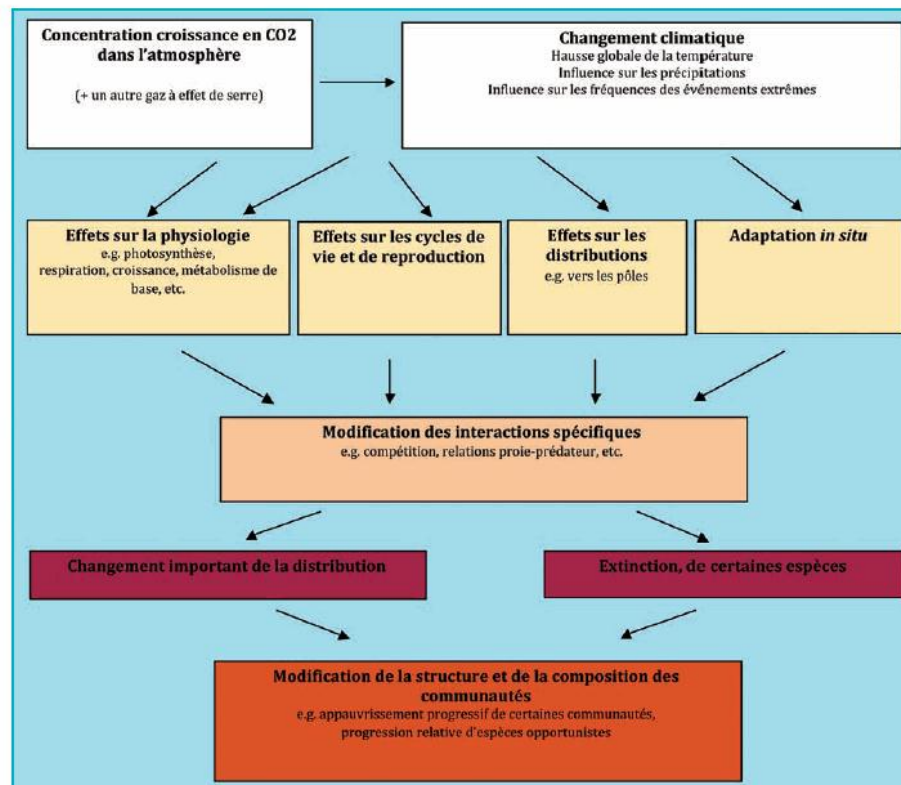


Figure 5 : Impact des changements climatiques sur la biodiversité [D'après Hughes (2000)].

L'augmentation de la température du milieu de vie, au-delà d'une limite de tolérance variable selon les espèces, entraîne l'apparition d'un stress physiologique, d'autant plus prononcé que la durée d'exposition à cette température est longue et que les espèces considérées sont déjà plus proches de leur limite supérieure de thermotolérance.

Ces stress, s'ils se produisent de manière régulière, peuvent conduire, soit à des changements de la répartition géographique, soit à des modifications du cycle de vie et des adaptations in situ aux nouvelles conditions, soit enfin, chez les formes sessiles ou à mobilité réduite, à d'importantes mortalités accompagnées d'épizooties et de substitution des espèces touchées par des formes méridionales mieux armées. Ces modifications retentissent bien entendu sur la biodiversité, et peuvent modifier sensiblement l'aspect des paysages sous-marins.

Les prévisions concernant les conséquences du réchauffement sur la biodiversité dans son ensemble sont très préoccupantes. Sur la base d'un scénario modéré de changement climatique, une estimation récente, prenant en compte 20 % de la surface terrestre, prévoit une extinction de 15 à 37 % des espèces occupant cette surface d'ici 2050. Les zones littorales doivent faire l'objet d'une particulière attention car elles abritent une diversité biologique élevée, des systèmes biologiques complexes, très productifs et ont un degré d'interaction élevé avec les populations

humaines. Les effets potentiels des changements climatiques représentent des sources nouvelles de stress et justifient ainsi pleinement une préoccupation croissante pour la conservation des écosystèmes marins côtiers, voire leur restauration.



Paysage sous marin méditerranéen. © Ifremer.

Biodiversité côtière

Directement ou indirectement, l'élévation du niveau de la mer, le réchauffement et la modification du régime des précipitations devraient grandement modifier les écosystèmes côtiers et plus largement l'éco-sociosystème : les espèces forestières les moins tolérantes à ces changements devraient connaître des modifications de leurs aires de répartition avec un déplacement vers le nord de leurs limites latitudinales. Les ripisylves et les marais sont appelés à se réduire avec des menaces d'érosion de la biodiversité qui leur est inféodée. Les agrosystèmes sont également menacés par les événements climatiques imprévisibles dont la fréquence est appelée à augmenter et la tendance au déficit hydrique et des ressources en eau de manière plus générale.

Sur un plan plus strictement côtier, les zones humides littorales et les embouchures de cours d'eau seront également affectées par l'élévation du niveau de la mer : en fonction de leur configuration elles auront tendance soit à se restreindre soit à se replier vers l'intérieur. Les côtes meubles auront également tendance à reculer ou alors à disparaître sous l'effet de l'érosion découlant de l'élévation accélérée du niveau de la mer.

Lors de cette phase transitoire d'élévation accélérée du niveau de la mer, les organismes les moins mobiles seront les plus lourdement impactés. A l'opposé les organismes mobiles, notamment les poissons et les oiseaux d'eau devraient pouvoir s'adapter. Les aspects liés à la résistance et la résilience des écosystèmes, des habitats et des espèces demeurent pour la plupart peu connus.

Des questions se posent notamment par rapport aux effets des changements climatiques sur les populations de phoques moines par exemple, dont les grottes qui



les abritent pourraient être submergées par les eaux ou alors sur le recul des plages servant de sites de ponte pour la tortue caouane.

Des questions persistent également par rapport à l'adaptation d'organismes sessiles, notamment quant au devenir de formations particulières comme les trottoirs à vermet.

Modification de l'aire de répartition des espèces

Actuellement, en Méditerranée, parmi les conséquences directes du réchauffement climatique, on peut observer une augmentation simultanée de l'abondance des espèces thermophiles méditerranéennes et allochtones et la disparition ou la raréfaction des espèces sténothermes « froides ».

La répartition des espèces est généralement déterminée par la latitude. Les espèces thermophiles et d'origine tropicale dominent la partie sud de la Méditerranée alors que les espèces tempérées sont plus abondantes dans la partie nord. Récemment, de nombreuses espèces thermophiles ont largement étendu leur aire de répartition et sont de plus en plus abondantes notamment dans la partie nord-ouest du bassin.

Un des premiers signes de cette tendance repose sur le crénilabre paon (*Thalassoma pavo*).

Jusqu'aux années 1980, cette espèce était très fréquente dans le sud et l'est de la Méditerranée et rare dans la partie nord-ouest du bassin. Des adultes de *T. pavo* ont été enregistrés pour la première fois à Scandola (Corse, France) en 1988, alors que des juvéniles ont été observés en 1991. Actuellement, il existe des preuves que l'aire de répartition de *T. pavo* a augmenté d'environ 1 000 km.



Crénilabre paon femelle

Des espèces emblématiques de Méditerranée bénéficient de la tendance au réchauffement.

Le cas du mérou brun *Epinephelus marginatus* est un des meilleurs exemples. Ce poisson qui a été longtemps la cible privilégiée des pêcheurs sous-marins était devenu très rare sur les côtes de Méditerranée Nord Occidentale dans les années 70. Par ailleurs, les rares individus observés étant de grande taille (et majoritairement mâles), on supposait que ces derniers étaient nés et avaient grandi dans les eaux plus chaudes du Sud de la Méditerranée. A la fin des années 1980, quelques mérous bruns de taille moyenne (30 à 40 cm) ont commencé à faire leur réapparition, peut-être en provenance d'Afrique du Nord et progressivement, la proportion de mâles et de femelles des populations de mérou brun le long des côtes de Provence a retrouvé un équilibre permettant, ou laissant espérer la reproduction. Le réchauffement des eaux pourrait avoir facilité le développement des oeufs et des juvéniles. Au début des années 90, des mérous de très petite taille ont été observés en Provence, puis les comportements de reproduction ont été observés sur les côtes catalanes espagnoles.

Aujourd'hui, les comportements de reproduction sont fréquemment observés dans toutes les aires marines protégées de Méditerranée Nord Occidentale. Bénéficiant en France d'une protection vis-à-vis de la chasse sous-marine depuis 1993, puis de la pêche à l'hameçon, les effectifs de mérous bruns sont en constante augmentation à l'intérieur et hors des aires marines protégées, et des individus de très petites tailles sont régulièrement observés, indiquant avec quasi certitude la reproduction de cette espèce en Méditerranée Nord Occidentale.

La tendance au réchauffement actuel peut aussi favoriser la propagation de plusieurs prédateurs tels que les barracudas *Sphyraena spp.* et la dorade coryphène *Coryphaena hippurus*. La hausse de température peut influencer le comportement des grands poissons pélagiques, comme le thon rouge *Thunnus thynnus* et la sériole *Seriola dumerilii*. Ces grands migrateurs semblent actuellement rester plus longtemps dans le bassin ouest, avec des conséquences non négligeables sur leurs stocks et sur le réseau trophique.



Thon rouge

En raison de la tendance au réchauffement, une homogénéisation du biote méditerranéen est prévisible, perturbant les entités biogéographiques présentes : schématiquement, la partie sud de la Méditerranée sera de plus en plus occupée par des espèces exotiques tropicales, le Nord sera envahi par des espèces indigènes d'eau chaude. Les espèces sténothermes d'eau froide se cantonneront au nord du bassin. Elles auront tendance à se raréfier, avec de probables possibilités d'extinction si la tendance au réchauffement se poursuit. Par exemple, le sprat *Sprattus sprattus*, qui abondait dans le golfe du Lion, est devenu très rare, quoiqu'il ne fût pas particulièrement recherché par les pêcheurs professionnels.

Invasions biologiques

Les invasions biologiques sont souvent considérées comme une composante du changement global (cf. définition de l'Institut Français de la Biodiversité), puisqu'elles affectent la biodiversité et sont souvent reliées aux changements climatiques et autres perturbations environnementales. La Méditerranée Orientale est susceptible de nombreuses invasions biologiques par des espèces exotiques à cause de sa position entre Atlantique et Mer Rouge, un trafic maritime intense, et des lagunes et des baies qui abritent des quantités de fermes aquacoles. Cependant, la plus grande proportion d'invasions résulte de l'ouverture du Canal de Suez en 1869, qui a permis l'entrée en Méditerranée d'espèces de Mer Rouge et de l'Indo-Pacifique.

Le processus de colonisation de la Méditerranée Orientale par des espèces lessepsiennes, et leur expansion vers l'Ouest semble être considérablement accéléré ces 15 dernières années sous l'effet du réchauffement. Ceci étant, en l'absence de suivis systématiques, et de séries d'enregistrements de température dans ce bassin, ces témoignages peuvent être considérés trop subjectifs.

Parmi les phénomènes écologiques de plus en plus fréquemment signalés, il faut également signaler les cas des proliférations d'agrégats mucilagineux régulièrement rapportés en Mer Tyrrhénienne et en Adriatique depuis une vingtaine d'années. L'origine de ces phénomènes est différente en fonction des bassins considérés. Dans les eaux eutrophes d'Adriatique, ces mucilages sont produits par des blooms phytoplanctoniques, principalement de diatomées et dinophytes, provoqués par des variations brutales du débit du Pô et des teneurs en nutriments.

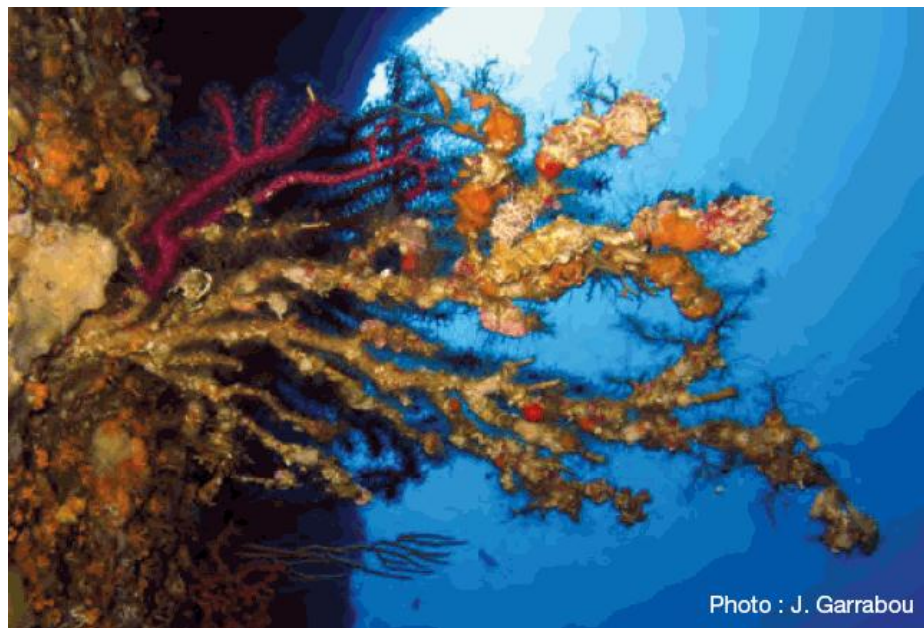
En Mer Tyrrhénienne, plus oligotrophe, c'est la prolifération d'un contingent d'algues filamenteuses (principalement *Nematochrysis marina*, *Chrysonophos lewisii* et *Acinetospora crinita*) capables de se développer en profondeur (sous la thermocline) qui est rapportée dans la majorité des cas, le facteur déclenchant restant le plus souvent énigmatique. Quelle qu'en soit l'origine, en s'accumulant sur le fond, ces mucilages exercent des effets dommageables sur les peuplements benthiques.



Mortalités massives

Les événements climatiques extrêmes peuvent être vécus comme des stress aigus perturbant le fonctionnement normal d'un système biologique. Chaque espèce présente un intervalle naturel de tolérance thermique et répond aux variations de température par des ajustements comportementaux, physiologiques, biochimiques et moléculaires. Les stress physiologiques conduisant à des maladies et des mortalités massives apparaissent lorsque les seuils de tolérance sont dépassés et que la fuite vers des conditions de vie plus tolérables n'est pas possible. Les espèces sessiles sont donc particulièrement concernées par ces phénomènes, qui, bien entendu, retentissent sur la biodiversité, et lorsque les victimes sont des formes érigées, peuvent modifier l'aspect des paysages sous-marins.

Les événements de mortalité les mieux documentés sont ceux des étés 1999 et 2003 (et dans une moindre mesure celui de 2006). Ces deux événements ont affecté au moins une trentaine d'espèces d'invertébrés de substrats durs sur plusieurs centaines de kilomètres linéaires côtiers entre France et Italie, et quelques localités en Espagne à la suite d'anomalies thermiques positives. Les organismes principalement concernés sont les mêmes en 1999 et en 2003.



Gorgone de Méditerranée *Paramuricea clavata* affectée par la hausse de température de l'eau

Les spongiaires, dont les éponges de toilette, et les gorgonaires, dont le corail rouge, sont les groupes taxonomiques les plus impactés. Des scléactiniaires ont été également victimes de blanchissements répétés.

L'examen des différentes hypothèses émises pour expliquer ces mortalités catastrophiques sur une zone très étendue a permis d'éliminer rapidement l'hypothèse

d'une pollution accidentelle ou d'un agent pathogène unique. En effet, aucune preuve d'une série d'épizooties synchrones affectant une trentaine d'espèces, appartenant à des embranchements différents, n'avait pu être apportée jusqu'à lors. En revanche, l'analyse des données météorologiques et les enregistrements de température de l'eau de mer pratiqués en Provence permettaient dans les deux cas de caractériser des anomalies thermiques exceptionnelles. On observait cependant une grande variabilité de l'incidence et de la virulence du phénomène en fonction des sites, des aires géographiques et de la profondeur. Dans les deux cas, il a été montré une bonne corrélation entre les taux de mortalité et la durée d'exposition au stress thermique. La température intervient donc par la conjugaison de sa valeur élevée et de la durée d'exposition des organismes.

Prolifération de pathogènes

L'expansion des espèces marines tropicales et subtropicales concerne également des dinophytes toxiques. Certaines espèces comme la *Gambierdiscus toxicus* (le principal agent de la ciguatera) peuvent avoir des conséquences graves sur la santé humaine. *Ostreopsis ovata* cause irritations, toux, fièvre et des problèmes respiratoires.

Gymnodinium catenatum, jusqu'alors confinée en Mer d'Alboran, a été observée pour la première fois en Algérie. Elle a fini par atteindre les côtes italiennes. Cette espèce habituée aux eaux eutrophes, mais bénéficiant de grandes capacités d'adaptation trophique, est apparue dominante en sub-surface dans certains secteurs à faible salinité. Son extension géographique est problématique à cause de sa toxicité, mais également du fait des perturbations qu'elle occasionne à la structure des chaînes trophiques pélagiques méditerranéennes. Il existe probablement un lien entre les changements climatiques et la prolifération de cette espèce. En règle générale, les espèces réagissent au stress environnemental à travers des adaptations physiologiques, biochimiques et moléculaires. Quand le seuil de tolérance des organismes est dépassé, il peut entraîner des maladies et même des événements de mortalité massive favorisant leur substitution par d'autres espèces plus résistantes. La fréquence des épidémies et des cas de mortalité de masse a nettement augmenté au cours des deux dernières décennies. Parmi les organismes marins, les éponges et les coraux (dont beaucoup sont des espèces méditerranéennes endémiques sténothermes) semblent être les taxons les plus sensibles.

Près de 40 phénomènes de mortalités massives sur un vaste territoire situé entre la mer Tyrrhénienne et le golfe du Lion ont été rapportés, probablement liés à des températures exceptionnelles, au cours des étés 1999 et 2003. Une souche pathogène de *Vibrio* originaire des mers chaudes a été identifiée. Elle a affecté la gorgone *Paramuricea clavata* en mer Tyrrhénienne et les étoiles de mer *Astropecten jonstoni* le long de la côte sarde.



3. Les programmes de suivi et d'observation

3.1. Paramètres physiques et biochimiques

Les données sur les températures de surface de la mer à grande échelle, obtenues à partir d'images satellites, indiquent clairement une tendance au réchauffement en Méditerranée. Toutefois, les informations sur le réchauffement et les modifications concernant la dynamique de la stratification survenant dans les zones côtières restent limitées. Les séries de données thermiques à résolution temporelle, disponibles pour la colonne d'eau (0 à 80 m de profondeur), ont mis en évidence une tendance au réchauffement dans les eaux côtières à différentes profondeurs ; malheureusement, les données ne couvrent que quelques sites dans le nord-ouest de la Méditerranée et le nord de l'Adriatique.

Plusieurs programmes internationaux suivent cependant le phénomène à différentes échelles spatiales et temporelles.

Réseau MOON (Mediterranean Operational Oceanography Network) et réseau MONGOOS

Le réseau MOON (Mediterranean Operational Oceanography Network, réseau océanographique opérationnel méditerranéen) est axé sur le système de prévisions méditerranéennes portant sur les variables météo-océanographiques (température, courants) et les variables biochimiques pélagiques. Il fait actuellement partie du nouveau réseau MONGOOS. Les observations se matérialisent par des relevés *in situ* de la température et de la salinité de l'eau, du niveau de la mer et de la pression atmosphérique, ainsi que par des relevés obtenus par détection à distance de la température à la surface de l'eau (SST) et de la concentration en chlorophylle.

<http://www.mongoos.eu/projects>

MyOcean2

Service de suivi au niveau national et européen à l'aide de séries de relevés à long terme *in situ* (données physiques et biochimiques) et par détection à distance (couleur des océans et SST). Parmi les paramètres mesurés figurent la température, la salinité, les courants, le niveau de la mer, la chlorophylle A, l'oxygène dissous, les nutriments et la pénétration de la lumière.

<http://www.myocean.eu>

MedGLOSS

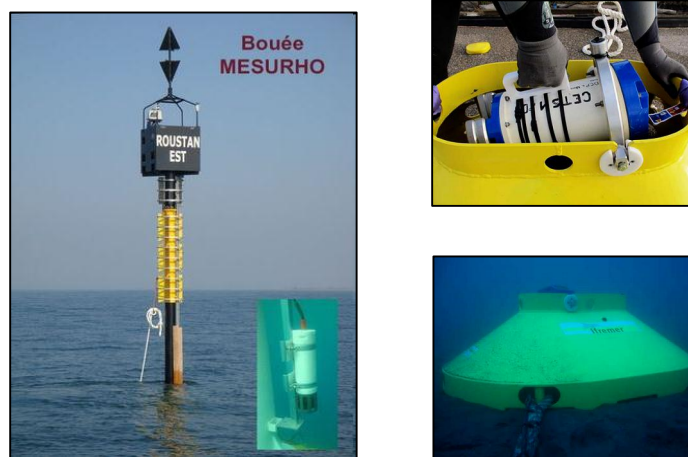
Le réseau MedGLOSS d'observation du niveau de la mer en Méditerranée et en mer Noire est un programme qui a été créé conjointement par la CIESM et la COI/UNESCO en 1997, suite aux prévisions relatives à l'élévation du niveau de la mer et au changement climatique mondial.

<http://medgloss.ocean.org.il/>

Réseau HYDROCHANGES

Observation à long terme des paramètres hydrologiques de base (température et salinité) ; réseau méditerranéen de capteurs autonomes de mesure de la conductivité, de la température et de la profondeur (CTD).

<http://www.ciesm.org/marine/programs/hydrochanges.htm>



Bouée instrumentée MESURHO et sa cage ADCP. © Ifremer

SeaDataNet, réseau des infrastructures paneuropéennes

Gestion des grandes séries de données recueillies par les flottes océanographiques et les systèmes d'observation automatisés (bouées).

<http://www.seadatanet.org>

T-MedNet

Le réseau T-MedNet vise à mutualiser l'acquisition de séries de données à long terme et à haute résolution, concernant la température des eaux côtières méditerranéennes (0-40 m) ; il a aussi pour objectif de faciliter l'analyse et le partage de ces données.

<http://www.t-mednet.org>

Ces réseaux d'acquisition de données ne permettent cependant pas de combler l'énorme déficit de connaissances concernant les régimes thermiques en zone côtière.

L'acquisition de ce type de données à haute fréquence (journalière et plus) permettrait de lever plusieurs verrous scientifiques relatifs à l'analyse des effets du changement climatique sur la biodiversité, en contribuant à l'amélioration des prévisions de température par les modèles numériques au niveau régional et côtier. Il s'agit d'une étape indispensable dans la régionalisation des scénarios climatiques et la descente jusqu'au niveau côtier afin de mieux évaluer l'impact attendu du changement climatique au niveau local.

3.2. Paramètres biologiques

Programme « Tropical Signals »

Programme de suivi à long-terme, à l'échelle du bassin, visant à détecter l'expansion ou le déclin d'espèces clés (espèces tropicales exotiques, espèces autochtones préférant les eaux chaudes et espèces autochtones préférant les eaux froides) en réaction au changement climatique.

<http://www.ciesm.org/marine/programs/tropicalization.htm>

ClimCares

Ce projet régional (2011-2013) visait à évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur les écosystèmes benthiques côtiers dans le bassin nord-occidental de la Méditerranée Nord-Occidentale en se basant sur des scénarios réalistes de réchauffement au niveau régional combinés avec les réponses biologiques au stress thermique. L'originalité de l'approche développée dans le cadre du projet résidait dans le couplage entre observation in situ, expérimentation en laboratoire et modélisation numérique. Le principal résultat concerne l'évaluation des risques de mortalité massive d'une espèce clef dans la zone d'étude (figure 6).

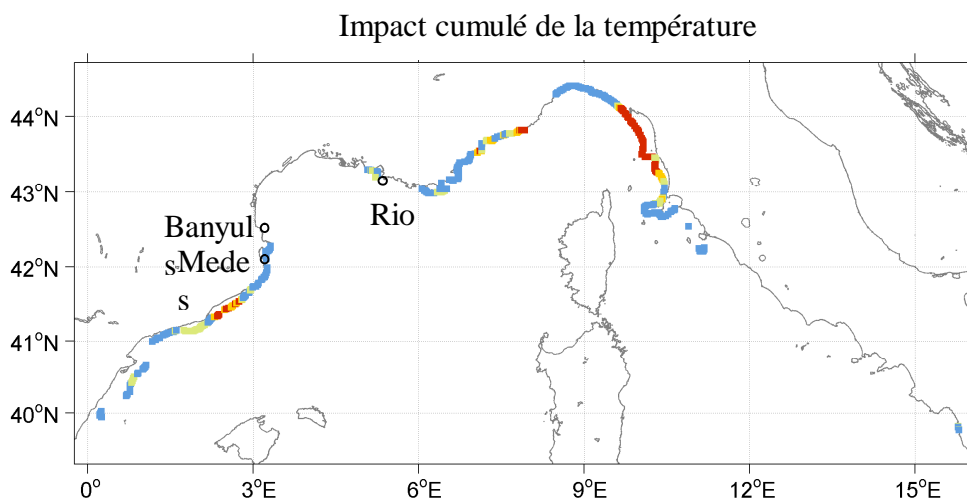


Figure 6 : Carte de risque cumulé de mortalité pour la gorgone rouge *Paramuricea calavata* construite à l'aide d'informations de thermotolérance, de limite supérieure de détection des organismes, de zones de présence géographique et utilisant les températures modélisées par la configuration MARS3D-MENOR sur la période 2001-2010. La probabilité de mortalité associée à de fortes températures augmente de faible (zones en bleu), à moyenne (vert), forte (orange), et très forte (rouge).

Figure d'après Pairaud et *al.* (2013).

<http://climcares.medrecover.org>

Comme on peut le voir il n'existe que très peu de programmes qui suivent les effets néfastes du changement climatique sur la biodiversité.

Le plus frappant c'est qu'il n'existe pas d'observatoire qui permette de capitaliser sur des mêmes sites des informations sur les conditions marines et côtières (physique et biogéochimie) et leur impact au sein de la biodiversité.

4. Propositions pour un observatoire du Changement Global

4.1. Objectifs

Les récentes études menées sur cette problématique montrent que l'ensemble du bassin s'est réchauffé très nettement à partir des années 90 et la variabilité à long terme de la température moyenne sur le bassin est principalement corrélée à des changements de la variabilité atmosphérique de très grande échelle sur l'Atlantique et l'hémisphère Nord en général. On observe ainsi une très forte co-variabilité entre la température moyenne de surface en Méditerranée et l'indice des Oscillations Atlantique Multidécennales (OAM, Kerr 1984). L'OAM semble reliée à la variation sur de longues périodes de la pluviosité et des températures de l'air dans l'hémisphère nord, en particulier en Europe et en Amérique du Nord.

Bien que tout le bassin se réchauffe fortement en corrélation avec l'OAM, la distribution du réchauffement n'est cependant pas homogène spatialement (différence entre les sous-bassins Oriental et Occidental) et montre de nettes variations interannuelles et saisonnières.

Avant 1990, le réchauffement était plus important sur la partie Occidentale du bassin, un phénomène probablement lié à des entrées d'eaux Atlantique plus chaudes dans le bassin à travers Gibraltar.

Depuis 1990, c'est la partie Orientale (Figures 7) qui se réchauffe le plus, un phénomène probablement lié à l'advection des eaux plus chaudes vers l'est par la circulation de surface mais aussi à des processus locaux "d'île chaude" liés à une forte augmentation des températures estivales sur les domaines terrestres jouxtant le bassin ainsi que sur ses îles.

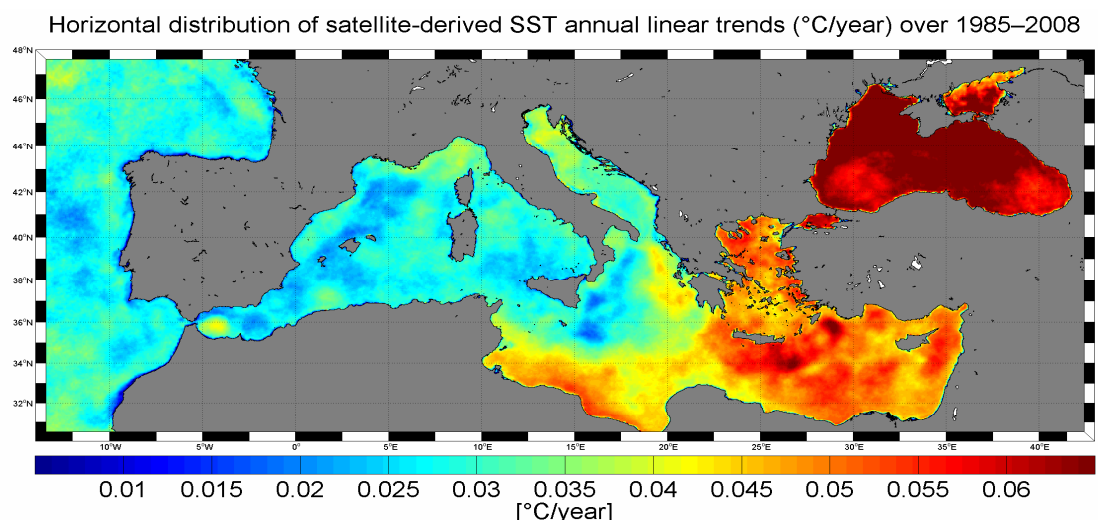


Figure 7 : Taux de réchauffement sur le bassin méditerranéen estimé à partir des mesures satellites AVHRR depuis 1985 (travail effectué au LOS-IFREMER).

L'élévation de la moyenne des températures de surface s'accompagne d'une élévation du nombre d'événements extrêmes "chaud", notamment l'été. L'apparition de plus en plus fréquente de ces conditions de température anormalement élevées (de 24 à 28°C), notamment l'été, est très critique et source de mortalité accrue pour certains organismes marins invertébrés comme les éponges, les gorgones ou les madrépores de Méditerranée (Garrabou et al., 2009; Kersting et al., 2013).

Un exemple de série temporelle d'anomalie de surface de température issues de donnée in situ acquises sur les îles Colombretes est donnée pour illustration en Figure 8 : L'évolution du taux de nécroses observé sur des madrépores de Méditerranée sur ces îles est très fortement corrélée à l'apparition de ces anomalies très chaudes.

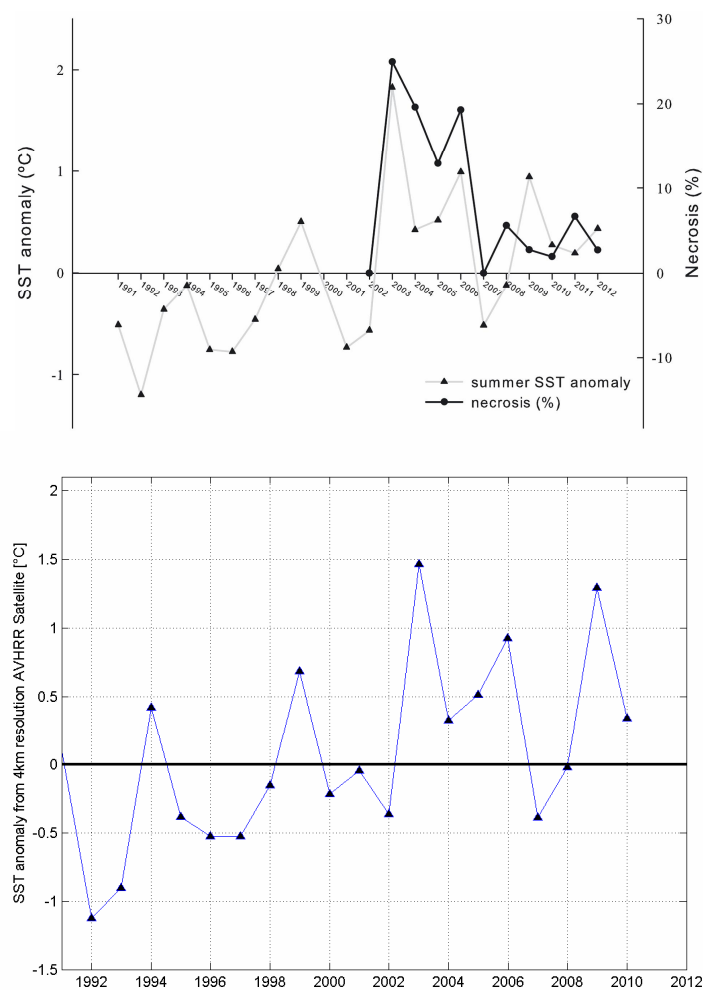


Figure 8 : Graphe de gauche: Séries temporelles des anomalies de la température de surface et du taux de nécroses observé in situ sur des madrépores de Méditerranée sur un point des îles de Colombretes depuis 1991. A noter la très forte corrélation entre les deux variables entre 2002 et 2007 (incluant notamment l'épisode de sécheresse de l'été 2003). Graphe de droite: anomalies de SST issues des mesures satellites du capteur AVHRR à 4 km de résolution spatiale sur un pixel centré sur le point de mesure in situ de Columbretes.

Les mesures in situ se restreignent cependant à certains des points limités du bassin. Les jeux de données satellites de température de surface disponibles depuis plus de 30 ans permettent maintenant d'évaluer l'historique de l'occurrence d'événements extrêmes chauds sur l'ensemble du bassin et de réaliser des analyses de corrélation plus évoluées. Comme illustré en Figure 9, les mesures satellites de SST sont tout à fait cohérentes avec les observations in situ et ont atteint une qualité suffisante pour généraliser ce type d'analyse.

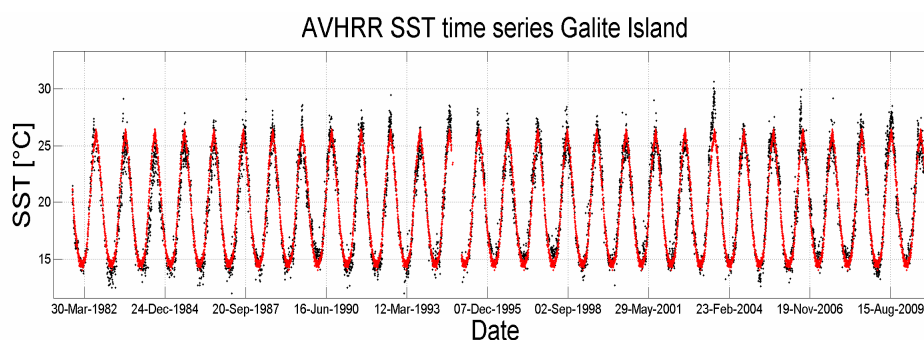


Figure 9 : Série temporelle de SST issues des mesures satellites du capteur AVHRR à 4 km de résolution spatiale sur un pixel centré sur les îles de la Galites depuis 1981.

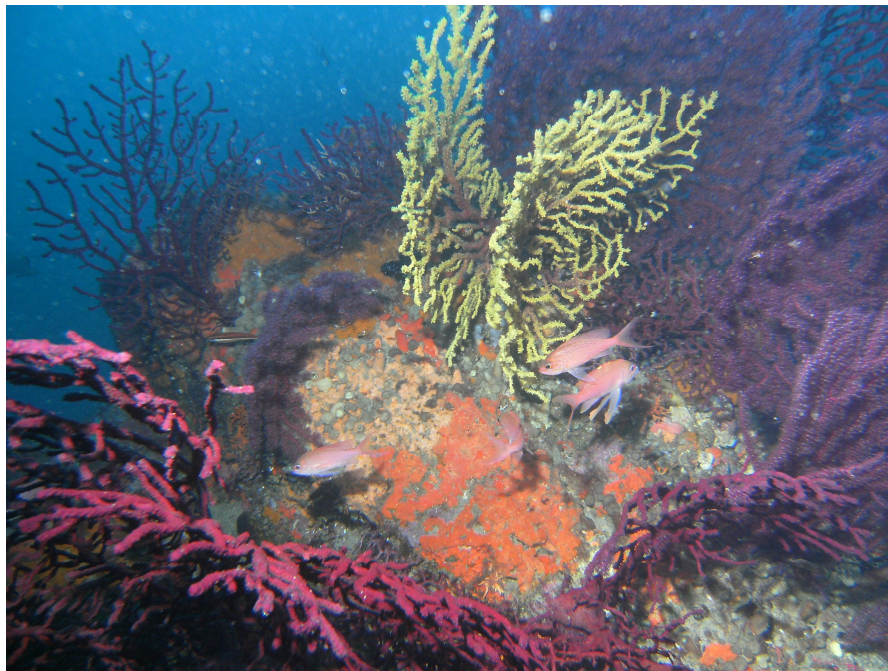
Un des axes du projet serait de réaliser des études de physique visant à caractériser le réchauffement des eaux de surface dans un premier temps en Méditerranée Occidentale et d'étudier les corrélations des événements extrêmes chauds avec la distribution des peuplements d'espèces cibles.

Pour chaque zone du sous bassin autour des îles "sentinelles" identifiées par le projet PIM, des séries temporelles de SST seront évaluées sur les 30 dernières années sur la base des données satellites. A partir de ces mesures, les cycles saisonniers moyens de la SST, les tendances multi-décennales au réchauffement ainsi que les séries temporelles d'anomalies et leurs statistiques seront déterminées.

En lien avec l'objectif visé, il sera également pertinent de suivre l'impact d'un certain nombre de pressions sur les sites retenus pour bien différencier l'impact lié au changement climatique de celui lié à certaines activités anthropiques. Ces informations acquises sur la base de protocoles reproductibles seront également d'une grande utilité pour les gestionnaires de ces îles.

L'utilisation des petites îles comme « sites sentinelles » permettra de produire des ensembles de données homogènes à long terme, pour mieux comprendre la variabilité du milieu marin face aux facteurs stressants du changement climatique.

Beaucoup d'outils, de protocoles de suivi et de technologies sont disponibles pour mesurer les paramètres physico-chimiques du milieu marin. En Méditerranée différents organismes de recherche et scientifiques mènent des programmes de recherche sur le changement global au niveau national, régional et international à différents niveaux de complexité, à différentes échelles spatiales et temporelles.



Paysage sous marin au large de Marseille. Photo E. Emery © Ifremer

Il existe également des différences marquées entre les pays des rives Nord et Sud en matière des paramètres pris en compte, de l'instrumentation, des méthodes de suivi et de l'effort de collecte de données. Les informations de suivi sur les impacts chimiques et biologiques sont moins nombreuses. Globalement, les efforts de suivi à l'échelle locale et régionale semblent fragmentés.

L'étude de l'évolution de paramètres physico-chimiques et biologiques suivis à l'aide de méthodologies simples, reproductibles et adaptées à chaque site doit permettre de mieux caractériser le phénomène, d'en évaluer l'évolution au cours des prochaines décennies. Ce sont les recommandations préconisées dans le guide publié par l'UICN et le PNUE (CAR/ASP) dédié au suivi régional du changement climatique dans les aires marines protégées de Méditerranée.

L'observatoire proposé dans cette étude reposerait sur deux outils opérationnels :

- La mise en place de sites instrumentés, en partenariat avec les gestionnaires des aires marines protégées retenues et gérés par eux dans le contexte de l'initiative PIM coordonnée par le Conservatoire du Littoral. L'instrumentation permettra un suivi à long terme et fournira des données haute fréquence en point fixe utilisables pour étudier les modifications du milieu, calibrer et valider des outils d'océanographie spatiale et de modélisation ;
- Des campagnes d'acquisition de données pour réaliser dans un premier temps un état zéro sur les sites retenus, obtenir des données d'océanographie physique pour le calage de modèles et dans un deuxième temps acquérir de la donnée à une échelle de temps plus large que ce soit pour l'évaluation des effets sur la biodiversité ou l'évaluation des pressions.

4.2. Zones d'Intérêt majeur en Méditerranée Occidentale

La Figure 9 révèle la tendance moyenne au réchauffement sur le bassin ouest depuis 1985. Les zones de réchauffement maximales sont la Mer d'Alboran, le bassin Tunisien mais également le Golf de Gène et les eaux le long de la Côtes d'Azur.

Il existe une corrélation évidente à l'oeil entre cette distribution spatiale du réchauffement et la circulation de surface moyenne montrée en Figure 3, notamment autour du gyre d'Alboran et le long du courant Nord (Liguro-Provencale) qui semblent advecter des eaux plus en réchauffement que sur le reste du bassin. La zone du front Nord-Baléares et le nord ouest de la Sicile délimitent des zones de réchauffement minimales.

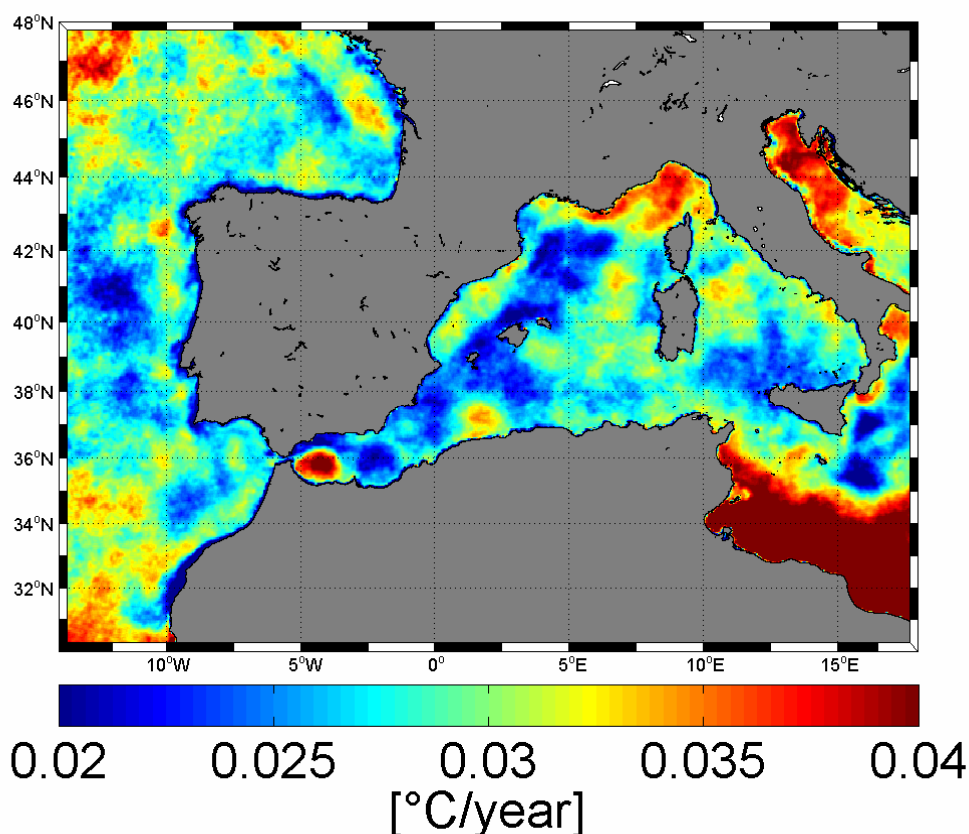


Figure 9 : Taux de réchauffement sur la partie Occidentale du bassin Méditerranéen estimé à partir des mesures satellites AVHRR depuis 1985 (travail effectué au LOS).

L'hypothèse d'un réchauffement accru par une entrée d'eau Atlantique plus chaude et son advection par la circulation de surface est donc à considérer.

Il serait donc particulièrement pertinent de se positionner à différentes îles "points clef" du schéma de circulation des eaux en "surchauffe" maximales (Alboran, Nord Tunisie, Côtes de l'Italie, Côtes d'Azur) ou minimale (Côtes d'Andalousie, Baléares),

de réaliser des campagnes de mesures verticales de la température sur ces points clefs pour corrélérer les événements de surface détectés par satellites avec l'évolution du mélange et de la thermocline, ainsi que des distributions locales des anomalies et de leur évolutions. Ces informations seront alors corrélées avec les taux de mortalités de certains organismes et la distribution de certaines populations.

Les données acquises sur les sites sélectionnés permettront de suivre également les échanges physiques, chimiques et biologiques entre les bassins Est et Ouest de la Méditerranée ainsi que les échanges avec l'Atlantique. Leur répartition permet en particulier de suivre le rythme d'expansion des espèces méridionales dans les zones septentrionales du bassin occidental et leur impact sur l'évolution des écosystèmes côtiers.

L'objectif du projet est de pouvoir observer les processus à une échelle où les outils de modélisation et d'observation spatiale permettent de détecter ou de prévoir des anomalies de température et des zones de stabilité afin d'étudier la corrélation entre les différents phénomènes.

4.3. Descripteurs pris en compte et méthodologie

4.3.1. Paramètres biologiques

Biocénoses benthiques

Sur les sites retenus, nous proposons d'engager un programme de suivi des peuplements benthiques en considérant 3 grands items :

- La sélection et le suivi d'espèces cibles susceptibles de réagir aux anomalies thermiques qui pourraient s'avérer de plus en plus fréquentes dans le cadre du changement global. Dans les zones septentrionales du bassin occidental, plusieurs espèces caractéristiques des fonds coralligènes (Spongiaires, Gorgonaires) ont connu ces dernières années des épisodes de mortalité. Parmi ces espèces, *Paramuricea clavata*, Gorgonaire largement distribuée dans le bassin occidental de la Méditerranée, a été particulièrement bien étudiée, y compris au travers d'expériences de thermotolérance en aquarium. Cette espèce mais aussi d'autres espèces benthiques sensibles présentes au niveau des îles seront suivies parallèlement à des mesures physiques de température et de salinité ;
- La surveillance des peuplements de substrat dur dans des secteurs « stratégiques » afin de suivre l'expansion des espèces méridionales et en provenance du bassin oriental, notamment des migrants lessepsiens. En effet, ces migrations constituent des sources de changements majeurs des peuplements du bassin occidental de la Méditerranée ;
- La reprise des données cartographiques benthiques acquises précédemment au niveau de certaines petites îles, afin de vérifier l'évolution des communautés benthiques entre passé et présent.

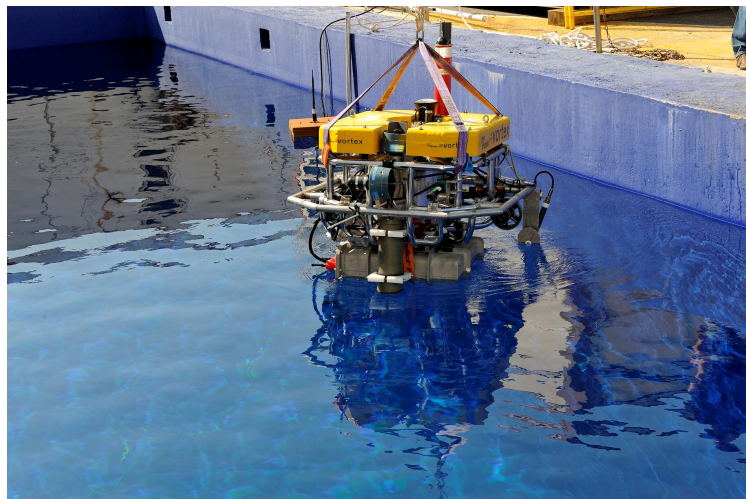


Le suivi de l'impact du changement global et des espèces invasives sur les communautés benthiques infra et circalittorales (roche infralittorale, fonds coralligènes, roches profondes) et la biodiversité associée est un travail nécessitant la mise en place de séries d'acquisition de données à long terme (sur de nombreuses années). Ce suivi permettra de faire le lien entre les données physiques et les données biologiques.

La tâche 1 sera réalisée en liaison étroite avec les gestionnaires concernées, d'une part en matière de sélection et d'observation d'espèces cibles et d'autre part en matière d'instrumentation des sites sélectionnés (capteurs de température HOBO, salinomètre).

Les partenaires seront formés (observation et photographie quadra, utilisation capteurs salinité et température), les procédures d'envoi des données seront arrêtées.

Les tâches 2 et 3 seront réalisées au cours de campagnes spécifiques en plongée et par l'utilisation d'un ROV.



Rov d'intervention Vortex. © Ifremer

Peuplements ichthyologiques

S'il existe à ce jour de nombreuses études synécologiques de l'ichtyofaune des fonds infra et circalittoraux, aucune à notre connaissance ne s'intéresse à l'évaluation et au suivi des peuplements à l'échelle de la Méditerranée et à l'influence que peuvent avoir les changements globaux sur leur structure.



Pose de systèmes vidéo rotatifs STAVIRO. © Ifremer.

Du fait de la mobilité de ses constituants, les communautés de poissons sont potentiellement fluctuantes à l'échelle de la région. Néanmoins, leur composition et leur structure sont prévisibles, déterminées en partie par le contexte environnemental soumis lui-même aux changements climatiques. Toutes les espèces ne réagissent pas de la même façon aux influences extérieures et les effets peuvent être très variables en fonction des taxa. Ainsi, l'appréciation à long terme de l'état d'un assemblage ichthyologique sur un site implique de bien définir au préalable sa composition et sa structure. La prise en compte des facteurs de variation, à court terme, périodiques ou arythmiques est nécessaire.

La méthode STAVIRO (Station Vidéo rotative) est aujourd'hui utilisée en routine en Méditerranée.

Cette méthode présente de nombreux avantages qui en font un outil particulièrement bien adapté pour répondre aux objectifs du projet PIM :

- Contrairement aux techniques basées sur des captures, cette méthode n'implique aucun prélèvement et n'affecte pas les habitats. Elle peut donc être mise en œuvre quel que soit le statut juridique de la zone étudiée ;
- Elle est peu perturbatrice. Elle limite au maximum les biais liés par exemple à la présence d'un plongeur ;
- Elle ne nécessite pas de compétence particulière pour être mise en œuvre et peut donc être facilement transférable ;
- Sa mise en œuvre sur le terrain est rapide et permet de réaliser un nombre important de stations par jour (jusqu'à 30), sur une gamme importante de profondeurs (de 2 à 35 m) ;
- Les données vidéo sont archivées et peuvent être visionnées en cas de doute ou d'analyse complémentaire ou différente ;
- Les données vidéo peuvent servir de support de communication.

Dans un contexte de changement global, le programme visera deux objectifs principaux :

- Evaluer et suivre l'évolution des peuplements ichtyologiques et de leurs habitats à l'échelle de la méditerranée en utilisant la méthode STAVIRO ;
- Suivre la dynamique de leurs migrations (Est-Ouest, Nord-Sud), en particulier l'apparition d'espèces non-indigènes.

Les expérimentations seront réalisées au cours de campagnes spécifiques à partir d'embarcations légères. Un retour sur zone sera réalisé, l'objectif étant à terme de former et d'équiper les gestionnaires à l'utilisation de cette technique et de les associer au traitement des données grâce à l'utilisation d'une interface informatique adaptée.

Phytoplancton

Plusieurs études ont montré l'impact du changement global sur la diversité taxonomique du phytoplancton et du zooplancton, avec des effets sur l'augmentation de la biodiversité mais également sur la taille moyenne des organismes.

Des études de ce premier maillon de la chaîne trophique ont également montré qu'une augmentation de la biodiversité taxonomique, souvent vue comme avantageuse au sens large du fonctionnement écosystémique, pourrait, si elle est généralisable, venir altérer temporairement certaines fonctions importantes pour l'homme, telles que la régulation du dioxyde de carbone et l'exploitation des ressources marines.

Le suivi de la diversité taxonomique de certains groupes clés de phytoplancton, les dinoflagellés et les diatomées, à une aussi large échelle spatiale, permettrait ainsi d'étudier l'empreinte d'un changement des systèmes biologiques en Méditerranée en réponse à l'augmentation des températures.

Le suivi du phytoplancton sera effectué à partir d'une logistique terre en étudiant :

- La quantification de la flore totale et notamment le rapport Diatomées / non Diatomées ;
- La concentration en chlorophylle *a* (et produits de dégradation) ;
- La composition en pigments phytoplanctoniques par HPLC.

L'objectif est double, d'une part évaluer la biomasse en phytoplancton et spatialiser cette information grâce à l'imagerie satellite, d'autre part suivre la composition et l'abondance des espèces sur les sites sélectionnés.

Un premier échantillonnage sera réalisé au cours d'une première campagne, le matériel de prélèvement de conditionnement et de prétraitement (filtration) sera mis à disposition des gestionnaires avant transmission des échantillons au LER-PAC.



Phytoplancton toxique du genre *Pseudo-nitzshia* sp. © Ifremer.

Cette première campagne sera réalisée sur un an avec un prélèvement par mois pour étudier d'éventuelles variations saisonnières de la flore et de la biomasse, en lien avec les données d'imagerie satellite disponibles.

Un suivi à plus long terme sera arrêté en fonction des résultats de cette première étude qui mettra également l'accent sur l'identification et la description d'espèces nouvelles ou migrantes (par exemple *Gambierdiscus toxicus*).

La génomique sera utilisée dans le cadre de cette approche en partenariat avec le LER de Bretagne Occidentale.

4.3.2. Paramètres physiques

L'objectif est de profiter de campagnes sur zone et des collaborations qui seraient générées pour permettre aux outils hydrodynamiques et d'observations spatiales de préciser le contexte des observations faites *in situ* et inversement d'améliorer ces outils ou de comprendre certains phénomènes grâce aux données acquises *in situ*.

Trajectoire des régimes thermiques

En Méditerranée, le réchauffement rapide des eaux de surface et côtière au cours des dernières décennies, jusqu'à 0.06°C/an, est caractérisé, au moins dans sa partie nord occidentale (MNO), par une augmentation de la fréquence des fortes anomalies positives. La température moyenne de surface pourrait augmenter de 2 à 4°C d'ici la fin du siècle mais les évolutions locales (eg. profondeur de la couche mélangée) restent une question ouverte, en particulier dans les zones côtières, du fait de l'importance des facteurs locaux (topographiques, bathymétriques et météorologiques).

Ces facteurs, à l'origine de patrons thermiques contrastés aux différentes échelles d'espace, sont de nature à moduler les réponses locales au changement climatique comme montré en Méditerranée Nord Occidentale. Le manque d'information sur les régimes thermiques côtiers et leur évolution récente constituent une lacune importante pour l'étude des interactions biotiques comme pour la définition de scénarios de réchauffement ajustés aux zones côtières.

L'utilisation des données satellites (température, couleur, vent et courant haute résolution) combinée avec des observations in situ dédiées sur les îles sélectionnées permettra de monitorer les effets locaux du changement climatique à des échelles spatiales et temporelles adaptées (réseau de stations côtières, haute résolution, pluriannuel) pour construire des lignes de base solides sur les indicateurs physiques et biologiques de ces changements, en étudier les évolutions et les corrélations.

L'idée sera de mettre notamment en place un réseau côtier de suivis climatiques pour l'acquisition de profils thermiques verticaux à haute résolution (5:5:40 m, pas de temps horaire) à certains points clefs le long du littoral des îles. Nous constituerons et analyserons également un corpus de données côtières provenant des services d'océanographie opérationnelle et d'observations satellites.

Il s'agira de :

- Caractériser les régimes thermiques côtiers : analyse orientée écosystèmes pour caractériser les conditions auxquelles les peuplements benthiques se sont adaptés, quantifier les gradients et détecter les anomalies ;
- Etudier les processus côtiers : analyse physique pour étudier comment et à quelles échelles les processus hydrodynamiques locaux induits par le vent vont influencer la dynamique de la couche mélangée et moduler localement les effets potentiels du changement climatique ;
- Produire des synthèses à l'échelle de la façade. (i) Climatologie et réchauffement des eaux de surface depuis 1980 par réanalyse des données SST : caractérisation des tendances et des changements de régime (moyenne et variance) dans l'espace et le temps. (ii) Vents moyens et extrêmes sur la dernière décennie ;
- Conduire une analyse comparative à l'échelle régionale à travers l'intégration des séries climatiques acquises dans le réseau Méditerranéen de suivis des températures côtières T-MEDNet. (www.t-mednet.org/observation-system).





Mise en œuvre d'un AUV. © Ifremer

Connaissance de l'hydrodynamique le long d'un transect Sud-Nord et autour des petites îles

Si il est possible d'envisager, dans le cadre de ce programme, la mise en œuvre de campagnes océanographiques communes, les données de température, salinité et courants acquises à l'aide d'instruments classique de type CTD et courantomètres Doppler pourront être complétées par l'acquisition de paramètres hydrologiques le long de la route du bateau à l'aide d'un MVP (Moving Vessel Profiler) afin de préciser la nature des masses d'eau rencontrées ainsi que leur circulation au niveau des zones clefs du point de vue de la circulation des masses d'eau.

Dans le cadre d'une stratégie à long terme, ces radiales pourraient être ré-échantillonnées régulièrement dans le futur afin de suivre l'impact du changement global sur les masses d'eau dans une zone située entre le bassin occidental et le bassin oriental. Les données permettront notamment de compléter les données satellites de la température de surface.

Modélisation hydrodynamique

La stratégie de modélisation autour de ce programme est prévue en deux temps.

Les résultats des modèles hydrodynamiques disponibles sur la zone dans le cadre de MyOcean seront analysés afin de guider la stratégie d'échantillonnage au large des îles et en zone côtière, en complément des produits satellites de température de surface. Si il est possible de disposer de simulations couplées océan-atmosphère pour le scénario climatique IPCC-A2 par exemple, nous pourrons également extraire les points autour des îles et tracer les prévisions de réchauffement pour affiner les zones à échantillonner dans le cadre d'une stratégie à long terme.

Dans un second temps et s'il est possible de disposer de données de campagnes océanographiques, il sera possible de préciser si les modèles décrivent bien la structure hydrologique rencontrée durant la période et peuvent être utilisés pour fournir les conditions environnementales entourant les points d'observation des autres compartiments.

Enfin, les modèles hydrodynamiques de la Méditerranée Nord-Occidentale reproduisent parfois mal la position du Courant Nord et il reste une incertitude sur la validité du forçage aux frontières par les modèles amont qui couvrent tout le bassin. Les mesures hydrologiques acquises dans le cadre de ce programme pourraient donc avoir une utilisation plus large pour appréhender la qualité des modèles forçant les configurations de plus petite emprise.

Instrumentation prévue :

- Profils hydrologiques, turbidité et fluorimétrie en stations : CTD SBE 19+V2 + turbidimètre OBS et fluorimètre WETLabs ;
- Profils hydrologiques réalisés en route : MVP disposé sur le côté du bateau pour effectuer un échantillonnage resserré des masses d'eau durant les trajets sur les 300 premiers mètres de la colonne d'eau à l'aide d'une micro-CTD (instrument déjà utilisé dans le cadre de la campagne IMEDIA en 2012 ;
- Profils de courant : ADCP 300kHz tracté par poisson ou ADCP de coque si disponible.

4.3.3. Suivi des pressions anthropiques

Ce volet est plus particulièrement réalisé à la demande des gestionnaires des AMP visées, l'objectif étant de caractériser si les pressions anthropiques exercées au niveau continental ont un impact à l'échelle de ces îles.

Contaminants chimiques

Le réseau RINBIO, développé depuis 1996 en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, est devenu un outil opérationnel d'évaluation de la qualité chimique des masses d'eau à l'échelle de la méditerranée française, en se basant sur les capacités bioaccumulatrices de la moule *Mytilus galloprovincialis*, exploitées selon un protocole standardisé de caging. Sur la base de l'expérience acquise dans le cadre du RINBIO, les programmes INTERREG III B / MEDOCC Mytilos à l'échelle de la Méditerranée Occidentale (2004-2006) et Mytimed (2007-2008) en Méditerranée Orientale lancés par le LER-PAC ont permis de réaliser le premier bilan de la contamination chimique des eaux côtières à l'échelle de la Méditerranée occidentale (côtes continentales européennes, Maghreb, Baléares, Sicile, Sardaigne, Corse) et d'une partie de l'Est du bassin (sud de l'Italie et Sicile, Grèce). De 2004 à 2007, 174 stations de moules ont été installées sur les côtes méditerranéennes et récupérées 3 mois plus tard sur la base d'une méthodologie standardisée.

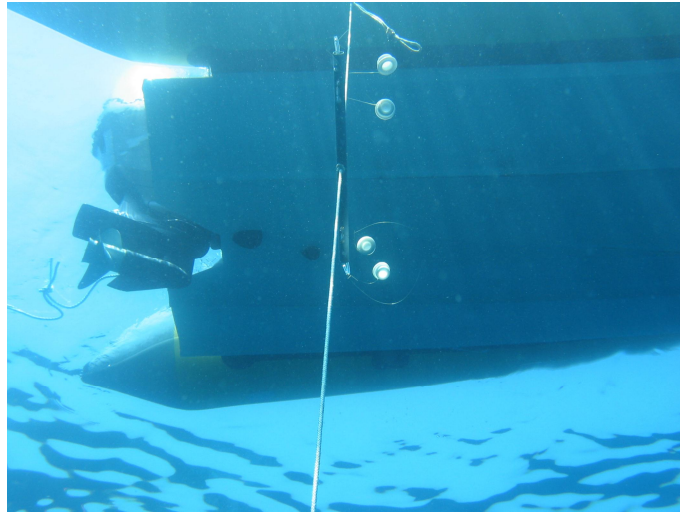
Au delà de ce programme de surveillance régional, le traitement des nombreuses données acquises a permis d'identifier plusieurs pistes de travail à explorer pour améliorer la méthode et optimiser la significativité des résultats, notamment la mise en œuvre d'une méthode d'ajustement des résultats permettant de comparer les différents sites indépendamment de la croissance des coquillages. A partir d'un lot calibré, la mesure de la concentration en divers contaminants dans la chair des moules est en effet perturbée par l'hétérogénéité trophique des secteurs étudiés. Pour corriger cette erreur, un modèle d'ajustement linéaire des données par contaminant et par campagne à partir de l'indice de condition des individus a été développé.

Ce modèle a été amélioré au fil des campagnes et permet désormais de traiter pour plusieurs familles de contaminant l'évolution dans le temps des concentrations à une station donnée. D'autre part, ce modèle permet de calculer la concentration dans l'eau à partir de la concentration dans les moules avec une estimation de l'incertitude. La validation (calibrage du capteur moule) n'a été réalisée que sur les côtes françaises.

L'intérêt de ce programme est triple :

- Permettre sur des sites expérimentés au cours des expérimentations Mytilos / Mytimed de réaliser des mesures dans l'eau à l'aide d'échantillonneurs passifs, notamment pour les métaux, pour regarder si le retour aux concentrations dans l'eau avec le modèle mis au point est robuste et peut donc être appliqué à une échelle plus large ;
- Identifier en fonction de la situation des îles, si elles peuvent être soumises à des apports de contaminant liés à des sources continentales, ou si elles peuvent elles même générer des apports en contaminants susceptibles d'avoir un impact sur le milieu . Les sources seront identifiées par la technique des échantillonneurs passifs, les effets par des bioessais de toxicité (inhibition développement larvaire) sur des sédiments (cf écotoxicologie) ;
- Déterminer s'il existe des spécificités à l'échelle de certaines îles ou de certaines sous unités du bassin (bruit de fond géologique, volcanisme) qui permettent de les différencier en matière de contamination chimique.





Mise en òuvre de DGT pour le suivi des métaux dissous dans la colonne d'eau. © Ifremer

Ecotoxicologie

L'étude de la toxicité d'un échantillon sédimentaire provenant du milieu naturel repose sur la présence dans le sédiment d'une ou de plusieurs substances potentiellement toxiques pouvant provoquer un effet biologique négatif sur la biocénose environnante. La caractérisation chimique détermine la nature (et la quantité) de tel ou tel contaminant, alors que la caractérisation écotoxicologique vise à déterminer l'effet biologique de l'échantillon sur une espèce de référence caractéristique du milieu étudié, en s'affranchissant des paramètres de contamination. La première approche mesure un niveau, la deuxième un impact. Ces deux approches sont complémentaires. Les larves et embryons de bivalves sont parmi les organismes cibles les plus employés pour les tests écotoxicologiques en raison de leur forte sensibilité aux contaminants.

Les travaux réalisés depuis 2004 à l'échelle de tout le bassin (campagnes DCE, Mytilos, Mytimedí) ont montré que les sédiments des lagunes littorales ainsi que certaines zones marines (rade de Marseille) pouvaient présenter des toxicités significatives.

L'objectif est donc de mettre en òuvre cette approche écotoxicologique sur chaque secteur pour éventuellement identifier des sources de perturbation, à travers une méthode d'analyse globale non spécifique vis à vis des micropolluants : prise en compte de l'effet global des contaminants présents, des interactions entre composés, de leurs biodisponibilités, sans considérer leur nature et leurs concentrations.

Outre ce premier bilan écotoxicologique pour les secteurs concernés, les données acquises viendront compléter la première base de donnée élaborée à l'échelle de toute la Méditerranée reposant sur la même méthode.

Déchets

En Méditerranée, mer fermée, les macro et micro déchets sont en quantités considérables avec des concentrations les plus importantes jamais trouvées pour les macro déchets sur les fonds et pour les micro plastiques en surface. Les travaux en cours montrent une colonisation du pelagos par des espèces normalement benthiques (LER-PAC et Université d'Angers) et le transport possible de pathogènes de poissons.

L'identification des sources, des modes de transports, de l'impact sur la diversité des espèces et notamment la biodiversité des espèces fixées sont des questions de fond. Sur un plan plus appliqué, les risques sanitaires associés (transport de pathogènes pour les espèces marines), détermination des zones d'accumulation, transport transfrontalier, impact sur le tourisme et surveillance sont autant de sujets conséquents.

La mise en évidence de l'augmentation des produits de dégradation des déchets au cours du temps en 2004 (microparticules ou microplastiques), l'identification de risques toxicologiques liés aux additifs et liants de certaines matières plastiques (Bisphenol A , phtalates), la mise en évidence de l'absorption de polluants sur les déchets en mer, la description d'impacts sur la macro faune et depuis peu sur le plancton (ingestion, occlusions intestinales, enchevêtrements), le transport des espèces invasives et la mise en évidence d'impacts sur la pêche et la navigation ont conduit les gestionnaires puis les politiques à considérer le problème.



© Ifremer/F. Galgani, JH. Hecq.
Microplastiques de surface (Méditerranée Nord Occidentale)

L'objectif visé dans le cadre de ce programme est de profiter des campagnes et de la plateforme expérimentale des navires pour échantillonner les eaux de surface selon la technique recommandée par le groupe national d'experts placé auprès du Ministère de l'Écologie pour la mise en œuvre de la DCSMM pour les microplastiques.

Cette méthode a déjà été utilisée à l'échelle de la façade méditerranéenne française dans le cadre de la campagne DCE 2012 sur une trentaine de masses d'eau.

Le filet Manta serait utilisé sur les zones de transit et à proximité des îles, tout en visant des secteurs représentatifs de pression anthropiques (embouchures de rivières côtières, agglomération, chenaux de navigation). La méthode est la même que celle utilisée lors de précédentes campagnes (filage au ralenti de 250 m sur câble océano ou hydro, vitesse constante 1.5 noeud, 20 minutes) permettant un échantillon composite correspondant à une surface d'environ 1000 m².

Les échantillons de microplastiques récupérés au cours de chaque leg seront conservés après comptage et pesés pour identifier la présence potentielle d'agents pathogènes ou d'espèces benthiques.

4.4. Bancarisation des données

La question de la bancarisation des données est extrêmement importante dans la mesure où les questions posées par le sujet du changement global sont variées et impliquent à la fois de disposer de données à un instant précis mais également de disposer de séries temporelles.

D'autre part pour les partenaires du projet il est essentiel de pouvoir saisir directement un certain nombre de données et de pouvoir les valider pour assurer la pérennité de l'utilisation de ces données dans un contexte de gestion locale et dans le contexte de l'utilisation de séries temporelles.

Depuis près de 40 ans, pour gérer les données de la surveillance du littoral, Ifremer a développé le système d'information Quadrige, qui associe à une base de données une panoplie d'outils d'interprétation et d'élaboration de produits d'information.

La base Quadrige contient des résultats sur la plupart des paramètres physiques, chimiques et biologiques de description de l'environnement. Les premières données datent de 1974 pour les paramètres de la qualité générale des eaux et les contaminants, 1987 pour le phytoplancton et les phycotoxines, 1989 pour la microbiologie. Elles sont mises à jour en permanence, leur nombre a dépassé les 6 millions à ce jour.

Le système est aujourd'hui opérationnel pour la majeure partie des données de qualité en lien avec la Directive Cadre Eau.

Le système permet de stocker des données biologiques, des données géologiques, des données hydrologiques et biochimiques, des couches cartographiques, des photographies et des vidéos.

Il permet par ailleurs de respecter la confidentialité des données par les producteurs de données partenaires qui peuvent saisir directement leurs données.

Bien évidemment toutes les stratégies relatives au programme décrit ci dessus ne sont pas encore opérationnelles, notamment en ce qui concerne les biocénoses de substrat dur, l'écotoxicité.

Par contre, en ce qui concerne les descripteurs physiques, le phytoplancton, les contaminants chimiques, les microparticules, les stratégies existent ou sont en cours de finalisation (microparticules) et la base de donnée peut être rapidement opérationnelle pour accueillir les données du programme.

En ce qui concerne le poisson, plusieurs bases de données existent également à Ifremer notamment le SIH au niveau national et la base BIGMER gérée au LERPAC pour stocker les données liées à l'observation des populations côtières de poisson. Les travaux sont en cours pour mutualiser l'ensemble des données dans Quadriga également.

Il en est de même pour les cartographies de biocénose avec la base MEDBENTH hébergée dans SEXTAN mais qui très prochainement migrera dans Quadriga.

En ce qui concerne les biocénoses de substrat dur, si le stockage des cartes, photographies et vidéo ne pose pas de problème dans Quadriga, le stockage de données biocénotiques n'est pas à ce stade opérationnel, hormis pour la Posidonie dans le cadre de la DCE et le benthos de substrat meuble. Cependant dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE dans les DOM les stratégies en lien avec les écosystèmes coralliens et la saisie des données sont opérationnelles avec le soutien du MNHN. Un développement spécifique au coralligène pourrait être très rapidement initié.

La plate forme METRIX, opérée par Andromède Océanologie, est opérationnelle en Méditerranée et administre les données du réseau RECOR. Elle pourrait être également utilisée à court terme dans cet objectif.

Les données d'océanographie physique seront stockées dans la base MEDSPIRATION et au CERSAT.



5. Développements méthodologiques

Le « Global Change » englobe l'ensemble des grands changements environnementaux observés ces dernières décennies.

En lien avec ce projet et le suivi de l'impact du réchauffement sur les espèces et leur distribution, il semble nécessaire de mieux connaître la dynamique des anomalies chaudes pour évaluer la spatialisation de tels événements extrêmes, leurs variabilités saisonnières et interannuelles ainsi que leurs liens avec les schémas de circulations de surface en mer Méditerranée Occidentale et les forçages atmosphériques (corrélations avec les vents de surface, coup de Mistral, Tramontagne, etc.).

Par leur continuité spatiales et les longues séries temporelles maintenant disponibles, les données satellites permettent d'estimer les anomalies thermiques sur l'ensemble du bassin Méditerranéen et de comprendre leurs dépendances avec d'autres processus physiques (advection par les courants de surface, modulations par le mélange induits par les coups de vents,..).

Si les relations entre les taux de mortalités et la température de l'eau est évidente, d'autres facteurs, comme les contraintes énergétiques associées à une stratification prolongée de la colonne d'eau en été et la présence de pathogènes jouent également un rôle sur l'impact du changement climatique et devraient être pris en compte dans des programmes de recherche dédiés.

Outre l'impact de l'augmentation de la température des océans sur le taux de survie de certaines espèces et leur distribution géographique, le « Global Change » génère un certain nombre de modifications, notamment celles concernant le processus d'acidification des eaux marines directement corrélé à l'augmentation de la pression partielle de CO₂ atmosphérique d'origine anthropique.

Cette acidification des océans a des conséquences sur les organismes planctoniques et benthiques calcifiés, avec d'une manière générale, un impact fort sur la production des squelettes externes carbonatés.

Cependant, des études menées plus récemment sur des organismes des mers tempérées (Corallinacées, mollusques) montrent des réactions différentes selon les taxons considérés, induisant le besoin d'études complémentaires afin de mieux comprendre l'évolution des systèmes biologiques carbonatés dans le cadre de ce contexte d'acidification.

Le programme « PIM sentinelle » pourrait constituer, tout au moins au niveau de certaines îles, une bonne opportunité pour poursuivre ces travaux.



6. Conclusion

La Méditerranée constitue un des pôles mondiaux de biodiversité et un lieu clé des changements climatiques globaux dont les conséquences (augmentation de la température, acidification, élévation du niveau de la mer) combinés aux pressions exercées par les différentes activités anthropiques (pêche, tourisme, rejets domestiques et industriels, déchets) impactent et impacteront de plus en plus, tant le secteur économique que les écosystèmes et leur biodiversité.

Le réseau des Petites Iles de Méditerranée se caractérise par des environnements relativement peu perturbés, dans lesquels de nombreux écosystèmes méditerranéens sont représentés. Il constitue à ce titre un observatoire idéal pour mieux comprendre la manière dont le milieu marin côtier réagit face aux facteurs stressants du changement climatique, tout en évaluant la part prise par les pressions exercées par différentes activités humaines.

Beaucoup d'outils, de protocoles de suivi et de technologies sont disponibles pour mesurer les paramètres physico-chimiques du milieu marin. En Méditerranée différents organismes de recherche et scientifiques mènent des programmes de recherche sur le changement global au niveau national, régional et international à différents niveaux de complexité, à différentes échelles spatiales et temporelles.

Ce qui est particulièrement frappant c'est que peu de programmes capitalisent sur des mêmes sites des informations sur les conditions marines et côtières (physique et biogéochimie) et les changements observés au sein de la biodiversité.

Sur la base de protocoles standardisés, reproductibles et facilement transférables, de matériel étalonné, le programme d'observation proposé permettrait d'obtenir :

- Des séries d'enregistrement de température et autres paramètres physicochimiques en relation avec le changement global dans l'ensemble du bassin occidental, dans un premier temps et notamment dans sa partie Sud ;
- Grâce à ces jeux de données, de contribuer au développement et à la validation des modèles de prédiction du réchauffement des eaux de la Méditerranée et de modification de la circulation générale et d'étudier à des échelles plus locales ces phénomènes selon les différents scénarios climatiques, en partenariat avec les spécialistes du sujet ;
- Coupler ces informations à des observations du compartiment biologique, notamment le benthos de substrat dur, les populations de poissons et de phytoplancton.

Ces informations seraient mises en réseau, grâce à la mise en œuvre d'une architecture de base de données inter-opérables permettant ainsi de disposer d'informations sur les aires de répartition des espèces, la distribution des espèces sensibles aux changements climatiques, l'apparition de nouvelles espèces, les proliférations et les phénomènes de mortalité.



Ces données couplées à la physique permettraient ainsi de développer des modèles de répartition des espèces et de leur connectivité, ainsi que des modèles de prédiction des risques d'extinction en Méditerranée.

Au delà de cette proposition, les sites ateliers retenus devraient s'ouvrir à la mise en œuvre d'indicateurs supplémentaires et fédérer la communauté scientifique pour fournir le socle à la mise en œuvre de programmes de recherche.

Les questions traitées relèveraient notamment de la réponse adaptative mise en œuvre par les organismes et les populations des milieux littoraux devant faire face à des perturbations de grande ampleur telles que les changements climatiques et une pression croissante des activités humaines et des invasions biologiques.



Bibliographie

Andral B., F. Galgani., C. Tomasino., C. Blottiere., A. Scarpato., J. Benedicto., S. Deudero., A. Cento., M. Calvo., S. Benbrahim., M. Boulmahdid and C. Sammari., 2010. Chemical contamination baseline in the Western basin of Mediterranean Sea based on transplanted mussels: the MYTILOS project. *Arch Environ Contam Toxicol*. DOI 10.1007/s00244-010-9599.

Andral B., Stanisiere J. Y., Sauzade D., Damier E., Thebault H., Galgani F., Boissery P. 2004. Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging. *Mar. Pollut. Bull.* 49 : 704 ó 712.

Astraldi, M., C. N. Bianchi, G. P. Gasparini & C. Morri, 1995. Climatic fluctuations, current variability and marine species distribution: a case study in the Ligurian Sea (north-west Mediterranean). *Oceanologica Acta*, 18(2): 139ó149.

Barile J., Saiz-Salinas J.I., San Vicente C., Somot S., Templado J., Turon X., Vafidis D., Villanueva R., Voultziadou E., 2010. The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, patterns, and Threats. *Plos One*, 5:1-36.

Belkin M. 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Progr Oceanogr* 81:207-213.

Bensoussan N., Romano JC. et al. 2009. Warming trends, regional fingerprints and future trajectories of NW Mediterranean coastal waters. Proc. 1st Symposium of the Coralligenous of the Mediterranean Sea. UNEP RACSPA. pp 167-168.

Bensoussan N., Harmelin JG. et al. 2010. High resolution characterization of Northwest Mediterranean coastal waters thermal regimes: to better understand responses of benthic communities to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87,431-441.

Bianchi, C. N., 1997. Climate change and biological response in the marine benthos. *Proceedings of the Italian Association for Oceanology and Limnology*, 12(1): 3ó 20.

Basso D., Granier B., 2012. Calcareous algae in changing environments. *Geodiversitas*, 34(1): 5-11.

Bianchi C.N., 2007. Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea. *Hydrobiologia*, 580: 7-21.

Bianchi C.N., Morri C., 2000. Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, problems and prospects for future research. *Mar. Pollut. Bull.* 40: 367ó 376.



Bianchi, C. N., Morri C., 2004. Climate change and biological response in Mediterranean Sea ecosystems ó a need for broad-scale and long-term research. *Ocean Challenge*, 13(2) : 32636.

Boudouresque C.F., Harmelin J.G., Jeudy de Grissac A., 1986. Le benthos marin de l'île de Zembra (Parc National, Tunisie). GIS Posidonie Publ, Marseille, France: 1-199.

CIESM 2008. Climate warming and related changes in Mediterranean marine biota. N° 35 in CIESM Workshop Monographs (F. Briand, Ed), 152 p, Monaco.

Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., Kaschner K., Ben Rais Lasram F., Aguzzi J., Ballesteros E., Bianchi C.N., Corbera J., Dailianis T., Danovaro R., Estrada M., Frogliani C., Galil B.S., Gasol J.M., Gertwagen R., Gil J., Guilhaumon F., Kesner-Reyes K., Kitsos M.S., Koukouras A., Lampadariou A., Laxamana E., López-Fé de la Cuadra C.M., Lotze H.K., Martin D., Mouillot D., Oro D., Raicevich S., Rius-Harmelin J.G., (1987), « Structure and variability of the Ichtyo-fauna in a Mediterranean Protected Rocky Area (National Park of Port Cros, France) » *Marine Ecology*, 8 (3): 263-284.

Galgani F, Chiffolleau JF, Orsoni V, Costantini L, Boissery P, Calendini, Andral B. (2006) Chemical contamination and toxicity of sediments from coastal areas of Corsica islands, chemistry and ecology , Volume 22(4), 299 ó 312.

Garrabou J., Pérez T., Chevaldonné P., Bensoussan N., Torrents O., Lejeusne C., Romano J.C., Vacelet J., Boury-Esnault N., Harmelin-Vivien M., Verlaque M., Boudouresque C.F., Zibrowius H., Harmelin J.G., 2003 - Is the global change a real threat for the conservation of the NW Mediterranean marine biodiversity? *Geophysical Research Abstracts* 5 : 10522.

Garrabou J., Pérez T., Sartoretto S., Harmelin J.G., 2001 - Mass mortality event in red coral (*Corallium rubrum*, Cnidaria, Anthozoa, Octocorallia) population in the Provence region (France, NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series* 217: 263-272.

Garrabou J, Coma R, Bensoussan N, Bally M, Chevaldonne P, et al. (2009) Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Glob Change Biol* 15: 109061103.

His E, Beiras R, Seaman M (1999) The Assessment of Marine Pollution ó Bioassays with Bivalve Embryos and Larvae. *Advances in Marine Biology*, volume 37, 1-178. Academic Press, London, 178 p.

Hughes L., 2000 - Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology and Evolution* 15: 56-61.

Hooijdonk R., Maynard J.A. et al. 2013. Temporary refugia for coral reefs in a warming world. *nature climate change*. DOI: 10.1038/NCLIMATE1829, IPCC 2007/ Fourth Assesment Report.



Kersting DK, Bensoussan N, Linares C (2013) Long-Term Responses of the Endemic Reef-Builder *Cladocora caespitosa* to Mediterranean Warming. *PLoS ONE* 8(8): e70820. doi:10.1371/journal.pone.0070820.

Millot, C., Taupier-Letage, I 2005. Circulation in the Mediterranean sea. *Hdb Env Chem*, Vol. 5, Part K, 29-66.

Millot, C. 1999. Circulation in the Western Mediterranean sea. *Journal of Marine System*, 20, n°1-4, 423 - 442.

Millot Claude and Isabelle Taupier-Letage, 2005. Circulation in the Mediterranean Sea, *The Handbook of Environmental Chemistry, Volume K*, May 2005, Pages 29 - 66 DOI: 10.1007/b107143.

Otero, M., Garrabou, J., Vargas, M. 2013. Les AMP méditerranéennes et le changement climatique : guide dédié au suivi regional et aux opportunités d'adaptation. Malaga, Spain : UICN. 52 pages.

Pairaud I.L., N. Bensoussan, P. Garreau, V. Faure, J. Garrabou (2013). Impacts of climate change on coastal benthic ecosystems: assessing potential risk of mortality outbreaks under thermal stress in the NW Mediterranean coastal areas. *Ocean Dynamics*. DOI:10.1007/s10236-013-0661-x.

Pelletier D., Leleu K., Mallet D., Mou-Tham G., Hervé G., Boureau M., Guilpart N., (2012), « Remote High Definition Rotating Video enables fast spatial survey of marine underwater macrofauna and habitats », *PLoS ONE*, **7**, e30536.

Pelletier D., Leleu K., Mou-Tham G., Chabanet P., Guillemot N., (2011), « Monitoring coral reef fish assemblages in MPAs using high definition video techniques », *Fisheries Research*, **107** : 84-93.

Pelletier D., Leleu K., (2008), « Utilisation de techniques vidéo pour l'observation et le suivi des ressources et des écosystèmes récifo-lagonaires », Rapport projet Zoneco.

PNUE - PAM- CAR/ASP, 2008. Impact des changements climatiques sur la biodiversité en mer Méditerranée. Perez T.eds., CAR/ASP publ., Tunis.

PNUE-PAM- Plan Bleu, 2008. Changement Climatique et Energie en Méditerranée.

Richard A. Kerr, « A North Atlantic Climate Pacemaker for the Centuries », *Science*, n° 288, 2000, p. 1984-1985 ([DOI 10.1126/science.288.5473.1984](https://doi.org/10.1126/science.288.5473.1984)).

Skirris N., Sofianos S., et al. 2012. Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics* 62:13-30. DOI 10.1007/s10236-011-0493-5.



Somot S. Devault F., et al. 2008. 21st century climate change scenario for the mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate change model. *Global and planetary Change*.

Taupier-Letage, I. 2008. On the use of thermal infrared images for circulation studies: applications to the eastern Mediterranean basin. In 'Remote Sensing of the European Seas', V. Barale and M. Gade Eds., 153-164. - Springer Verlag.

Vargas-Yanez M., Garcia MJ. et al. 2008. Warming trends and decadal variability in the Western Mediterranean shelf. *Glob. planet. Change* 63:177-184.

