

les dossiers
d'AGROPOLIS
INTERNATIONAL

*Compétences de la communauté scientifique
en région Occitanie*



Sciences marines et littorales en Occitanie

AGROPOLIS INTERNATIONAL

agriculture • alimentation • biodiversité • environnement

Implanté en Occitanie, Agropolis International réunit un ensemble exceptionnel d'organismes et d'institutions impliqués dans les sciences vertes.

Fondée par les établissements régionaux de recherche et d'enseignement supérieur, avec le soutien de l'État et des collectivités territoriales, l'association Agropolis International est, depuis son origine, un espace de travail dédié au collectif.

Ainsi, Agropolis International met en lien les différents acteurs investis dans les domaines de l'Agriculture, l'Alimentation, l'Environnement et la Biodiversité :

- Les institutions de la communauté scientifique régionale
- Les organismes de recherche étrangers et internationaux
- Les collectivités territoriales
- Des acteurs du transfert, de l'innovation, du développement économique
- Des structures de la société civile

En rassemblant un aussi grand nombre d'institutions et en s'appuyant sur une communauté scientifique d'une telle importance, **Agropolis International est devenu le premier pôle de France en agro-environnement, orienté vers les problématiques de la Méditerranée et les pays du Sud.**

Espace d'échanges et de dialogues, de formation et de capitalisation des savoirs, laboratoire d'idées, structure d'appui aux projets collectifs et de promotion à l'international, lieu d'accueil de structures et d'événements... Agropolis International décline et adapte son savoir-faire acquis depuis plus de 30 ans, dans les grandes missions que lui confient ses membres.

La communauté scientifique Agropolis International est structurée en grands domaines thématiques correspondant aux grands enjeux scientifiques, technologiques et économiques du développement.

Les thématiques de recherche et d'enseignement de la communauté d'Agropolis International :

- Agronomie, plantes cultivées et systèmes de cultures, agro-écosystèmes
- Alimentation, nutrition, santé
- Biodiversité et écosystèmes aquatiques
- Biodiversité et écosystèmes terrestres
- Eau, ressources et gestion
- Économie, sociétés et développement durable
- Écotecnologies
- Interaction hôte-parasites et maladies infectieuses
- Modélisations, information géographique, biostatistiques
- Production et santé animales
- Ressources génétiques et biologie intégrative des plantes
- Une filière emblématique : la vigne et le vin

Quelques chiffres de la communauté scientifique Occitanie Est :

- 27 institutions d'enseignement supérieur et de recherche
- 35 infrastructures de recherche ouvertes interinstitutionnelles et interdisciplinaires
- 150 parcours de formation
- 2 700 chercheurs et enseignants répartis dans 74 unités de recherche
- 300 chercheurs expatriés dans 50 pays
- 5 000 étudiants français et internationaux
- 1 000 chercheurs internationaux accueillis

Photos de couverture :

© D. Diaz, © P. Got/MARBEC, © S. Ruitton, © I. Cheret, © Quadran Énergies Marines, © BRL/GL, © Shom, © CNRM, © LEGOS/CLS

Préface

Le littoral de la région Occitanie constitue un atout formidable d'attractivité et de développement du territoire. Avec 215 kilomètres de rivages, 40 000 hectares de lagunes, 1,3 millions d'habitants permanents, 8 millions de touristes par an, 20 stations balnéaires, 35 ports de plaisance, 3 ports de commerce, 4 700 km² d'aires marines protégées dont un parc naturel marin de 4 000 km², **la façade méditerranéenne d'Occitanie offre un horizon pour l'économie bleue.**

Le Parlement de la Mer et le Plan Littoral 21 signé avec l'État et la Caisse des Dépôts en 2017, sont les outils mis en place par la Région pour concilier dynamisme économique, littoral et maritime, emploi et innovation, avec préservation de l'environnement. Aussi, les biotechnologies bleues, l'aquaculture et les énergies marines renouvelables, sont autant d'atouts que la Région souhaite développer dans les années à venir tout en préservant à la fois les activités traditionnelles – que sont la pêche et la conchyliculture – et la biodiversité. En effet, la valorisation des ressources littorales et maritimes ne doit pas se faire au détriment de l'attractivité du littoral, de son identité et de la qualité de vie des habitants.

Aujourd'hui, ce territoire doit relever de nombreux défis, en premier lieu desquels figure le réchauffement climatique. La compréhension des phénomènes, l'anticipation des modifications écologiques, biologique et physiques, des risques naturels, sont primordiales pour le développement futur.

Aussi, pour y parvenir et aider ce territoire à s'adapter, à se transformer pour et avec ses habitants et les usagers de la mer, et réussir cette transition écologique et économique bleue, la Région peut s'appuyer sur un vivier de compétences scientifiques et technologiques riche et dynamique (universités, établissements de recherche, pôles de compétitivité, écoles d'ingénieur, agence de développement) ; ce dossier d'Agropolis International en est la parfaite illustration.

Carole Delga,
Présidente de la Région
Occitanie / Pyrénées-Méditerranée

Éditorial

Plus de 150 équipes de scientifiques et d'experts de la région Occitanie participent au 24^e numéro de la série des *dossiers d'Agropolis International* consacré aux sciences marines et littorales en Méditerranée. Ces équipes sont issues de 15 universités et écoles d'ingénieurs, 13 organismes nationaux de recherche, mais issues aussi – et c'est une première pour cette série – d'entreprises privées – à savoir des *start-up*, des bureaux d'étude, des sociétés nationales, voire internationales, ayant une implantation en Occitanie – ou encore d'organisations de la société civile. Aussi, sans être exhaustif, ce dossier reflète la diversité, le dynamisme, l'originalité et la pluridisciplinarité de la recherche scientifique, technologique appliquée et citoyenne du domaine en Occitanie, mais aussi aux niveaux national et international.

La région Occitanie – avec sa façade maritime conséquente, ses étangs et ses lagunes, ses ports de commerce et de plaisance, ses millions de touristes qui la visitent tous les ans – concentre une diversité d'enjeux majeurs, à la fois économiques, sociaux et environnementaux, qu'il s'agisse du changement climatique, de la biodiversité, de la gestion des ressources vivantes ou de la transition énergétique. Aussi, l'ambition de ce dossier est de présenter les acteurs régionaux qui, au travers de leurs activités, œuvrent à fournir des clés de compréhension et des pistes de réponse aux questions qui se posent quotidiennement aux gestionnaires de ce vaste domaine littoral et maritime, selon six

grands champs thématiques : Forçages naturels et anthropiques sur la dynamique de la Méditerranée ; Biodiversité et dynamique des communautés biologiques en milieu marin ; Preuves scientifiques de la vulnérabilité de l'océan ; Fondamentaux d'un développement durable du « Système Mer » ; Force de l'observation pérenne, la synergie de l'intégration numérique ; Médiations innovantes et sciences participatives.

De nombreuses formations en lien avec la thématique « Mer et Littoral », diplômantes (de bac+2 à bac+8) ou non, sont dispensées en Occitanie. La liste de ces formations est disponible sur le site d'Agropolis International (www.agropolis.fr/formation) et de l'Université Fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées (<https://www.univ-toulouse.fr/formation/formation-toutau-long-de-la-vie/trouveruneformation>).

Agropolis International se réjouit d'avoir pu, une fois de plus, contribuer à présenter la richesse et l'originalité des compétences présentes sur l'ensemble de la région Occitanie sur une question aussi sensible que celle du monde marin et de ses interfaces avec les établissements humains des espaces littoraux.

Jean-Luc Khalfaoui
Président d'Agropolis International

Sciences marines et littorales en

p. 3
Préface

p. 3
Éditorial

p. 6
Avant-propos

p. 11

Forçages naturels
et anthropiques sur
la dynamique de
la Méditerranée

p. 12
L'océan, agent climatique
à toutes les échelles

p. 16
Formation et acidification
des eaux profondes
méditerranéennes,
rôle du golfe du Lion

p. 20
Couplage « météorologie/
océanographie » : exemple
des crues cévenoles

p. 25

Biodiversité et
dynamique des
communautés
biologiques
en milieu marin

p. 26
Structure, dynamique
et fonctionnement
des communautés

p. 34
Organismes marins :
modèles biologiques
et plateformes
d'expérimentation

p. 39

Des preuves
scientifiques
de la vulnérabilité
de l'océan

p. 40
Variations du niveau de
la mer et impact sur le trait
de côte

p. 43
Impacts côtiers des
apports continentaux

p. 46
Conséquences des activités
industrielles et anthropiques
sur la mer et les zones
côtières

p. 50
Des ressources menacées



Occitanie

p. 55

Fondamentaux
d'un développement
durable du
« système mer »

p. 58
Gestion écosystémique de la
pêche et de l'aquaculture

p. 62
Trafic maritime, activités
industrielles et portuaires

p. 70
Biotechnologies,
bioingénieries marines
et restauration écologique
des milieux

p. 74
Gestion des risques
côtiers et adaptation au
changement climatique

p. 77
Aires marines protégées et
stratégies de bioconservation

p. 81
Énergies marines

p. 85

La force de
l'observation
pérenne, la synergie
de l'intégration
numérique

p. 86
Observatoires et données
in situ

p. 94
Place de la télémessure des
satellites d'observation

p. 98
Modélisation, simulation,
prévision à l'ère du *big data*

p. 102
Nouveaux services
numériques au bénéfice de
la collectivité et plateformes
de surveillance littorale
et maritime

p. 108
Technologies et outils
innovants

p. 115

Médiations
innovantes
et sciences
participatives

p. 116
Médiation autour de
l'environnement marin

p. 120
Quelques exemples
de programmes
d'observation citoyenne
au service de
la recherche

p. 124
Thématiques
couvertes par
les structures
de recherche

p. 128
Occitanie : une
Région qui s'engage
pour la mer et
son littoral

p. 130
Liste des
acronymes &
abréviations

Avant-propos

“Aucune histoire de l’humanité n’insiste suffisamment sur le rôle déterminant de la mer dans l’évolution des religions et des cultures, des techniques et des entreprises, des nations et des empires. On ne raconte jamais l’histoire des hommes vue de la mer. Et c’est pourtant là que l’essentiel se joue.” (In Histoires de la mer, Jacques Attali, 2017)

DD 14. C’est le quatorzième des Objectifs de Développement Durable sur les dix-sept de l’Agenda 2030 des Nations Unies, adopté à New-York le 25 septembre 2015. Ce n’est pas le moindre et il a un rôle central en fixant un cadre aux politiques d’aménagement, de développement et de réorientation de l’activité anthropique ainsi que son impact sur l’ensemble du domaine maritime et littoral. Le défi à relever ici est de « *conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable* ».

Défi politique, la mise à l’agenda international des océans et des activités liées dans cet ODD, suite aux discussions engagées à Rio à l’occasion du 3^{ème} Sommet de la Terre en 2012, se doit désormais d’aboutir à l’émergence d’un nouveau monde : la compréhension des processus en cause dans les changements climatiques confirment que la vie sur Terre repose en grande partie sur les interdépendances entre milieux terrestre et marin.

Défi complexe, des approches intégrées et interdisciplinaires ou, mieux, transdisciplinaires s’avèrent obligatoires et se fondent donc sur une synergie forte entre experts des sciences techniques, naturelles et sociales bien sûr, mais aussi gestionnaires des ressources, entrepreneurs et professionnels de la mer, partenaires de la société civile, citoyens et décideurs.

Défi polymorphe, la communauté scientifique, afin de concevoir les bonnes stratégies et compromis en matière de conservation et de santé des océans au profit des systèmes économiques, doit savoir structurer et mettre en place des systèmes d’observation et d’analyse, expérimentaux comme opérationnels, et être en mesure de produire des scénarios au travers de modèles les plus robustes possibles. Ces scénarios portent essentiellement sur (1) l’impact environnemental des activités extractives de ressources (e.g. pêches, dragages...) ou non extractives (e.g. tourisme de masse, transports...), (2) sur la détection des changements et de stress multi-scalaires dans les systèmes océaniques (variations climatiques, élévation du niveau marin, acidification, désoxygénation, atteinte à la biodiversité, pollutions...) et (3) sur l’évolution des sociétés face à ces contraintes (e.g. résilience, migrations, nutrition, santé...).

En ayant la gestion, donc la responsabilité, du deuxième domaine maritime de la planète, la France est particulièrement sollicitée et attendue sur cet ODD14. Conscients que les forces en présence dans la région Occitanie sont dotées d’atouts majeurs aptes à contribuer à relever ce défi, nous avons collecté ici, pour le démontrer, un florilège d’exemples de recherches de pointe et d’activités originales. Ces exemples – « *brèves réponses à de grandes questions* » – sont répartis selon six chapitres qui tentent de présenter thèmes et travaux de recherche portés par la communauté scientifique de la région Occitanie. L’accent y est volontairement mis sur les enjeux prioritaires à l’échelle méditerranéenne, *hot spot* à la fois de la biodiversité et de la vulnérabilité au changement climatique, tout en sachant que les équipes sont aussi impliquées directement, ou à travers des partenariats à des échelles beaucoup plus vastes, notamment concernant les pays du Sud et l’ensemble des régions maritimes françaises.

Le premier chapitre, « **Forçages naturels et anthropiques sur la dynamique de la Méditerranée** », illustre, par des exemples non exhaustifs, un certain nombre de mécanismes et d’enjeux propres à la physique et à la chimie du milieu marin. Des équipes de pointe en climat et météorologie y décrivent le rôle du couple océan-atmosphère sur le climat de la Terre, et plus spécifiquement la forte influence de mécanismes qui prennent leur naissance dans l’Atlantique sur l’humidité, la sécheresse ou les épisodes hivernaux parfois neigeux qui affectent le bassin méditerranéen. À plus fine échelle, ce sont les cyclones, les tornades mais surtout le déclenchement des épisodes cévenols avec leurs conséquences directes ou indirectes en termes humains et économiques qui y sont expliqués. Ces travaux nécessitent le déploiement de moyens de mesures lors de campagnes d’observation, comme HYMEX, que les équipes toulousaines coordonnent au plus haut niveau. Les océanographes se mobilisent pour étudier ce qui contraint le fonctionnement de la Méditerranée, que ce soit son quasi-assèchement dans le passé grâce aux paramètres enregistrés dans des archives, ou, à notre époque, pour une compréhension fine de la circulation océanique, reposant là encore sur des observations de terrain et des modèles. Les activités humaines affectent à la fois la physique, par la montée du niveau de la mer, l’intensification des tempêtes et les phénomènes de surcote, mais aussi la chimie de l’eau par la pénétration du gaz carbonique en excès qui induit une acidification des eaux de surface mettant en péril le premier chaînon de la chaîne alimentaire marine ainsi que les cultures de moules et d’huîtres. Le réalisme de ce tableau souligne l’urgence de la mise en œuvre des critères requis par l’ODD 14.

Le second chapitre « **Biodiversité et Dynamique des communautés biologiques en milieu marin** » relate, à travers quelques exemples, l'extraordinaire diversité des espèces présentes le long du littoral d'Occitanie. Si les récifs coralligènes et les herbiers de posidonies figurent parmi les biotopes les plus riches en matière de biodiversité, ils sont aussi soumis à de fortes pressions environnementales. Certaines espèces exploitées comme la sardine, les anchois ou encore la dorade royale, sont particulièrement menacées et font l'objet de recherches approfondies par les équipes qui disposent aujourd'hui d'outils d'investigation et de suivi très performants. Certains de ces outils sont même issus des laboratoires d'Occitanie.

De nombreux chercheurs étudient les frontières entre les écosystèmes, la connectivité entre les habitats et la manière dont les espèces sont fragilisées par les aménagements ou les activités. Ces recherches sont la clé de l'élaboration de scénarios prédictifs en vue de proposer des solutions aux gestionnaires. Certaines espèces sont étudiées en profondeur afin de mieux comprendre les mécanismes de leur réponse aux changements de l'environnement, mais aussi pour comprendre leur évolution au fil des temps. Ces travaux portent aussi bien sur des espèces macroscopiques que microscopiques et sur leurs interactions ; ils s'appuient sur les outils les plus récents de la génomique. Si la communauté scientifique régionale est très active et reconnue dans le domaine de la biologie marine, elle dispose également de plateformes d'expérimentation tout à fait remarquables à travers le Centre national de ressources biologiques marines (EMBRC) à Banyuls et la plateforme MEDIMEER (*MEDiterranean platform for Marine Ecosystem Experimental Research*) à Sète.

Le troisième chapitre « **Des preuves scientifiques de la vulnérabilité de l'océan** » traite de la manière dont le changement climatique et, plus largement, les pressions anthropiques sont susceptibles d'impacter le trait de côte mais également les écosystèmes et les ressources vivantes. Différentes équipes de la région Occitanie (Montpellier, Toulouse et Perpignan) travaillent conjointement sur l'évolution de la surcote marine et la dynamique sédimentaire en relation avec les événements hydrologiques et les apports fluviaux. Ces travaux sont essentiels pour prédire l'évolution du littoral et établir des scénarios indispensables en matière de gestion et d'aménagement du territoire.

Du fait de l'évolution démographique, le littoral est soumis à de multiples pressions anthropiques. L'exploitation des sables, le rejet des effluents d'épuration, les déchets plastiques, les produits chimiques et

autres polluants qui sont rejetés directement en mer, font l'objet de nombreuses recherches afin de mieux comprendre leurs impacts sur les écosystèmes et les organismes vivants mais aussi pour développer des outils de surveillance. Plusieurs laboratoires issus de disciplines différentes s'associent pour développer des capteurs susceptibles de mesurer en continu ces pollutions tandis que d'autres recherchent comment certaines espèces peuvent jouer un rôle d'indicateurs de qualité du milieu. Plusieurs de ces travaux sont directement destinés à comprendre les menaces qui s'exercent sur les activités économiques comme la conchyliculture.

Le quatrième chapitre, « **Fondamentaux d'un développement durable du système mer** » développe la question des connaissances et des technologies nécessaires à la conception de systèmes d'activités plus durables. Outre les approches transversales, les recherches sur la mise en œuvre du développement durable s'attachent à approfondir dans chaque secteur – pêche, aquaculture, tourisme, transports maritimes... – les interactions entre les usages et les activités par rapport à la nature et aux écosystèmes. Les connaissances corollaires servent à orienter et accompagner des changements de pratiques des acteurs économiques, des citoyens et des décideurs publics en faveur de processus et d'usages plus respectueux de l'environnement. Elles impliquent de multiples collaborations entre disciplines et laboratoires, décideurs publics et entreprises privées.

D'abord déclinée sur les littoraux et la zone côtière, la problématique du développement durable s'étend progressivement vers le large et conduit à orienter recherches et activités vers l'exploitation, supposée durable et raisonnée, de l'ensemble des espaces et des ressources marines, sans oublier le challenge du changement climatique qui conduit à intégrer l'étude et la gestion de la vulnérabilité des milieux et des sociétés. Plusieurs types d'enjeux sont au cœur des recherches. Citons les impacts de l'acidification et du réchauffement de la température de l'eau sur l'équilibre des écosystèmes et sur les espèces marines, qu'elles soient exploitées ou pathogènes, mais aussi les risques de prolifération des espèces invasives. Face à la montée du niveau de la mer et aux phénomènes de submersion marine qui renforceront les dommages des tempêtes, il s'agit aussi de penser des formes innovantes d'adaptation des territoires. Des recherches accompagnent des changements de pratiques productives transposant le principe de l'agroécologie à l'aquaculture, l'amélioration des processus de gouvernance, notamment des aires marines protégées, et des processus de restauration et d'ingénierie écologique. ▶▶▶▶

Le cinquième chapitre, « **La force de l'observation pérenne, la synergie de l'intégration numérique** », est mosaïqué d'équipes de renommée internationale : la France, et Toulouse notamment, conserve le *leadership* historique mondial de l'océanographie spatiale en développant de nouveaux systèmes spatiaux performants mais aussi en sachant maintenir les dispositifs idoines de collecte, archivage et traitement de bases de données *in situ*, essentielles pour la validation de toute mesure et de tout algorithme. Ces dispositifs ne se cantonnent pas aux données d'océanographie physique mais s'additionnent aux bases de données de biologie et de sciences humaines du territoire. Comme pour le secteur spatial, ils s'appuient également sur toute une compétence de développement et d'exploitation de nouveaux capteurs et de nouvelles technologies. Les algorithmes, déterministes ou statistiques, simples ou faisant appel aux dernières techniques d'apprentissage profond, sont générateurs d'applications inédites, d'innovations, voire de nouvelles professions dont certaines sont présentées au travers d'exemples concrets. Ces derniers émergent à des domaines divers tels que la surveillance de l'environnement marin et littoral assistée par satellites (courantologie hauturière et littorale, état de la mer et vent, températures de surface, détection du changement climatique, contrôle des ressources pélagiques, pollution par hydrocarbures, trafic maritime, trait de côte...), la surveillance sous-marine (biodiversité benthique, santé des écosystèmes marins...) par diverses techniques (*gliders*, robots, *overboats*, collecte d'ADN environnemental...) ainsi que la modélisation prédictive (évolution du littoral, phénomènes extrêmes...). La liste, longue et passionnante, n'est pas un catalogue rébarbatif mais, bien au contraire, elle symbolise le dynamisme et la créativité de toutes ces équipes de recherche.

Le sixième chapitre offre une palette d'exemples de « **Médiations innovantes et sciences participatives** » menés en région Occitanie. Les sciences sont de plus en plus perçues par le grand public comme ambiguës, à la fois vecteur de progrès pour l'avenir mais aussi susceptibles de générer de nouveaux risques technologiques, alors que deux-tiers des français s'intéressent à l'actualité scientifique et que 78 % estiment que la science apporte des solutions aux enjeux d'aujourd'hui (Ipsos, 2016) ! Encore faudrait-il que ce savoir soit compréhensible et accessible à tout un chacun – citoyens, professionnels, gestionnaires des milieux naturels... Mettre la science à la portée de tous : c'est ce que rend possible la médiation scientifique à travers les multiples formes qu'elle revêt.

La recherche scientifique est souvent ressentie comme un monde à part, réservé aux seuls chercheurs de profession. C'est pourquoi les sciences participatives séduisent aussi, en donnant l'opportunité à tout citoyen – expert, amateur, professionnel de la mer, naturaliste... – de faire avancer la connaissance et de partager des savoirs avec les scientifiques. Au prix d'un investissement personnel, chacun a ainsi la possibilité de mieux comprendre les avancées scientifiques dans leur globalité, voire de contribuer aux débats et aux enjeux de la recherche. Autre avantage – et pas des moindres ! – ce processus participatif offre un moyen de collecter, grâce à un très large public, une abondance de données sur de vastes territoires et sur de longues échelles de temps, rendant ainsi possible la réalisation d'études très difficiles, voire impossibles, à réaliser autrement...

Nous invitons les lecteurs à tourner les pages de ce dossier qui, sans prétendre à l'exhaustivité, leur fera découvrir cette grande richesse des acteurs régionaux et des travaux qu'ils mènent sur la mer et le littoral, notamment en Méditerranée. Nous invitons également les lecteurs intéressés à aller consulter les sites internet de ces acteurs qui ont contribué à ce dossier et de prendre contact avec eux (cf. p. 124).

Le Comité éditorial :

John Bandelier (Kimiyo), Bernard Hubert (Inra, EHESS, Agropolis International), Catherine Jeandel (CNRS), Philippe Lebaron (Sorbonne Université, CNRS), Michel Petit (Agropolis International), Hélène Rey-Valette (UM) et Pierre Soler (OMP)



Dédicace

Pierre Soler †, géophysicien de renom international et directeur de l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), a été un acteur majeur de ce dossier avec tout l'enthousiasme que nous lui connaissions, notamment en rejoignant le comité éditorial. Pierre a toujours œuvré pour la diffusion des savoirs et la compréhension des défis scientifiques comme technologiques auprès des décideurs et des citoyens. Sa disparition nous a privés de ses conseils avisés et de son amitié. Nous tenons ici à lui rendre hommage en lui dédiant ce numéro des dossiers d'Agropolis International.

© OMP



▲ Récifs Prado, Grand Prix du Génie
écologique 2014 (cf. p. 111).
© Sandrine Ruitton



Forçages naturels et anthropiques sur la dynamique de la Méditerranée



Ressource d'eau, de travail, de vie, de loisirs, la Méditerranée est une région maritime clef dans le paysage européen et nord-africain. Vue du rivage, elle peut paraître lisse ou agitée, d'un bleu rassurant ou d'un gris menaçant, mais dans tous les cas constante voire éternelle à l'échelle humaine : elle nous a vus naître, elle nous verra disparaître. Certes et pourtant... Comme tout élément constituant de la Terre, la dynamique de la Méditerranée résulte de forçages agissant à toutes les échelles de temps et d'espace. Ce chapitre a pour objectif de balayer, sans prétendre à l'exhaustivité, un certain nombre de ces forçages et leurs impacts sur la géographie, la circulation, et le comportement de la Méditerranée en regard des changements globaux.

À l'échelle géologique, la tectonique détermine la présence ou l'absence de mer. De nos jours par exemple, la plaque africaine se déplace très lentement vers le nord, en compressant la plaque européenne. Cette progression est signée par les séismes violents affectant l'Italie, la Grèce, la Turquie, voire les Pyrénées. D'ici 10 millions d'années, la Méditerranée devrait disparaître progressivement sous l'effet de ce rapprochement... d'ailleurs ne se fit-elle pas « lac » il y a 5 à 6 millions d'années (crise messinienne) comme l'explique A. Maillard-Lenoir ? Cette remontée dans le temps est possible grâce à la lecture des signaux naturels enregistrés dans les archives climatiques, comme les coquilles de mollusques étudiés par G. Dera.

À une échelle temporelle beaucoup plus courte, de la décennie à l'année, L. Batté note l'influence sur la Méditerranée de son voisin, l'Atlantique. Cette influence s'inscrit dans une dynamique plus globale d'échanges entre océan et atmosphère décrite par S. Planton, échanges qui conditionnent le climat de la Terre. L'eau de surface Atlantique entre dans ce bassin fermé par un seul détroit, celui de Gibraltar. Elle tourne pendant environ 85 ans entre les bassins « occidental » et « oriental », séparés par le détroit de Sicile, avant de ressortir par Gibraltar, mais cette fois en profondeur car elle gagne en densité lors de son circuit. En effet, une fois dans le bassin, cette eau va se modifier : d'une part, sous l'effet des températures élevées de l'air et du relativement faible débit des fleuves, elle s'évapore et se sale. D'autre part, sous l'effet des vents froids venus du nord et de sa circulation, elle se mélange. Ces mécanismes physiques clés conditionnent l'oxygénation des eaux et le développement de la vie en Méditerranée grâce aux remontées de sels nutritifs qu'ils véhiculent. M. Herrmann et I. Taupier-Letage soulignent combien les observations régulières, calibrées et sur le long terme, enrichissent la compréhension du schéma de circulation, voire bousculent des paradigmes acquis de longue date comme le démontre très bien R. Waldman. La dynamique de la formation de cascades sous-marines dans le golfe du Lion et l'influence de ces formations d'eaux profondes sur l'activité planctonique de surface sont pointées par les travaux de C. Estournel et P. Conan.

À une échelle saisonnière, les travaux du projet de recherche HYMEX rapportés par V. Ducrocq soulignent combien la Méditerranée peut, à son tour, générer des impacts dramatiques sur les régions littorales : les épisodes de pluie intense, les « épisodes cévenols », qui se produisent en fin de période chaude lorsque l'évaporation a chargé l'air de vapeur d'eau et que les montagnes voisines, plus froides, induisent sa condensation. Bien que différent, ce mécanisme se rapproche de celui qui génère, à une échelle plus large dans les

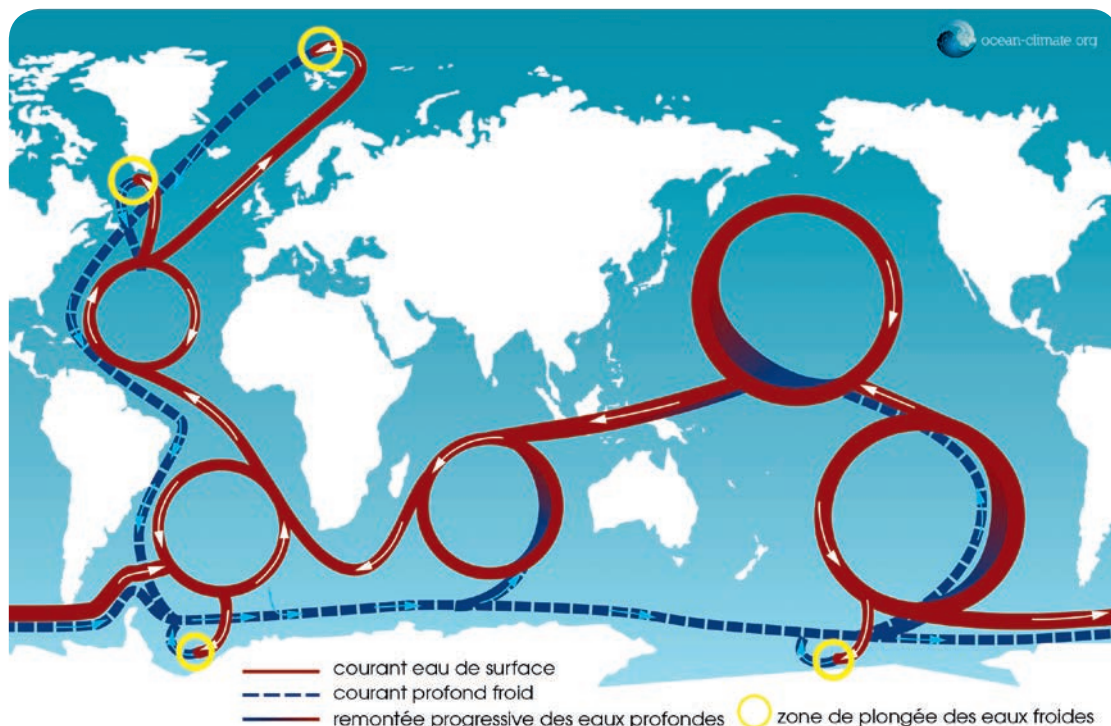
océans Atlantique, Indien ou Pacifique tropicaux, voire récemment en Méditerranée orientale, des cyclones qui peuvent être violents (P. Marchesello). Ces épisodes peuvent être économiquement forts coûteux, car les eaux torrentielles inondent et emportent tout. Depuis 20 ans, huit épisodes cévenols marquants ont eu lieu (1999, 2002, 2003, 2005, 2010, 2011, 2014, 2015). Celui de décembre 2003 a touché une vaste étendue, de l'Aude jusqu'aux Alpes du Sud : digues rompues, crues violentes du Rhône, du Vidourle, de l'Hérault et de plus petits fleuves (Lez, Mosson, Orb...), des villes et villages inondés (16 millions de m³ dans Arles, Sommières sinistrée...). Ces crues sont souvent accompagnées de tempêtes, et la conjugaison de la dépression atmosphérique (qui appuie moins sur l'eau et donc la fait s'élever), des grosses vagues et des crues, génère des submersions majeures en zone littorale (C. Estournel, Y. Leredde). Les coûts humains, industriels ou publics, induits par ces événements, soulignent les enjeux sociétaux qui sous-tendent ces recherches.

À l'échelle d'aujourd'hui et de demain, la Méditerranée n'échappe malheureusement pas aux effets de la pression anthropique, que l'on peut décrire comme un forçage dû aux activités humaines. Certaines des propriétés dynamiques de la grande bleue, comme le mélange vertical de la colonne d'eau par exemple, vont malheureusement intensifier un des effets peu perceptible mais cependant très menaçant de l'excès de gaz carbonique rejeté par l'activité humaine : l'acidification des eaux. Cette acidification procède d'une réaction chimique : le gaz carbonique, lorsqu'il se dissout dans l'eau, se dissocie en l'acidifiant. Cela ne signifie pas que l'eau de mer est acide mais qu'elle est 30 % plus acide qu'il y a un siècle, et que si l'on continue à brûler du carbone fossile, elle le sera 3 fois plus à la fin de celui-ci. Or les coquilles de nombreux organismes qui se développent en surface, sont calcaires... et l'acide dissout le calcaire. On comprend aisément que cette acidification croissante inquiète biologistes et spécialistes des coraux : son impact négatif est déjà observé sur la biodiversité marine et sur le développement d'espèces économiquement majeures comme les huîtres et les moules. F. Touratier et son équipe expliquent comment, en raison de ces intenses plongées d'eau le long de son littoral, le golfe du Lion est un *hot spot* de la pénétration du CO₂ dans les abysses méditerranéens.

Une autre menace majeure pour les littoraux d'Occitanie est la montée du niveau de la mer (Meyssignac et al.), estimée à 17 cm au cours du 20^e siècle, comme une conséquence à la fois de la dilatation de l'eau océanique sous l'effet de la chaleur ainsi que de la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires qui libère une eau piégée sous forme solide lui permettant de s'écouler vers la mer. Ce phénomène s'accélère aujourd'hui, une *startup* est née pour aider les collectivités à surveiller plages et littoraux (Y. Soufflet). Les prévisions pour la fin de ce siècle s'accordent autour d'une augmentation minimale de 40 cm, la maximale pouvant atteindre 2 m selon le comportement du littoral antarctique face à l'assaut d'une mer plus chaude.

Catherine Jeandel (CNRS, UMR LEGOS)

L'océan, agent climatique à toutes les échelles



▲ Image simplifiée des courants océaniques liés à la variation de la densité de l'eau et donc de la température et de la salinité (« thermohaline »). Les courants de surface (en rouge) et profonds (en bleu) redistribuent la chaleur reçue à la surface. © Plateforme Océan et Climat. <http://ocean-climate.org>

Que le climat doit à l'océan

En redistribuant vers les latitudes polaires et tempérées, une partie de l'énergie solaire reçue par les régions intertropicales, l'océan, comme l'atmosphère, joue un rôle majeur dans la régulation du climat de notre planète. L'océan couvre environ 71 % de la surface terrestre. Il constitue un énorme réservoir d'eau et d'énergie. Sa capacité calorifique totale d'environ 1 200 fois celle de l'atmosphère, emmagasine une très grosse partie de la chaleur reçue par la planète. L'océan a ainsi stocké environ 93 % de l'augmentation de l'énergie accumulée par la Terre ces dernières décennies, liée à celle de la concentration des gaz à effet de serre. L'énergie thermique absorbée est transportée avec des constantes de temps qui peuvent se compter en mois

pour les courants superficiels jusqu'à un millier d'années pour les courants profonds. **C'est cette grande capacité de stockage et cette forte inertie qui amortissent les variations brutales que pourrait subir l'atmosphère à la suite de violentes éruptions volcaniques, d'un brusque changement de la constante solaire ou de très fortes perturbations associées aux activités humaines.**

Les interactions entre l'océan et l'atmosphère sont permanentes. L'océan est la principale source de vapeur d'eau et fournit à l'atmosphère une grande partie de l'énergie qui est nécessaire à la formation des vents et des nuages. Ce sont ces vents qui, par frottement, déplacent les couches superficielles de l'océan et donnent

naissance aux courants de surface comme le *Gulf Stream* ou au phénomène bien connu d'*El Niño* qui conduit à de fortes perturbations climatiques réparties sur toute la planète. Mais l'océan n'a pas encore délivré tous ses secrets. Il en est ainsi du rôle non complètement élucidé joué par la température de surface de l'océan Atlantique Nord aux échelles de temps de plusieurs dizaines d'années sur la variabilité de la pression atmosphérique en Europe qui conditionne, en particulier, la douceur des hivers... à Montpellier.

Contact (CNRM*) : S. Planton,
serge.planton@meteo.fr

* Les appellations développées des structures de recherche auxquelles les auteurs appartiennent se trouvent dans le tableau p. 124.

Les échanges entre océan et atmosphère conditionnent le climat de la Terre

Forçages climatiques sur la région Euro-Méditerranée

La variabilité du climat aux échelles mensuelle à saisonnière sur la région Euro-Méditerranée reflète en partie l'intensité de modes préférentiels comme l'oscillation Nord-Atlantique (NAO). Cette oscillation, mesurée par l'écart de pression de surface entre Reykjavik et Lisbonne, décrit les fluctuations relatives en intensité de l'anticyclone des Açores et des dépressions d'Islande. En hiver, une phase positive de NAO correspond à une accentuation du gradient de pression atmosphérique nord/sud et un décalage du rail des dépressions vers le nord de l'Europe, donc un déficit de précipitations sur l'Espagne et le nord du bassin méditerranéen. À l'inverse, une NAO négative favorise les systèmes dépressionnaires sur la Méditerranée, qui, au contact d'air froid provenant du nord-est, peuvent engendrer des épisodes neigeux en plaine tels qu'observés dans l'Hérault durant l'hiver 2018.

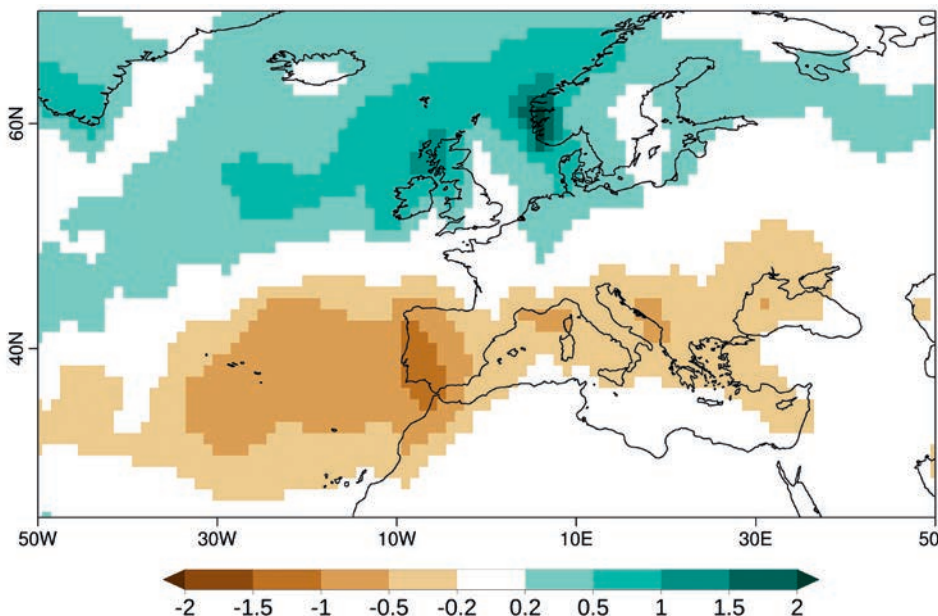
À l'échelle saisonnière, plusieurs études fondées sur des données atmosphériques combinant modèles de circulation générale et observations *in situ* ont mis en évidence un lien entre *El Niño* (dans le Pacifique) et la NAO hivernale. Ces mécanismes opèrent *via* la haute troposphère ou la stratosphère. Aux moyennes latitudes, l'océan joue un rôle déterminant dans la variabilité du climat méditerranéen. Des travaux récents ont suggéré que **la variabilité multi-décennale de l'Atlantique Nord peut moduler les extrêmes de précipitations en Europe**. Toutefois, la robustesse de ces liens statistiques souffre du faible nombre d'années sur lesquelles ils sont évalués, et de la forte non-linéarité des impacts observés. Dès lors, le recours à des expériences idéalisées avec des modèles de climat permet d'étudier les différents mécanismes en jeu. L'étude des forçages climatiques* sur la Méditerranée et leurs implications pour la prévision du climat est l'un des axes du projet ERA4CS* MEDSCOPE auquel participent Météo-France et l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) d'Avignon. Le principal objectif du projet est d'améliorer l'intégration de prévisions saisonnières à décennales dans les modèles d'impact en hydrologie, énergie et agriculture, afin de fournir des indicateurs sectoriels pertinents.

Contact (CNRM) : L. Batté, lauriane.batte@meteo.fr

Plus d'informations : sur le projet MEDSCOPE (*Mediterranean services chain based on climate prediction*) : www.medscope-project.eu

* NDLR. Les forçages climatiques sont des perturbations dans l'équilibre énergétique de la Terre, qui engendrent des changements de températures (et donc des vents).

** ERA4CS : *European Research Area for Climate Services*, cofinancé par la Commission européenne.



▲ **Covariance sur la période 1993-2015 des précipitations moyennes saisonnières (en mm/jour) avec l'indice NAO pour la saison d'hiver (décembre à février) sur la région Euro-Méditerranée.** Les précipitations proviennent de la ré-analyse de Global Precipitation Climatology Project (GPCP) et l'indice NAO est calculé à partir des données de géopotential à 500 hPa de la ré-analyse ERA-Interim. © L. Batté

Cyclones tropicaux, monstres océaniques

Les cyclones tropicaux, également connus sous le nom d'ouragans ou de typhons, sont l'un des phénomènes météorologiques les plus violents de la planète, et constituent une menace importante pour les populations côtières où les impacts sont les plus prononcés. Ces énormes machines naturelles sont typiquement un phénomène marin car elles se nourrissent de l'énergie thermique considérable de l'océan tropical grâce à l'évaporation. Il se forme environ 80 cyclones par an dans le monde, principalement en été et, pour les deux tiers, dans l'hémisphère Nord. Notre compréhension de la distribution des cyclones, ainsi que de la variabilité temporelle de leur activité s'est grandement améliorée depuis l'avènement des satellites météorologiques dans les années 1970 et l'assimilation de leurs observations dans les modèles. Nous savons que le climat exerce une influence modulante sur l'environnement déterminant la formation cyclonique : températures océaniques, humidité de l'air, vents d'altitude. Ainsi, *El Niño* et l'Oscillation Australe (ENSO) ont de loin l'influence la plus dominante sur la variabilité interannuelle de la fréquence cyclonique, si bien que son indice est utilisé de manière prédictive pour l'activité saisonnière, du moins dans le Pacifique. En revanche, les modèles à haute résolution ont montré qu'une part importante de la variabilité de l'activité cyclonique n'est pas prévisible d'une année sur l'autre car sujette aux caprices du chaos, associés aux fortes non-linéarités des processus de déclenchement. En ce qui concerne les tendances à long terme, la période relativement courte pour laquelle nos données sont fiables rend difficile le discernement des tendances dues au changement climatique de celles se produisant naturellement sur des échelles décennales à multi-décennales. Les projections climatiques issues des modèles actuels sont encore peu fiables mais l'hypothèse la plus consensuelle est que **la fréquence et l'intensité des cyclones seraient finalement peu influencées par le réchauffement climatique, mettant en jeu des effets de sens opposé dans l'océan et l'atmosphère**.

Contact (LEGOS) : P. Marchesiello, patrick.marchesiello@ird.fr



▲ **Le typhon Maysak approchant les Philippines vu depuis la Station spatiale internationale à 21:18:54 UTC le 31 mars 2015.** © Terry Virts/NASA/ISS [Public domain], via Wikimedia Commons

Les mollusques du littoral méditerranéen : des archives climatiques

Le strontium est un élément chimique naturellement présent dans l'eau de mer dont l'abondance relative en certains isotopes (comme ^{86}Sr et ^{87}Sr) reflète l'altération respective des roches continentales et du plancher océanique. Malgré l'hétérogénéité spatiale de ces deux sources, les océans présentent une surprenante homogénéité du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans le monde due au fait que le temps de résidence (ou temps de séjour moyen) de cet élément dans l'eau de mer est supérieur au temps de brassage global de l'océan. Toute déviation isotopique par rapport à cette valeur de référence constitue donc un indicateur du degré de mélange entre une eau de mer normale et des eaux douces ou saumâtres provenant de fleuves ou de résurgences sous-marines possédant des signatures isotopiques différentes. Ce rapport géochimique de l'eau de mer peut ainsi fortement fluctuer au niveau des zones littorales, et plus particulièrement dans un contexte où les modifications climatiques accentuent le ruissellement sur les continents. Cependant, les facteurs responsables de ces fluctuations (nature des roches à proximité, apport d'eau douce, configuration de la côte, climat) restent encore mal compris. Pourquoi certaines eaux côtières montrent-elles de telles anomalies géochimiques ? Comment les organismes qui y vivent les enregistrent-ils ?

Avec l'aide d'un spectromètre TIMS* (financé par la Région Occitanie), l'unité mixte de recherche (UMR) GET a étudié la composition isotopique du strontium de l'eau, des sédiments, et des coquilles de mollusques de plusieurs zones littorales à travers le monde (cf. fig. 1 ci-contre)**. La lagune de Salses-Leucate (Aude) est le point de référence du domaine méditerranéen (cf. fig. 2). Les premiers résultats indiquent que 80 % des coquilles du littoral mondial enregistrent bien la valeur isotopique des océans. Les 20 % restants montrent de fortes déviations liées à des effets de restriction des masses d'eau et des résurgences provenant des aquifères côtiers, ce qui est le cas des lagunes de Salses-Leucate et d'Oualidia (Maroc). Ces résultats montrent que, **même sans influence notable de rivières, les apports souterrains d'eau douce peuvent considérablement changer la composition géochimique des eaux de certains domaines côtiers très fermés.**

Contact (GET) : G. Dera,
guillaume.dera@get.omp.eu

* TIMS : spectromètre de masse à thermo-ionisation.

** Projet Malaco du programme LEFE-CYBER (Les Enveloppes Fluides et l'Environnement - Cycles biogéochimiques, environnement et ressources) de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU).

Ostreidae, *Crassostrea gigas*



Ostreidae, *Crassostrea gigas*



Nautilidae, *Nautilus macromphalus*



► Fig. 1. Exemple de coquilles de mollusques de Bretagne et de Nouvelle-Calédonie analysées.
© S. El Meknassi



▲ Fig. 2. Prélèvement d'eau, sédiments et gastéropodes dans la résurgence de Font Dame à l'ouest de la lagune de Salses-Leucate. © G. Dera

Crise messinienne : quand la Méditerranée se vida

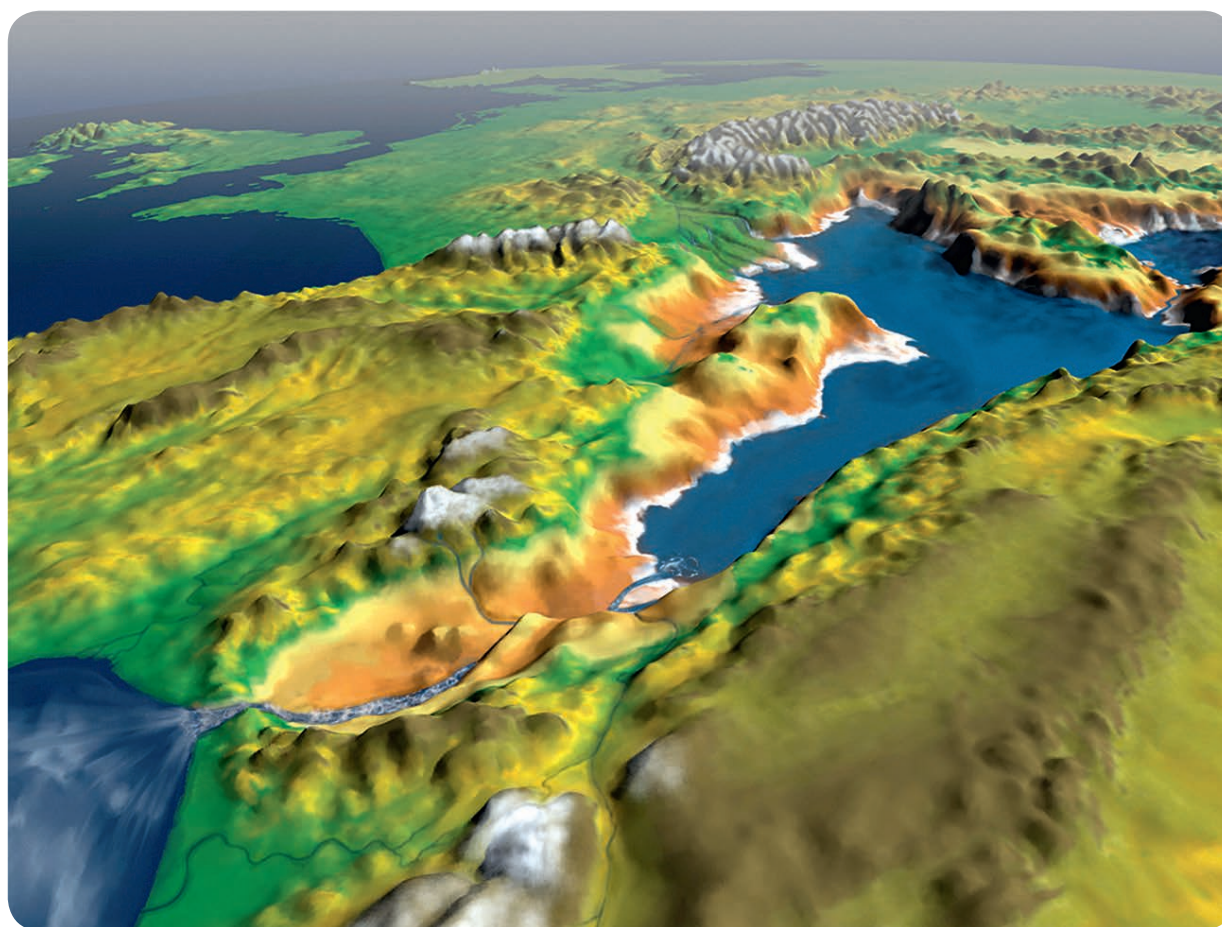
La crise de salinité messinienne est un événement exceptionnel qui modifia dramatiquement l'environnement méditerranéen entre 6 et 5 millions d'années et qui influence toujours aujourd'hui la géologie régionale. La fermeture progressive au Messinien des connexions de la Méditerranée avec l'Atlantique aboutit à la dessiccation de la mer pendant une durée particulièrement courte à l'échelle des temps géologiques (300 à 600 000 ans), mais dont les conséquences sont majeures. En effet, la baisse résultante du niveau marin par évaporation aurait atteint 1 500 m, laissant la majeure partie du bassin à l'air libre, comme l'atteste encore aujourd'hui la surface d'érosion incisant profondément l'ensemble des marges ainsi que le surcreusement des fleuves

vers l'amont (érosion jusqu'au nord de Lyon pour le Rhône, et au-delà d'Assouan pour le Nil !). La déstabilisation de l'ensemble causa le transfert en masse des produits de l'érosion vers le bassin profond, là où précipita une couche d'évaporites de plus d'1km d'épaisseur. Cette imposante couche de sel provoque des déformations tectoniques majeures sur les sédiments post-crise et contrôle notamment le potentiel en hydrocarbures.

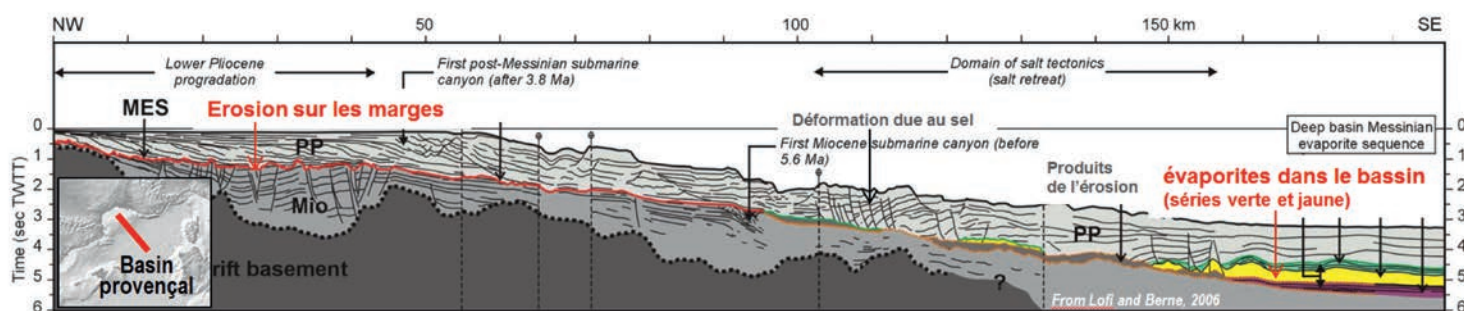
Depuis la découverte de ce « géant salifère » dans les années 1970 grâce aux techniques de sismique marine, la communauté scientifique internationale se focalise sur l'étude de cette crise car **elle offre l'opportunité unique au monde d'analyser les facteurs contrôlant la**

chute du niveau marin d'une telle ampleur, tels les effets conjoints de la géodynamique et du climat sur les paléoenvironnements. Si beaucoup d'interrogations demeurent, notamment sur les causes, la chronologie des événements et leurs conséquences isostatiques régionales, des scénarii de plus en plus précis de la crise messinienne sont élaborés, auxquels contribuent les chercheurs du GET par des missions à terre et en mer révélant les liens spatio-temporels entre les différents marqueurs et par de nombreuses participations à des ateliers de travail spécialisés.

Contact (GET) : A. Maillard-Lenoir, agnes.maillard-lenoir@get.omp.eu



◀ *La Méditerranée occidentale pendant le Messinien. D'après Garcia-Castellanos D., 2009. Création artistique de R. Pibernat.*



▲ *Coupe de la marge au bassin profond illustrant la surface d'érosion sous la plateforme, le dépôt du sel dans la plaine abyssale et les déformations des sédiments sus-jacents en résultant.*

Formation et acidification des eaux profondes méditerranéennes, rôle du golfe du Lion

Observer et modéliser la convection profonde en Méditerranée pour mieux comprendre son fonctionnement, sa variabilité et son évolution

La convection profonde océanique a lieu lorsque les conditions atmosphériques rendent les eaux de surface plus froides et/ou salées, donc plus denses, que les eaux sous-jacentes. Ceci provoque un mélange vertical de la colonne d'eau qui peut atteindre le fond. Les eaux denses ainsi formées coulent au fond des océans et s'y répandent, formant la branche profonde de la circulation océanique. L'intensité de la convection varie énormément d'une année à l'autre, en particulier en fonction des conditions météorologiques. La convection profonde a lieu notamment en Méditerranée nord-occidentale lors des coups de vent hivernaux très froids du type Mistral ou Tramontane. Elle est à l'origine de la formation des masses d'eau profonde de la circulation méditerranéenne, mais aussi de la forte production biologique printanière dans la région. Elle conditionne non seulement la dynamique océanique, mais également le climat, la biodiversité, les ressources halieutiques et le cycle du carbone. Il est donc primordial de mieux comprendre son fonctionnement, suivre sa variabilité et prévoir son évolution face aux changements globaux.

Ceci a été rendu possible ces dernières années grâce à la combinaison indispensable d'observations de terrain, de données satellitaires et d'outils de modélisation numérique. La relative facilité d'accès de la Méditerranée par rapport à d'autres zones de convection situées aux pôles a permis le développement de programmes d'observation intensive et de long terme qui se sont révélés extrêmement précieux pour notre connaissance de ce phénomène. Ainsi, les programmes HyMeX

(cf. p. 20) ou HydroChanges* ont été une remarquable occasion de fédérer observateurs et modélisateurs issus de laboratoires de différents pays et régions du pourtour méditerranéen. Grâce à cet effort commun, la variabilité interannuelle a pu être estimée sur plusieurs décennies pour la première fois. **Ceci conduit à une meilleure compréhension du phénomène de convection dont les modèles suggèrent qu'il pourrait fortement s'affaiblir d'ici la fin du siècle.**

Contacts : M. Herrmann (LEGOS), herrmann@legos.obs-mip.fr et I. Taupier-Letage (Institut Méditerranéen d'Océanologie, MIO), isabelle.taupier-letage@univ-amu.fr

Plus d'informations :

www.ciesm.org

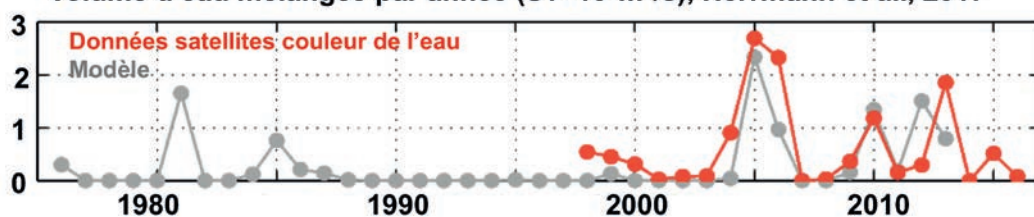
www.hymex.org

www.mistrals-home.org

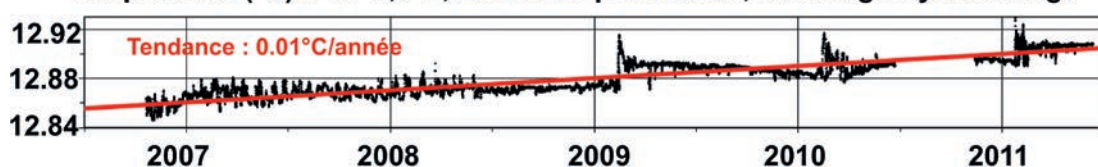
<https://youtu.be/NTMORRHqcpE> (vidéo de sauvetage d'une ligne de mouillage HydroChanges équipée d'instruments océanographiques de surveillance de l'évolution climatique de la Méditerranée).

* Le programme HydroChanges est une initiative de la Commission internationale pour l'exploration scientifique de la Méditerranée, avec une contribution française soutenue par le programme HyMeX (Hydrological cycle in Mediterranean eXperiment) et MOOSE (Mediterranean Ocean Observing System for the Environment).

Volume d'eau mélangée par année (Sv $\sim 10^6 \text{m}^3/\text{s}$), Herrmann et al., 2017



Température (°C) à 42°N, 5°E, 2300m de profondeur, mouillage Hydrochange



◀ Haut : variation annuelle du volume d'eau dense formée en Méditerranée nord-occidentale à partir du modèle SYMPHONIE (gris) depuis 1975 et des observations satellitaires de la couleur de l'eau (rouge) depuis 1998. Le Sverdrup (Sv) est une unité de mesure du transport de volume utilisée pour mesurer les débits des courants océaniques. D'après Herrmann et al., 2017. J. Geophys. Res. Oceans. 122(2): 1457-1475. DOI:10.1002/2016JC011833

◀ Bas : évolution de la température au centre de la zone de convection ($\sim 42^\circ\text{N}$ - 5°E , $\sim 2300\text{m}$, série temporelle enregistrée à 2300 m de profondeur, de 2006 à 2011 (programme HydroChanges). Les observations montrent une augmentation de $0,01^\circ\text{C}/\text{an}$ sur cette période, l'utilisation conjointe des modèles et des observations satellitaires devrait déterminer si cette tendance persiste sur le long terme.

La circulation océanique a un rôle climatique essentiel. Si sa vitesse diminue, son rôle de « tampon climatique » diminue d'autant.

Cascading, convection au large et dynamique des matières côte-large

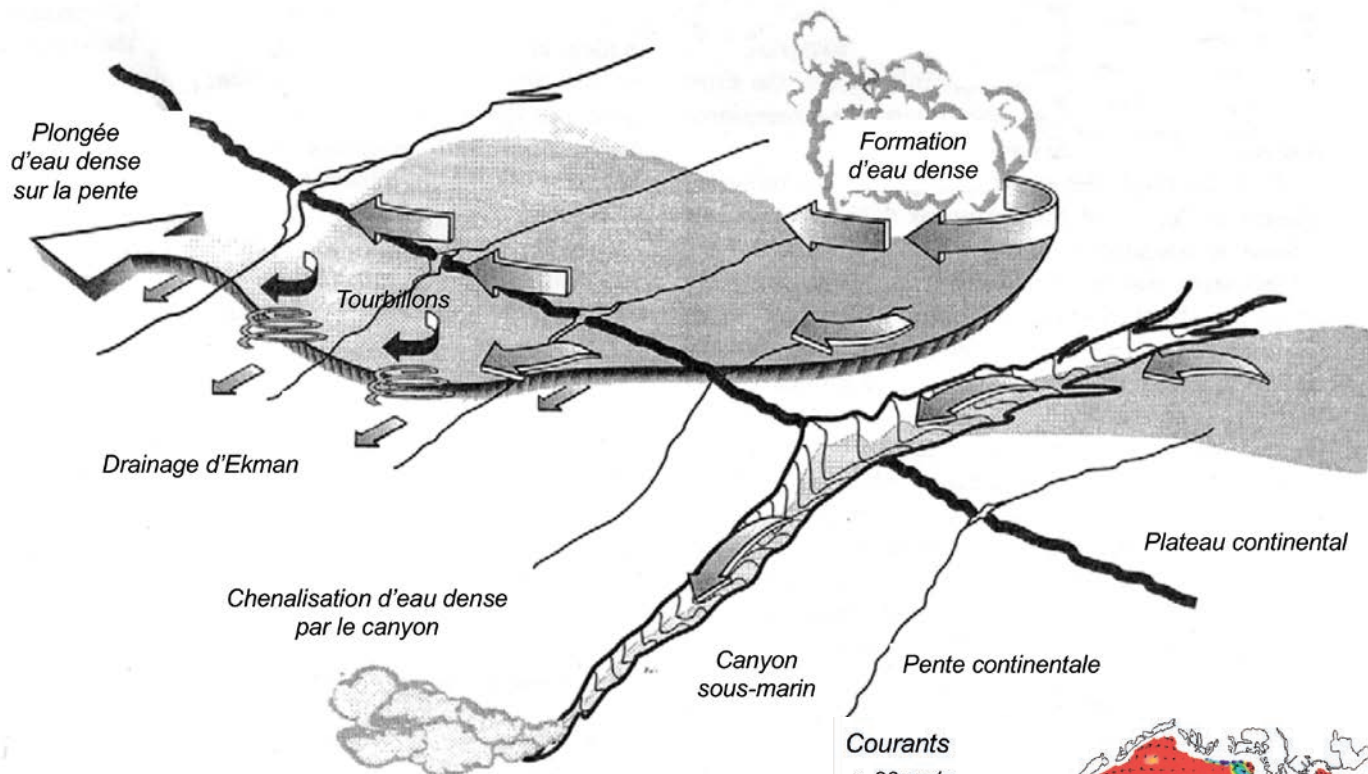
Le golfe du Lion est composé d'un plateau continental, d'une profondeur maximale de 120 m, d'un talus continental, entrecoupé de canyons sous-marins qui plongent rapidement jusqu'à 2 000 m, et d'une plaine abyssale. Un courant permanent (courant nord), qui longe le talus, forme une barrière entre les eaux côtières, influencées par les apports fluviaux, et les eaux du large. Celui-ci est instable et forme des méandres, qui, en divaguant, mélangent les eaux côtières et hauturières. Les vents prédominants de nord (Mistral) et nord-ouest (Tramontane) et ceux occasionnels d'est et sud-est (Marin) modulent les courants sur le plateau et contribuent aux échanges d'eau et de matières entre la côte et le large.

Le golfe est également caractérisé par un important refroidissement de la surface de la

mer en automne et en hiver sous l'effet des coups de Mistral et Tramontane. À l'instar des formations d'eaux profondes dans le bassin, ces conditions météorologiques induisent la formation d'eau froide et dense le long des côtes languedocienne et roussillonnaise. Ces eaux denses côtières, transportées par les courants induits par les vents, débordent du plateau et s'écoulent par gravité le long du talus. Ce flux est intensifié au niveau des canyons qui canalisent l'eau dense à des profondeurs de 200 à 1 000 m durant les hivers normaux et supérieures à 2 000 m les hivers plus rigoureux. **Ce processus, bien que local, induit une exportation rapide et massive d'eau et de matières (sédiments, matière organique, nutriments, polluants, déchets) d'origines continentale et côtière vers le domaine profond, et impacte directement les écosystèmes benthiques.** Les épisodes les

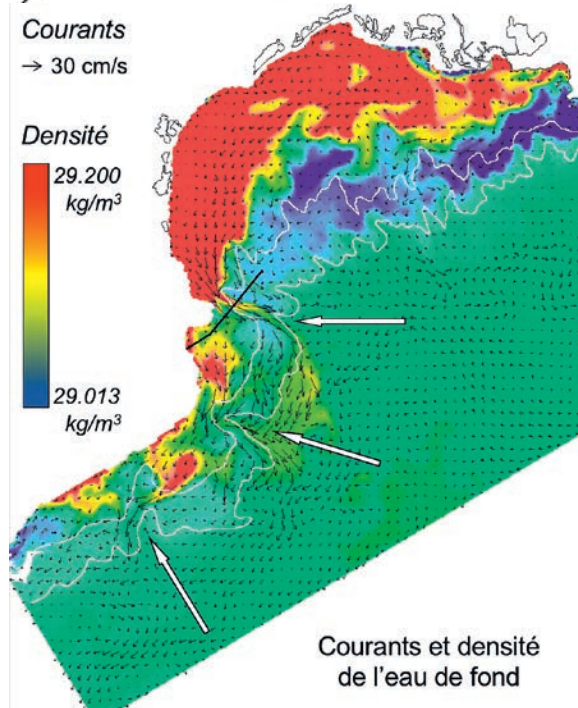
plus intenses interagissent avec la formation d'eau profonde dans la plaine abyssale et ont des répercussions sur l'hydrologie et la dispersion de ces matières sur l'ensemble de la Méditerranée occidentale. Comme pour les formations d'eaux denses au large, ce processus est sensible au changement climatique, et **les événements de formation et d'exportation d'eau dense côtière vers le domaine profond diminueraient avec un réchauffement des eaux de surface.** Le CEFREM assure depuis 25 ans le suivi à long terme des flux d'eau et de matières particulières dans plusieurs canyons du golfe et dans la plaine abyssale.

Contact (CEFREM) : X. Durrieu de Madron, demadron@univ-perp.fr



▲ Vue schématique de la production d'eau dense côtière, la formation d'un panache dense, son déplacement le long du plateau et sa plongée sur la pente ou via un canyon sous-marin. D'après Baines et Condie, 1998. Antarctic Research Series. 75: 29-49. DOI: 10.1029/AR075p0029

► Anomalie de densité potentielle et vitesse du courant simulée à 10 m au-dessus du fond pour l'évènement extrême de plongée d'eau dense du 13 mars 2005 dans le golfe du Lion et la marge catalane. Les flèches blanches indiquent les panaches d'eau dense chenalisés jusqu'à la base de la pente continentale via les canyons. D'après Ulses et al., 2008. Geophysical Research Letters. 35. L07610. DOI:10.1029/2008GL033257.



Courants et densité de l'eau de fond

ù a lieu la plongée des eaux de la circulation thermohaline méditerranéenne ?

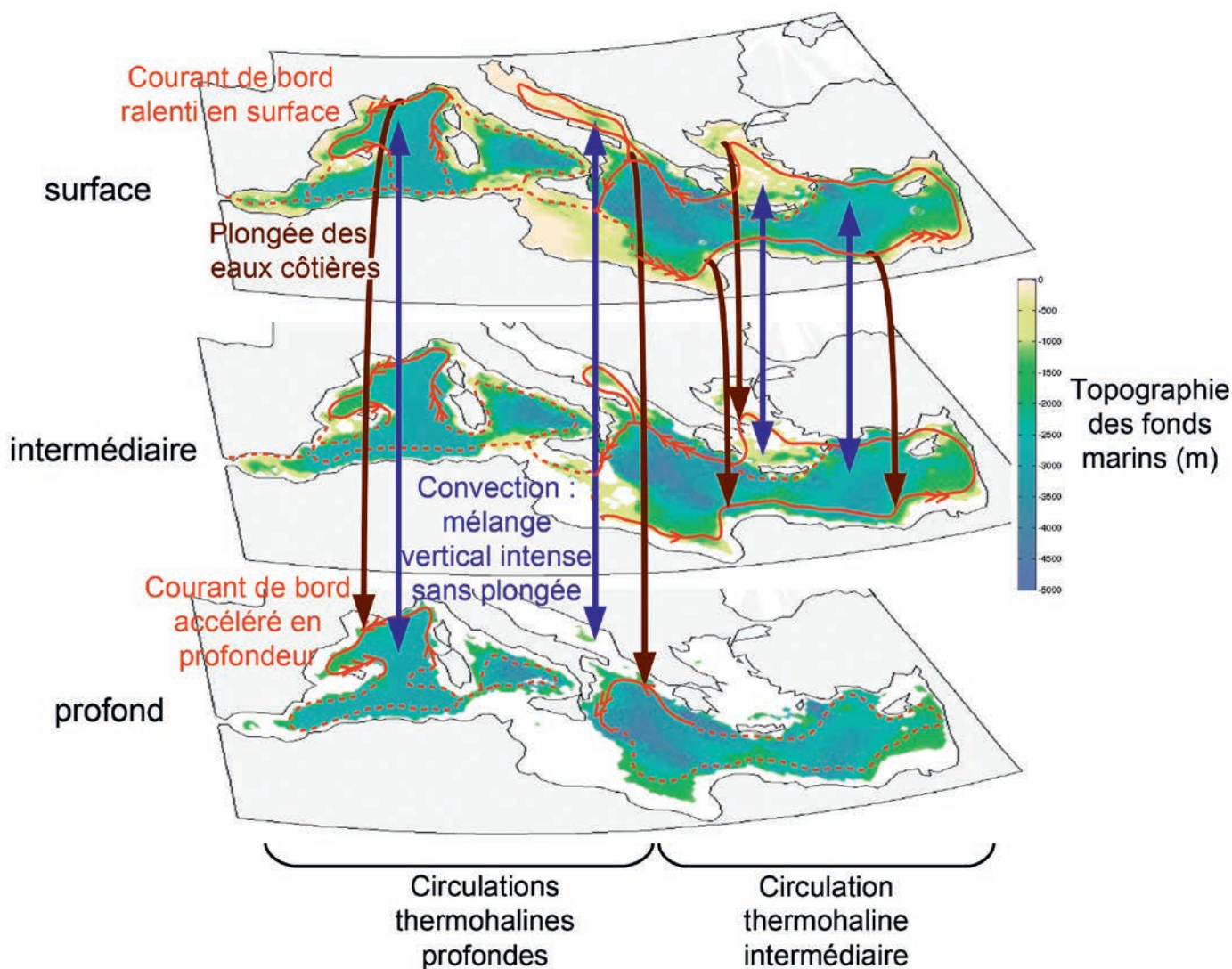
Depuis plus d'un demi-siècle, les études scientifiques ont montré la présence d'une circulation dite « thermohaline » en mer Méditerranée, à l'instar de l'océan planétaire dont elle peut être considérée, toutes proportions gardées, comme un modèle réduit. Cette circulation, qualifiée de « tapis roulant » océanique, est mise en mouvement par les différences de densité de l'eau de mer, c'est-à-dire de température (*thermo*) et de salinité (*haline*). À l'échelle du globe, elle a un rôle climatique clé puisqu'elle transporte vers les pôles les eaux chaudes de surface qui s'enfoncent en se refroidissant. Si sa vitesse venait à diminuer, son rôle de tampon, donc d'atténuateur du réchauffement climatique, en serait réduit d'autant. Observé depuis les années 1950, le réchauffement de la Méditerranée s'est récemment accéléré dans des proportions plus importantes que le reste

de l'océan global, accompagné d'une salinisation de ses eaux profondes. Analyser sa sensibilité au réchauffement global et comprendre sa circulation est donc fondamental, notamment la localisation des zones, rares et réduites, de convection océaniques, i.e. de plongée des eaux selon la vision communément admise.

Notre équipe a eu l'idée de croiser les sorties d'un modèle numérique de la mer Méditerranée et d'observations au large des côtes françaises pour déterminer où et comment a lieu cette plongée des eaux. Les résultats obtenus la situent à proximité de la côte, loin des zones de convection, localisées, elles, au large. Par notre étude, **de nouvelles zones clés de plongée des eaux sont révélées le long des côtes françaises, libyennes (les moins bien observées du bassin), égyptiennes et en mer Égée**, certaines très distantes des

sites de convection. Plus précisément, l'analyse physique montre le rôle déterminant joué par la rotation terrestre, qui interdit toute plongée des eaux loin de la côte. Cette contrainte, aussi durable que notre planète, implique que **les zones de convection ne seront jamais le siège de plongée des eaux, contrairement à la vision qui prévalait jusqu'à maintenant**. Nos résultats modifient ainsi la vision traditionnelle d'un « tapis roulant » s'enfonçant dans des zones de convection pour la remplacer par l'image d'un « anneau côtier plongeant » (cf. ci-dessous).

Contacts (CNRM) : R. Waldman, robin.waldman@meteo.fr, S. Somot, samuel.somot@meteo.fr et F. Sevault, florence.sevault@meteo.fr



▲ Schéma revisité de la circulation thermohaline méditerranéenne. Au niveau de son unique point de communication avec l'océan global, le détroit de Gibraltar, la circulation thermohaline méditerranéenne se caractérise par une entrée d'eau en surface et une sortie en profondeur. Les zones de convection, historiquement vues comme le siège de la plongée des eaux de cette circulation, ne sont en fait qu'un lieu de mélange vertical entre les masses d'eau de surface et profondes. À l'inverse, les courants de bord, présents dans presque tout le bassin, interagissent avec la côte et sont le siège principal de cette plongée des eaux. Ainsi, à mesure que les courants de bord s'enfoncent, ils s'affaiblissent en surface et s'intensifient en profondeur. Ne sont représentées ici que les trois principales circulations thermohalines, deux profondes et une intermédiaire, le reste de la circulation (tirets) n'étant pas détaillé.

D'après Waldman et al., 2018. Geophysical Research Letters. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL078502>

M odélisation des formations d'eaux profondes en Méditerranée nord-occidentale et impacts sur les écosystèmes planctoniques

Le mécanisme de brassage des eaux lié aux vents forts, largement décrit précédemment, s'intensifie au cours de l'hiver pour conduire, lorsque l'automne et l'hiver sont rigoureux, à une homogénéisation de toute la colonne d'eau (~2 500 mètres de profondeur) et sur une surface atteignant 50 000 km². Les propriétés de l'eau (température, salinité, concentration en éléments dissous) sont alors quasiment identiques de la surface au fond. Ce processus est conséquent, aussi bien pour les systèmes profonds qui reçoivent massivement l'oxygène atmosphérique et la matière organique contenus dans les couches superficielles, que pour les systèmes de surface qui s'enrichissent significativement en éléments nutritifs tels que nitrates, phosphates et silicates. Au printemps, lorsque le brassage vertical s'arrête, les organismes phytoplanctoniques restent en surface exposés à la lumière. Les conditions sont alors remplies pour donner lieu à une efflorescence phytoplanctonique (on parle de « bloom printanier »), base des chaînes alimentaires, dont l'ampleur est inégale dans le reste de la Méditerranée.



▲ L'opération DeWEX au cours de l'hiver 2012-2013 (bandeau supérieur) a combiné des approches par plateformes autonomes de types bouées dérivantes, gliders (photographies à droite et à gauche du bandeau inférieur) et des campagnes de prélèvements à bord de navires océanographiques (photographie centrale du bandeau inférieur; mise à l'eau d'une rosette de 12 bouteilles Niskin). © Conan Pascal

La question de l'impact du changement climatique sur ces formations d'eau dense et les processus chimiques et biologiques qui en découlent, est cruciale pour le devenir des écosystèmes marins de Méditerranée occidentale. Les problématiques environnementales actuelles d'acidification, d'oligotrophisation (augmentation de la stratification et appauvrissement biologique des couches de surface), et de désoxygénation des eaux profondes (anoxie et création de zones mortes) sont pour partie directement reliées à ces processus hydrodynamiques. Pour comprendre les interactions atmosphère/océan et l'impact des formations d'eau dense sur les écosystèmes méditerranéens, le consortium DeWEX* a réalisé un intense effort d'observation en 2012-2013. Une approche multiplateforme combinant aéronefs, ballons, navires, mouillages, flotteurs et gliders a débouché sur une meilleure compréhension d'une part, de l'évolution des masses d'eau en réponse au vent et du rôle joué par les structures physiques telles que tourbillons et fronts qui se développent à l'échelle kilométrique et, d'autre part, de la variabilité de la répartition des éléments nutritifs et de la dynamique associée de l'écosystème pélagique. Cette approche a amélioré considérablement la paramétrisation et la vérification des modèles numériques.

Contacts : C. Estournel (LA), claud.e.stournel@aero.obs-mip.fr et P. Conan (LOMIC), conan@obs-banyuls.fr

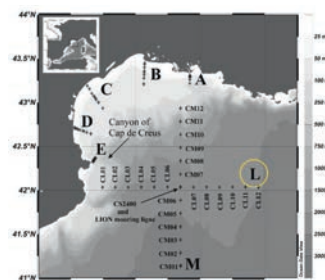
* DeWEX : Impacts of deep water formation on mediterranean pelagic ecosystems.

S équestration du CO₂ anthropique dans la zone de convection profonde au nord de la Méditerranée occidentale

Un des objectifs du projet européen MEDSEA était d'étudier l'impact de la zone de convection profonde la plus active de la Méditerranée (golfe du Lion) sur le cycle du carbone anthropique. Les mesures réalisées à bord d'un navire océanographique (campagne CASCADE) durant l'hiver 2011, nous ont permis de comparer les profils verticaux de différentes propriétés échantillonnées dans des conditions stratifiées ou après/pendant un événement de convection (cf. carte ci-dessous). Les résultats montrent qu'une grande quantité de CO₂ anthropique (C_{ANTC}) est rapidement transférée dans la couche d'eau la plus profonde lors d'événements de convection profonde (cf. graphique ci-contre). La concentration de CO₂ anthropique dans la colonne d'eau augmente avec la densité et la teneur en oxygène de l'eau. La convection profonde dans le golfe du Lion, parallèlement au cascading le long de la pente continentale, pourrait ainsi expliquer les niveaux très élevés de CO₂ anthropique observés — et donc l'acidification — des couches profondes de la Méditerranée occidentale.

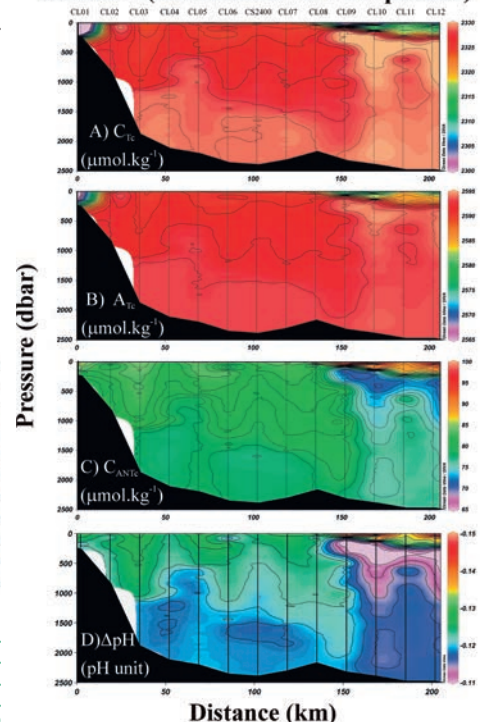
Contacts : F. Touratier (ESPACE-DEV), touratier@univ-perp.fr, C. Goyet (ESPACE-DEV), cgoyet@univ-perp.fr et X. Durrieu de Madron (CEFREM), demadron@univ-perp.fr

Plus d'informations :
Projet MEDSEA (Mediterranean Sea Acidification in a changing climate) : <http://medsea-project.eu/>
Campagne CASCADE (CAscading, Surge, Convection, Advection and Downwelling Events) : <https://urlpetite.fr/y8b>



► Distribution des propriétés pour la section L.
A) Concentration du carbone inorganique dissous total (CTC, $\mu\text{mol.kg}^{-1}$).
B) Concentration de l'alcalinité totale (ATC, $\mu\text{mol.kg}^{-1}$).
C) Concentration du CO₂ anthropique (CANTC, $\mu\text{mol.kg}^{-1}$).
D) Acidification depuis l'ère préindustrielle (ΔpH)

Section L (calculated from CTD profiles)



D'après Touratier et al., 2016. Deep-Sea Research. 113: 33-48. DOI:10.1016/j.dsr.2016.04.0003

Couplage « météorologie/océanographie » : exemple des crues cévenoles

HyMeX, un programme de recherche sur les épisodes méditerranéens de pluie intense et crues éclair

L'objectif principal du programme international de recherche HyMeX (*Hydrological cycle in the Mediterranean experiment*) est de mieux comprendre le cycle de l'eau en Méditerranée et les événements hydrométéorologiques à forts impacts associés, tant en termes de prévisibilité, d'évolution avec le changement climatique que de vulnérabilité socio-économique et de capacité d'adaptation des territoires et des populations face à ces événements extrêmes. Les épisodes de pluie intense et crues éclair, qui affectent régulièrement le pourtour méditerranéen, sont au cœur d'HyMeX. La stratégie du programme pour étudier ces phénomènes a consisté à observer et à modéliser le système « atmosphère / mer / surfaces continentales » à des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs années. Une grande campagne internationale de mesures, avec des observations en mer, sur terre et dans les airs, a notamment été organisée en France, Espagne et Italie à l'automne 2012 pendant deux mois. Pour l'observation des crues éclair, les mesures hydrologiques ont été répétées pendant plusieurs automnes sur les bassins cévenols, et des mesures et enquêtes sociologiques et hydrologiques sont réalisées sur le terrain après des événements majeurs. Ces observations sont exploitées pour améliorer notre connaissance des processus impliqués dans la formation de ces événements et pour progresser dans leurs modélisations et prévisions. Ce programme, coordonné par Météo-France et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), a été lancé en 2010 pour une durée de 10 ans dans le cadre du chantier multi-organisme* MISTRALS. La communauté scientifique impliquée dans HyMeX compte plus de 350 scientifiques d'une vingtaine de pays dans les domaines de l'océan, de l'atmosphère, des surfaces continentales, des sciences humaines et sociales. **Le programme a déjà produit de nombreux résultats avec plus de 400 articles dans des revues scientifiques internationales publiés à ce jour.**



▲ Installation de nouveaux capteurs dans le cadre d'HyMeX sur la bouée fixe de Météo-France dans le golfe du Lion. © CNRM

Contact (CNRM) :

V. Ducrocq, veronique.ducrocq@meteo.fr

Plus d'informations :

HyMeX : www.hymex.org

MISTRALS (*Mediterranean integrated studies at regional and local scales*) : www.mistrals-home.org

* Collaborateurs : les principaux laboratoires et organismes de recherche d'Occitanie sont les UMR CNRM, IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), LA, LEGOS, HSM et CEFREM, l'IMT Mines Alès ainsi que les universités de Toulouse et de Montpellier.

Inondation et submersion en zone littorale

En automne et en hiver, la Méditerranée nord-occidentale fait face à des tempêtes qui soufflent d'est et induisent des précipitations intenses à l'origine des crues cévenoles dites « crues éclair » parfois de grande ampleur. Un autre phénomène illustre ces événements : la « surcote », une montée rapide du niveau de la mer qui devient très conséquente dans les régions littorales de très faible altitude où la submersion du littoral met en danger les populations, les infrastructures et les plages. Plusieurs mécanismes se conjuguent souvent pour produire les fortes surcotes : chute de la pression atmosphérique, marée, vent et vagues. Une chute de la pression atmosphérique de 1 hectopascal (1 millibar) entraîne une augmentation du niveau de la mer d'environ 1 centimètre. On observe fréquemment des chutes supérieures à 30 millibars. Au cours d'un cycle de marée, le niveau de la mer varie de 20 cm sur le golfe du Lion. Le vent lorsqu'il souffle contre la côte, comme c'est souvent le cas lors des tempêtes sur les côtes du Languedoc et du Roussillon, crée une accumulation d'eau avec une montée du niveau de la mer additionnelle d'environ 10 cm. Enfin, le mécanisme le moins documenté est lié au déferlement des vagues. Celles-ci se forment à plusieurs centaines de kilomètres du golfe du Lion, leur hauteur augmente le long de leur trajet pouvant atteindre de 6 à 10 mètres sur le golfe. À proximité de la côte, lorsque la profondeur diminue, les vagues ne pouvant plus se propager librement, déferlent, s'ajoutant alors à la montée du niveau moyen de la mer, dans certains cas de plusieurs dizaines de centimètres. **La montée du niveau de la mer peut créer une submersion de la côte mais elle peut également ralentir l'écoulement des fleuves en crue et en accroître le débordement. La prévision de ces événements est encore très**

difficile car cela nécessite de prendre en compte avec précision l'ensemble de ces mécanismes. Le LA met au point les outils nécessaires à cette modélisation, déjà testés dans le cadre du projet Crue-Sim*, sur la région de l'embouchure de la Têt dans les Pyrénées-Orientales (cf. ci-dessous).

Contact (LA) : C. Estournel, claude.estournel@aero.obs-mip.fr

* Projet « Transport de l'eau et de matière depuis les bassins versants jusqu'à la mer dans les systèmes Méditerranéens caractérisés par des crues éclair » (CRUE-SIM) soutenu par le RTRA STAE (Réseaux thématiques de recherches avancées Sciences et Technologies pour l'aéronautique et l'espace).



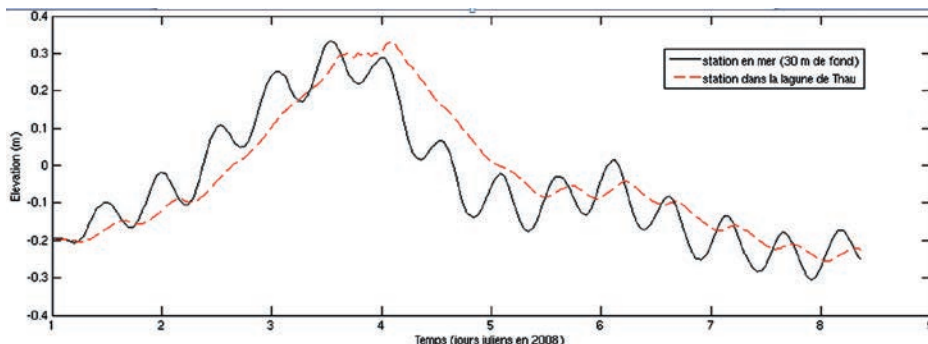
▲ **Modélisation d'inondation par débordement de la Têt (Pyrénées-Orientales) et par submersion marine.** Les couleurs indiquent les zones recouvertes d'eau. Dans ce cas, les zones inondées correspondent principalement à l'ancien lit de la Têt et à des zones non constructibles entre l'ancien lit et le lit actuel.
© P. Marsaleix/Laboratoire d'Aérodynamique

Échanges entre la lagune de Thau et la mer ouverte : le rôle de la marée et des tempêtes

La marée astronomique est en général considérée comme un processus négligeable en Méditerranée. Elle régule toutefois les échanges réguliers entre des lagunes côtières comme celle de Thau et la mer ouverte. Ces échanges sont étudiés grâce à des suivis à

haute fréquence, à l'aide de courantomètres acoustiques fonctionnant sur le principe de l'effet Doppler et de sondes multi-paramètres, disposés en mer, dans la lagune et dans les canaux de Sète. Un modèle numérique couplant un modèle hydrodynamique (Symphonie) et un

modèle biogéochimique (Eco3m-s) est également développé dans le cadre d'une thèse portant sur l'impact des événements extrêmes. En effet, **en plus de la marée, lors des épisodes de tempêtes, les différences de niveau entre la mer et la lagune peuvent induire des remplissages importants puis des vidanges brutales de la lagune faisant de celle-ci une lagune au très fort caractère marin.** Une modélisation à très hautes résolution et précision du niveau de l'eau est nécessaire pour bien représenter ces échanges (cf. ci-contre). Elle doit prendre en compte tous les effets, que ce soit la marée astronomique mais aussi ceux de baromètre inverse et impact des vents, des courants et des vagues.



▲ **Élévation de la surface libre (m) simulée en fonction du temps en deux stations, l'une en mer, l'autre dans la lagune entre le 01/01/08 à 0h et le 08/01/08 à 12h.** D'après Leredde Y., 2011. *Apports de l'océanographie physique côtière à la caractérisation des risques littoraux. Mémoire HDR UM2. 122p.* www.gm.univ-montp2.fr/IMG/pdf/HDR-leredde-2011.pdf

Contacts (GM) : Y. Leredde, yann.leredde@umontpellier.fr et R. Caillibotte, remi.caillibotte@gm.univ-montp2.fr

Comprendre les causes de la hausse du niveau de la mer et en prédire les impacts côtiers dans le futur

Au cours du XX^e siècle, les marégraphes indiquent que la mer s'est élevée à la vitesse moyenne de $1,5 \pm 0,4$ mm/an. Depuis le début des années 1990, cette hausse atteint $3,2 \pm 0,4$ mm/an en moyenne globale avec une forte variabilité régionale, comme le montrent les observations des satellites altimétriques, qui, depuis 1992, sont devenus des compléments indispensables aux marégraphes (cf. fig. 1). La hausse du niveau de la mer résulte essentiellement du réchauffement de l'océan et de la fonte des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires) en réponse aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. **Le réchauffement de l'océan est principalement responsable de la variabilité régionale de la hausse du niveau de la mer.** Les modèles de climat indiquent que le niveau de la mer va continuer à augmenter

dans le futur. **Pour la période 2081-2100, les modèles prédisent une élévation moyenne de 26 à 81 cm** (relativement à la période 1986-2000) selon les scénarios de réchauffement futur, avec une fourchette d'incertitude de ± 15 cm due à l'imperfection des modèles. Une importante variabilité régionale (± 30 % de la moyenne globale) sera superposée à l'élévation moyenne globale (cf. fig. 2).

Il y a encore de nombreuses incertitudes sur les processus en jeu dans les variations du niveau

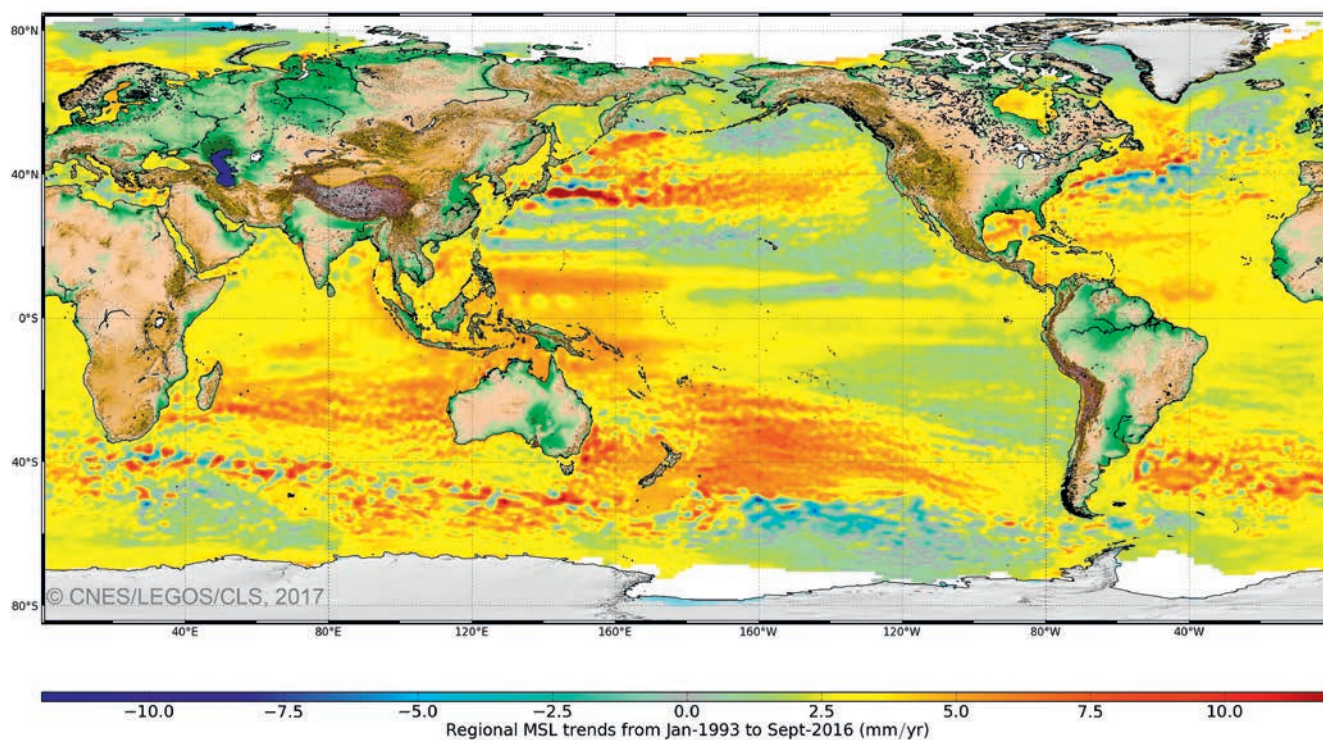
de la mer. Le LEGOS travaille activement avec les données satellites du CNES et de CLS pour mieux comprendre ces processus. La simulation de ces processus est améliorée dans les modèles de prévision océanique avec Mercator Océan et dans les modèles de climat avec Météo-France et le CERFACS. L'objectif est d'affiner les projections du niveau de la mer future pour en prévoir les impacts et préparer l'adaptation des côtes. Le LEGOS travaille avec CLS et le BRGM, en coopération avec les communautés côtières, sur l'impact et l'adaptation à la hausse du niveau de la mer.

Contacts : B. Meyssignac (LEGOS), benoit.meyssignac@legos.obs-mip.fr, G. Larnicol (CLS) glarnicol@cls.fr, D. Salas y Mélia (CNRM), david.salas@meteo.fr, A. Melet (Mercator Océan International), angelique.melet@mercator-ocean.fr, N. Picot (CNES), nicolas.picot@cnes.fr, G. Le Cozannet (BRGM), g.lecozannet@brgm.fr et L. Terray (CERFACS), laurent.terray@cerfacs.fr

Plus d'informations :

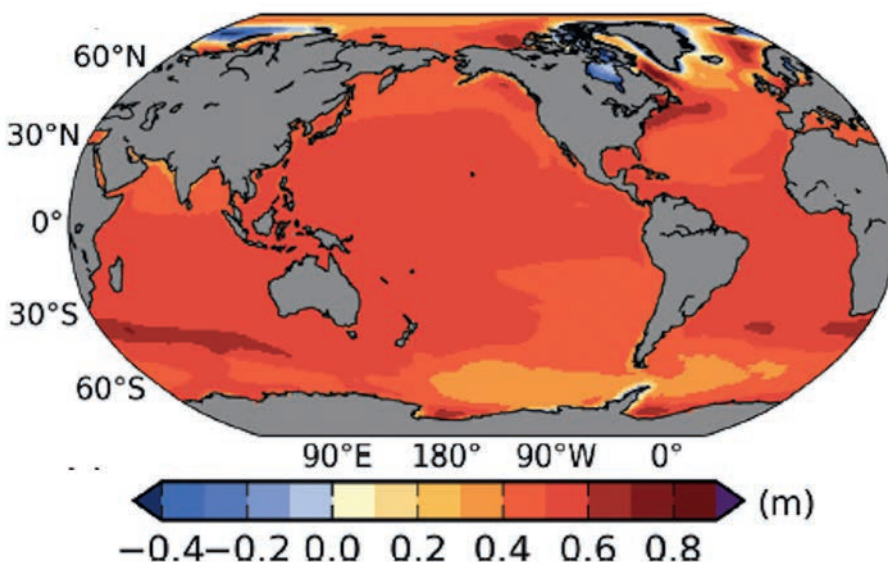
www.avisio.altimetry.fr

www.cerfacs.fr/avbp7x/index.php



▲ Fig. 1. Vitesse de la hausse du niveau de la mer observée par satellites depuis 1993.

► Fig. 2. Projection du niveau de la mer en 2086-2100 par rapport à 1986-2100 pour un scénario d'émission de gaz à effet de serre moyen. Source : Church et al., 2013. Sea level change. In: Stocker et al. (eds.) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.



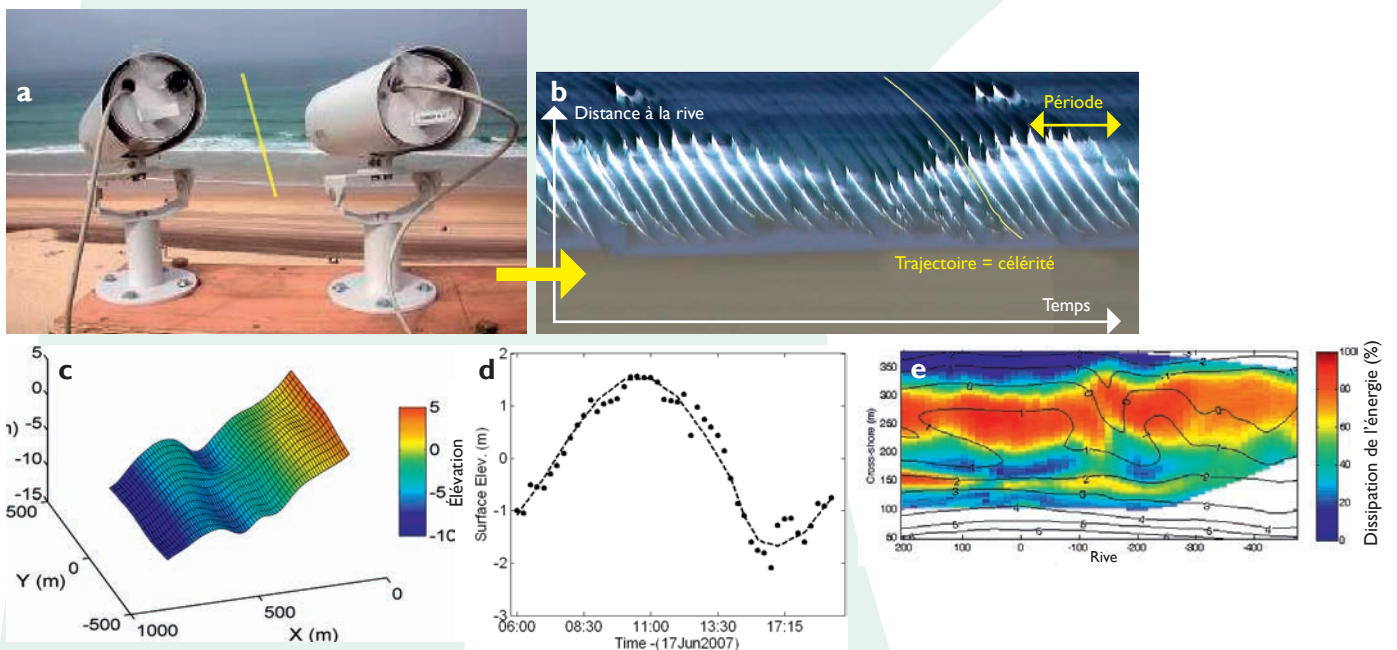
PRÉVOIR LA SURCOTE ET LES RISQUES DE SUBMERSION PAR ASSIMILATION DE DONNÉES VIDÉO

La surcote océanique est un phénomène complexe dépendant des conditions atmosphériques (vent, pression atmosphérique) et des conditions de houle (*wave setup*). Si l'ensemble de ces composantes est désormais plutôt bien maîtrisé par les prévisionnistes dans la zone proche littorale, l'effet de ces niveaux d'eau extrêmes et leur impact sur le littoral sont encore difficiles à modéliser. L'une des principales difficultés vient notamment du manque d'information sur la bathymétrie qui est à la fois une condition initiale primordiale à laquelle le modèle numérique va être très sensible et un paramètre à déterminer dans un milieu ultra dynamique qu'est la zone proche littoral. La technologie vidéo permet de mesurer en continu l'évolution d'une plage et de caractériser différentes parties du profil de plage (zone de levée, de surf et de jet de rive, plage émergée). L'ensemble du profil peut être ensuite décrit par association de toutes ces informations. Cependant, les informations obtenues de la vidéo ne sont que des « proxys » reliant par exemple la dynamique des vagues à la bathymétrie par des méthodes d'inversion. La physique des vagues en eaux peu profondes étant typiquement non linéaire, l'inversion de ces proxys nécessite des informations disponibles

uniquement par le modèle. En réponse, l'assimilation de données permet de combiner des informations hétérogènes et incertaines provenant du modèle et des observations pour une estimation plus fiable de la bathymétrie sous-jacente. Les méthodes d'assimilation de données peuvent ainsi être utilisées afin de constituer des jeux de bathymétrie réguliers et exploitables pour un suivi continu de l'évolution morphologique des plages. Le projet OPTIBAT* vise à intégrer de manière dynamique ces techniques d'assimilation dans un modèle hydrodynamique, afin de corriger la bathymétrie et certains paramètres hydrodynamiques à chaque fois qu'une observation est disponible, conduisant ainsi à un système opérationnel d'assimilation dynamique. Tout ceci permet d'améliorer grandement la prévision des phénomènes de submersions marines.

Contacts : Y. Soufflet (Waves'n See), yves.soufflet@wavesnsee.com, R. Benshila (LEGOS), rachid.benshila@legos.obs-mip.fr, R. Almar (LEGOS), rafael.almar@legos.obs-mip.fr et E. Simon (IRIT), ehouarn.simon@enseeiht.fr

* Projet OPTIBAT : Recherche optimale pour la bathymétrie littorale.



▲ Collecte de données à partir d'observations vidéo. © R. Almar/UMR LEGOS/IRD

a. Extraction de Timestack : image composite formée par une ligne de pixels extraite de chaque image vidéo.

b. Mesure de la période et de la célérité par détection des crêtes de vagues

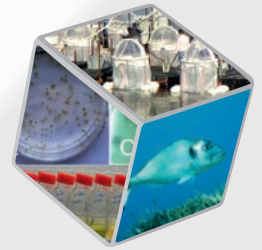
c. et d. Estimation de la bathymétrie et de niveau de l'eau.

e. Dissipation de l'énergie des vagues.

Selon les régions, une hausse du niveau de la mer de 26 à 81 cm est attendue à la fin du 21^e siècle du fait du réchauffement climatique.



Biodiversité et dynamique des communautés biologiques en milieu marin



Les mers et les océans couvrent 70 % de la surface du globe et présentent des habitats qui sont, au point de vue biologique, riches et extrêmement variés, allant des eaux côtières peu profondes aux fosses abyssales représentant ainsi un important réservoir de biodiversité.

L'Organisation des Nations Unies a proclamé 2010 « année internationale de la biodiversité » pour alerter l'opinion publique sur l'état et les conséquences du déclin de la biodiversité dans le monde. Les connaissances sur la biodiversité marine sont encore très incomplètes, en particulier dans les grandes profondeurs de l'océan. Cela résulte de la difficulté d'observer la faune et la flore marine (la lumière et la plupart des ondes pénétrant peu ou pas dans l'eau de mer) et du coût très élevé des campagnes en mer (d'autant que ce milieu en trois dimensions, pouvant dépasser les 1 000 m de profondeur, est immense). Ce monde reste donc secret et mystérieux et les atteintes à la biodiversité peuvent passer plus facilement inaperçues. Le milieu marin se caractérise aussi par l'absence de barrières et la facilité de dispersion des organismes. Ainsi, de nouvelles espèces sont découvertes au fur et à mesure que l'exploration des océans se poursuit.

Plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui à moins de 60 km le long des 1,6 million de kilomètres de côtes qui bordent les mers et les océans, et ce chiffre pourrait atteindre 75 % en 2020. L'accroissement des pressions anthropiques sur l'océan, et particulièrement sur le littoral ne cesse de s'intensifier et a sérieusement dégradé la biodiversité marine. Aujourd'hui, environ 275 000 espèces ont été recensées dans les mers et les océans, soit 15 % de la biodiversité totale de la planète. Cette biodiversité, qui est le produit de plusieurs milliers d'années d'évolution, constitue un patrimoine naturel et une ressource vitale dont l'humanité dépend. Beaucoup de ces espèces sont indispensables au bien-être des humains, soit directement comme ressource vivrière clé (au travers de la pêche et l'aquaculture), soit indirectement pour maintenir le bon fonctionnement des écosystèmes marins et des services qu'ils produisent pour la biosphère, dont l'humanité.

La biodiversité désigne à la fois la variabilité au sein des organismes vivants d'une même espèce (diversité génétique, physiologique ou biologique), mais aussi le nombre et la proportion des espèces qui composent une communauté et enfin les écosystèmes (littoraux, de plateau ou hauturiers) d'une zone géographique donnée. Face à des pressions naturelles et anthropiques, la perte de diversité génétique affaiblit la capacité d'une espèce à s'adapter, la perte du nombre d'espèces affaiblit la capacité d'une communauté biologique, voire d'un écosystème, à résister aux impacts anthropiques et aux changements environnementaux et ainsi la capacité d'adaptation de la biosphère toute entière.

La biodiversité joue donc un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes marins et contribue à de nombreux services écosystémiques. La richesse locale des espèces peut améliorer la productivité des écosystèmes et leur stabilité (capacité à supporter des perturbations récurrentes). De ce fait, la perte de biodiversité pourrait avoir de graves conséquences non seulement sur le plan économique et sur l'approvisionnement des populations humaines en produits de la mer, mais aussi sur les services supports de l'océan (par exemple sa contribution clé au cycle de l'eau), ses services de régulation (notamment pour son rôle central dans la séquestration du CO₂) ou ses services culturels (comme le tourisme).

La Méditerranée nord-occidentale, et plus particulièrement le golfe du Lion, constitue un point chaud de cette biodiversité du fait de la richesse des habitats (lagunes, plateau, canyons) et d'une région très productive liée à l'estuaire du Rhône. Cependant, le littoral de la région Occitanie, avec ses 220 km de rivages, est aussi en première ligne face aux conséquences du dérèglement climatique : sécheresse et inondation, érosion du trait de côte, risque de submersion provoqué par la montée des eaux et les autres impacts anthropiques, comme la pollution marine (plastiques, métaux lourds, composés chimiques persistants) ou la surpêche... Dans le même temps, l'attractivité du littoral Occitanie suscite un élan démographique très important. Plus de la moitié de la croissance de la population de la région se concentre sur le littoral, ce qui en fait l'un des territoires les plus dynamiques de France. Avec plus de 50 000 nouveaux habitants chaque année, la région verra sa population globale augmenter de 800 000 personnes d'ici 2030. À cette population s'ajoutent 8 millions de touristes en période estivale, ce qui constitue un facteur de pression additionnel sur le milieu marin.

De nombreuses équipes de recherche de la région Occitanie sont mobilisées depuis de nombreuses années pour étudier la biodiversité exceptionnelle de ce territoire, que ce soit en milieu terrestre ou en milieu marin. Pour sa composante marine, plusieurs équipes travaillent sur le fonctionnement des écosystèmes marins de la Méditerranée française et de leurs réponses aux variations environnementales. L'ensemble du spectre du vivant est couvert par ces équipes, des communautés microbiennes à la mégafaune, en passant par les espèces cibles (ou modèles), notamment des espèces exploitées emblématiques de ce territoire. Ces équipes développent des outils d'investigation ou de suivi tout à fait originaux, ainsi que des plateformes d'expérimentation originales.

**Jean-Marc Fromentin (Ifremer, UMR MARBEC),
Catherine Aliaume (UM, UMR MARBEC) et
Philippe Lebaron (Sorbonne Université, CNRS, USR LBBM)**

Structure, dynamique et fonctionnement des communautés

Dynamique et diversité des habitats coralligènes et des herbiers de posidonie en Méditerranée

Les prairies de posidonie et les récifs coralligènes sont les habitats sous-marins côtiers les plus riches en biodiversité de Méditerranée. Les 1 700 km de côtes françaises méditerranéennes abritent 72 641 ha de posidonie et 2 661 ha de récifs coralligènes*. Depuis 2010, 96 et 83 sites sont suivis tous les 3 ans respectivement par les réseaux de surveillance TEMPO (posidonie) et RECOR (coralligène) portés par Andromède Océanologie avec l'aide de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. L'analyse de quadrats photographiques issus de RECOR (tâche d'observation « coralligène » de l'Observatoire des Sciences de l'Univers [OSU] OREME) montre que les diversités fonctionnelle et phylogénétique des récifs coralligènes augmentent à mesure que l'on se rapproche de la surface. Toutefois, plus les sites sont profonds et plus les assemblages d'espèces sont différents entre eux, notamment entre -50 et -70 m où les différences sont les plus fortes. Plus de 68 % des habitats coralligènes sont soumis à des pressions cumulées

moyennes à fortes (10 pressions considérées, cf. ci-dessous). En utilisant les données AIS (système d'identification automatique) permettant aux bateaux de s'identifier et de se localiser, on montre que **près de 30 % des fonds côtiers subissent l'impact des ancres de grands navires, les herbiers sous-marins à posidonie étant les plus impactés en termes de durée**. L'herbier à posidonie est l'habitat qui subit le plus fort cumul de pressions au niveau de la côte. En

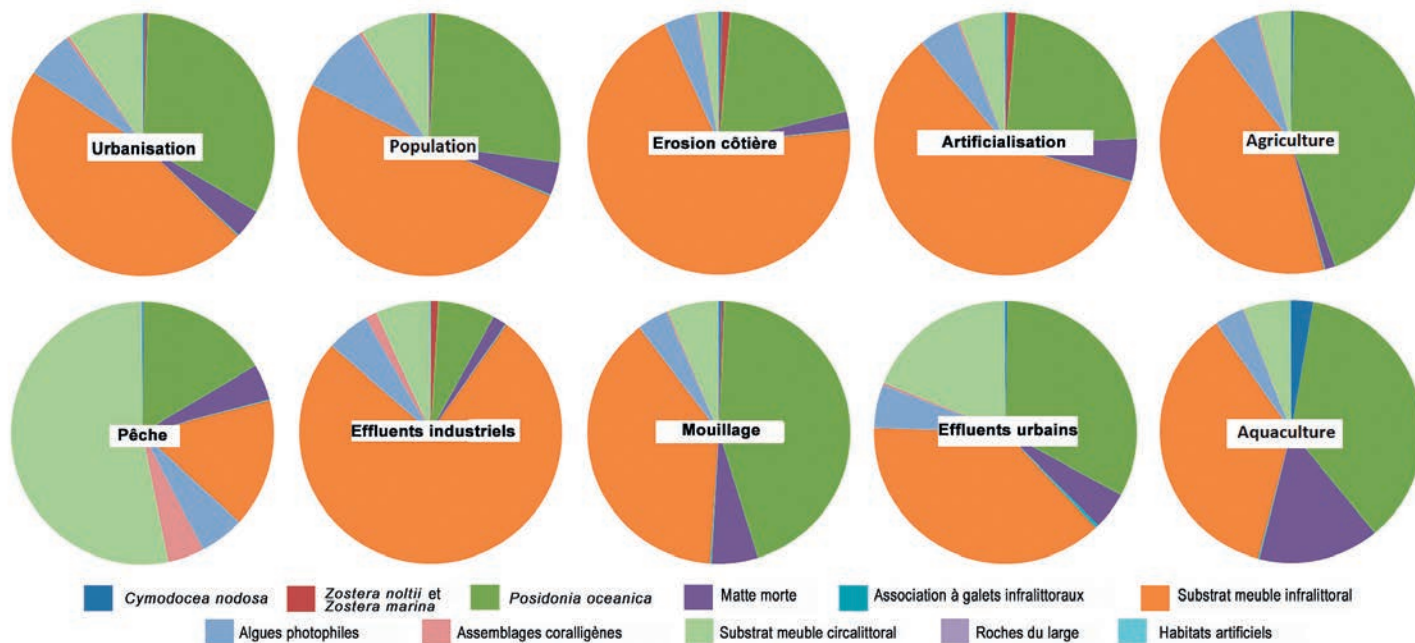
Provence-Alpes-Côte d'Azur (200 km de littoral), la comparaison de photographies aériennes des années 1920 (avant toute artificialisation de la côte) à des images actuelles montre que **73 % des herbiers (entre 0 et 15 m de profondeur) ont régressé, représentant une perte en surface couverte de 13 %**. Des indices paysagers sont désormais recherchés pour mettre en relation configuration et dynamique des herbiers**.

Contacts : J. Deter (Andromède Océanologie/ISEM/LabCom InToSea), julie.deter@andromede-ocean.com, F. Holon (Andromède Océanologie), florian.holon@andromede-ocean.com et F. Houngnandan (ISEM), fabrice.houngnandan@umontpellier.fr

Plus d'informations sur la plateforme cartographique Medtrix portée par l'association « l'œil d'Andromède » : www.medtrix.fr

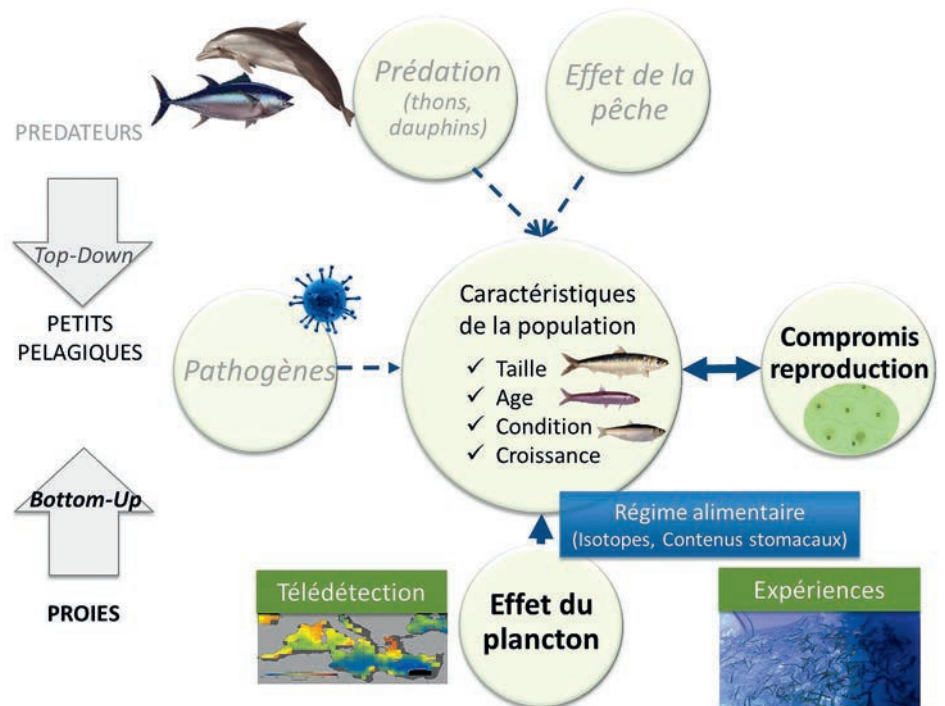
* Cartographie réalisée dans le cadre de la thèse de F. Holon avec Andromède Océanologie : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01279487v1>
** Thèse Région Occitanie/ Agence de l'eau en cours.

▼ **Répartition de la valeur totale de pressions cumulées en fonction des habitats sous-marins côtiers.** Chaque graphe indique la répartition (pourcentage) de la valeur totale de pressions cumulées (somme de toutes les mailles de 20 x 20 m concernant chaque pression) pour chaque pression (nom indiqué dans le rectangle blanc en fonction des habitats. D'après Holon et al., 2015. Plos One.



Pourquoi les anchois et les sardines du golfe du Lion disparaissent de vos étals ?

Les captures de sardines et d'anchois ont très fortement diminué ces dernières années dans le golfe du Lion, alors que ces deux espèces étaient de loin les plus importantes pour les pêcheurs. Pourtant, les poissons n'ont pas disparu, leur nombre a même augmenté. Pourquoi ces deux espèces disparaissent-elles de vos étals, alors ? La faute, à la taille des poissons. En effet, les sardines et les anchois sont bien plus petits et plus maigres qu'auparavant et leur prix d'achat n'est plus suffisant pour les pêcheurs pour faire face à leurs coûts, ils ont donc arrêté de les pêcher, se tournant vers d'autres espèces. Mais comment expliquer ces changements de taille et de condition des poissons ? Si les poissons grandissent moins vite, nos études ont également montré qu'ils meurent plus jeunes, conduisant à une population composée uniquement de jeunes individus (0 à 2 ans), alors qu'ils peuvent vivre jusqu'à 6 ou 7 ans normalement. **Cette mortalité accrue n'est due ni à la pêche, ni à la pression de prédation des thons ou des dauphins qui reste très faible, ni même à des pathogènes. Il semblerait qu'on ait plutôt à faire à une modification de leur alimentation.** Les sardines et les anchois consomment actuellement des proies (du plancton) plus petites qu'avant, expliquant leur faible croissance et leurs faibles réserves énergétiques. Toutefois, les poissons continuent d'investir fortement leur énergie dans la reproduction, ce qui pourrait expliquer la surmortalité des adultes. Afin de mieux comprendre pourquoi leur alimentation



a changé, nous retraçons actuellement le climat, les paramètres océanographiques et le plancton des 25 dernières années. En parallèle, nous menons un travail expérimental en bassin, afin de comprendre les conséquences écophysiologiques d'un changement d'alimentation pour ces poissons. Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet MONALISA (FEAMP*, mesure 28), financé par l'Europe, la France et France Filière Pêche.

▲ Schéma récapitulatif des principales causes potentielles liées à la mauvaise condition des sardines méditerranéennes.

© Claire Saraux/MARBEC.

Contact (MARBEC) :

C. Saraux, claire.saroux@ifremer.fr

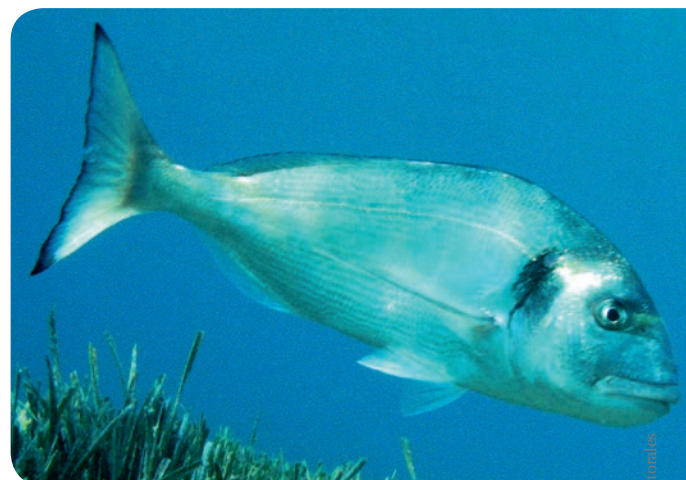
* Fonds européen pour les affaires maritimes et la pêche.

Cycle de vie et habitats clés de la dorade royale

La dorade royale est un poisson hermaphrodite (d'abord mâle puis femelle). Son exploitation en Occitanie remonte à plus de 2500 ans, avec de fortes implications socio-économiques puisque la plupart des dorades sauvages consommées en France provient de nos criées. Pourtant, il n'y a toujours pas de gestion locale des captures de ce poisson emblématique, essentiellement par manque de connaissances concernant son cycle de vie et ses habitats clés dans le golfe du Lion. Pour combler ce manque, près de 400 dorades (larves, juvéniles et adultes mâles et femelles) ont été récoltées depuis 2008, en mer et à l'entrée de quatre lagunes contrastées du littoral languedocien. En exploitant au mieux l'information physiologique (taux de croissance) et environnementale (masses d'eaux fréquentées) stockée tout au long de la vie dans leurs « pierres d'oreille » (otolithes), nous espérons pouvoir enfin relier la structure génétique et les habitats de vie de la population locale à la probabilité pour ses individus d'atteindre l'âge adulte et de contribuer à la génération suivante, comme mâle puis comme femelle. Nos analyses ont déjà permis de confirmer l'existence de deux zones de pontes distinctes pour la population

locale et de préciser le déterminisme (génétique et/ou environnemental) de la croissance des individus et ses conséquences sur la survie et la reproduction. Ceci a montré **le rôle central des lagunes pour le renouvellement du stock pêché en mer, sa productivité et sa diversité génétique : plus de 80 % des dorades adultes ont passé leur première année en lagune, où la croissance est souvent plus élevée, avec des conséquences sur l'âge de maturité sexuelle et sur le changement de sexe.** Cette connaissance rendra possible une gestion plus

durable du stock, fondée sur des données biologiques fiables et sur la connaissance des habitats littoraux à préserver pour le maintien de cette espèce emblématique dans la région.



▲ © Sébastien Villeger

Contact (MARBEC) :

A. Darnaude, audreya.darnaude@cnrs.fr

Plus d'informations sur le projet Boucledor (projet Chercheur d'avenir, Fonds européen de développement régional-Région Languedoc-Roussillon) : www.boucledor-project.com

SUIVI ÉLECTRONIQUE DE LA MÉGAFAUNE MARINE EN MÉDITERRANÉE NORD-OCCIDENTALE

L'acquisition de connaissances biologiques relatives à l'utilisation de l'espace au cours du cycle de vie d'une espèce exploitée ou subissant les effets de la pêche est indispensable pour optimiser l'efficacité des mesures de gestion à mettre en place. Or, la compréhension du cycle de vie des poissons marins pose un sérieux défi scientifique, car l'observation en continu en mer est difficile et coûteuse. L'émergence du marquage électronique bouscule ce contexte, en permettant de suivre les trajectoires individuelles de poissons, tortues, mammifères ou oiseaux marins, et d'étudier comment ces animaux réagissent aux variations environnementales d'origine naturelle (comme le phénomène *El Niño*) et anthropique (pêche, pollutions marines, changement climatique). Ces informations sont d'autant plus cruciales aujourd'hui en Méditerranée, une mer prise en étau entre deux continents et subissant une pression humaine extrêmement forte. Grâce à ces importantes avancées technologiques qui ont vu le jour ces 20 dernières années, une large gamme de marques électroniques a été développée. Les chercheurs ont ainsi équipé en

Méditerranée nord-occidentale un large panel d'animaux marins de tailles conséquentes comme les requins peau bleue, les raies pastenagues, les thons rouges ou encore les tortues caouannes, mais aussi de plus petites tailles comme les daurades royales, les loups ou les anguilles. Certains résultats sur le thon rouge ont montré que si chaque trajectoire était unique et différente d'un individu à l'autre, des migrations saisonnières collectives avaient lieu à certaines périodes de l'année, montrant que ces poissons sont capables de mémoriser une zone saisonnièrement riche en proies et de la retrouver à une période précise de l'année. Connaître le déplacement de ces espèces et ce qui les motive peut paraître trivial, mais reste fondamental pour aborder des problématiques scientifiques clés, comme l'identification des zones de nutrition et de reproduction, les routes migratoires ou encore l'étendue et la fréquentation de ces habitats.

Contacts (MARBEC) : J. Bourjea, jerome.bourjea@ifremer.fr
et J.-M. Fromentin, jean.marc.fromentin@ifremer.fr



▲ Tortue caouanne équipée d'une balise électronique. © J. Bourjea/Ifremer

Biogéographie des communautés ichthyologiques en Méditerranée

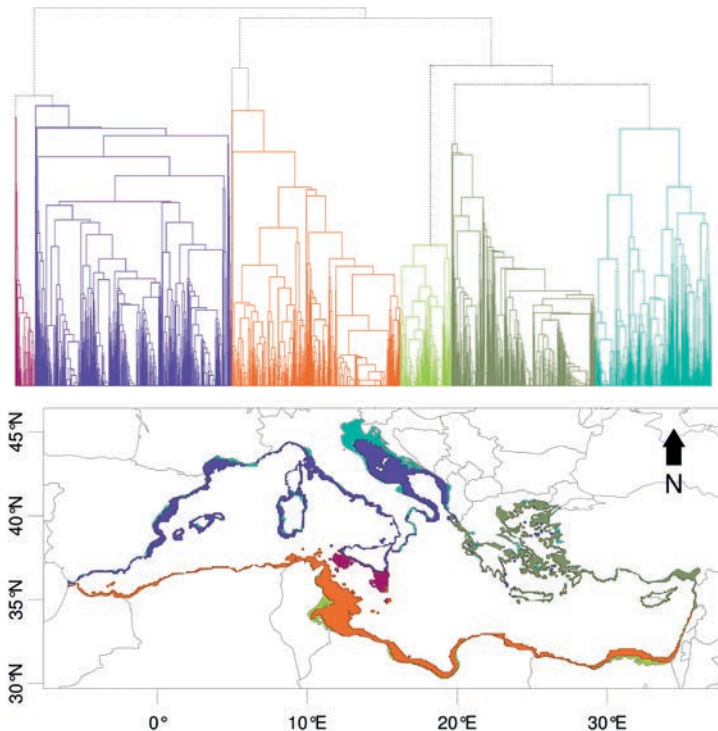
La définition précise des frontières biologiques des écosystèmes est souvent considérée comme une étape primordiale pour la mise en place des politiques de conservation et de gestion des ressources. Identifier ces frontières biologiques reviendrait à délimiter des régions biogéographiques caractérisées par des communautés d'espèces particulières séparées par des conditions environnementales et/ou une histoire géographique particulière. Des travaux ont été entrepris en mer Méditerranée afin de délimiter les régions biogéographiques du plateau continental en se fondant sur la répartition spatiale de 203 poissons marins côtiers et leurs relations évolutives (phylogénie). Les résultats de ces travaux ont mis en évidence **six régions biogéographiques à l'échelle du plateau continental méditerranéen**. Ces régions montrent une séparation claire entre les régions du nord et du sud de même qu'une disjonction entre les zones côtières et les zones du large. Les gradients biogéographiques observés sont principalement liés au gradient de température et de profondeur. Les résultats obtenus indiquent également, qu'excepté pour quelques groupes tels que les Gobidés, les processus évolutifs ne jouent qu'un rôle mineur dans la structuration des patrons de biodiversité contemporaine des poissons. En effet, les résultats montrent qu'il **n'y a pas eu d'événements majeurs de différenciation d'espèces par isolement géographique**

des populations qui se traduiraient par une distribution contrastée des taxons. Ainsi, une recolonisation avec des espèces d'origine atlantique, après la crise de salinité messinienne (cf. p. 15), peut être à l'origine de la biodiversité actuelle des poissons de la Méditerranée. Il ressort que **le climat est le déterminant majeur de la répartition de la diversité de poissons en Méditerranée.**

Contacts (MARBEC) : T. Hattab, tarek.hattab@ifremer.fr et F. Leprieur, fabien.leprieur@umontpellier.fr

Plus d'informations :
<https://doi.org/10.1111/jbi.12505>

► **Carte des régions biogéographiques des poissons côtiers méditerranéens.** Le dendrogramme (figure arborescente) montre les relations hiérarchiques entre les régions biogéographiques identifiées. © Tarek Hattab/ MARBEC



Les cétacés ont-ils du nez ?

Au cours d'une histoire évolutive singulière, les systèmes sensoriels des cétacés se sont adaptés au milieu aquatique comme l'atteste notamment l'évolution de capacités acoustiques exceptionnelles. En revanche, selon quelques études anatomiques et génétiques, les sens chimiques de ces mammifères marins auraient, quant à eux, fortement régressé voire disparu. Les cétacés auraient-ils réellement perdu l'usage de ce canal sensoriel pourtant fondamental pour l'alimentation, la navigation et la reproduction chez les autres grands prédateurs marins ?

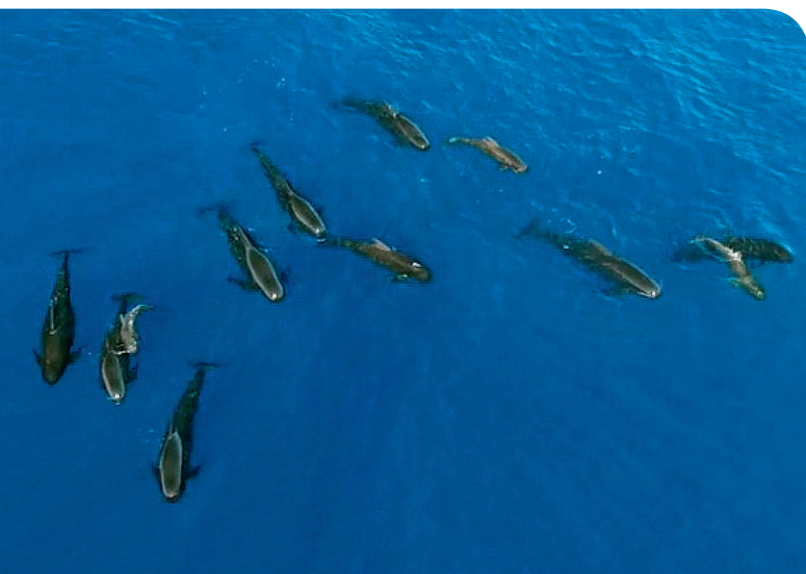
Nos recherches visent à déterminer par une approche pluridisciplinaire (comportementale, anatomique et chimique) si ces animaux sont capables de percevoir et d'utiliser les indices chimiques de leur environnement. Dans le volet comportemental de cette étude, les réactions de cétacés à dents (Odontocètes) et à fanons (Mysticètes) face à des stimuli chimiques liés à l'alimentation ont pu être observées en milieu naturel grâce à un protocole innovant utilisant des drones. **Les cétacés étudiés se sont avérés capables de percevoir des composés chimiques comme, dans le**

cas des odontocètes (grand dauphin et globicéphale), le sulfure de diméthyle, une molécule volatile émise en zone de forte productivité primaire. Chez la baleine à bosse (Mysticète), une attraction vers la source du signal chimique a été observée lors de l'utilisation d'extraits de proies (krill). En parallèle, une exploration anatomique des muqueuses orales et nasales a été initiée sur des spécimens morts échoués avec le Réseau d'histologie expérimentale de Montpellier (Biocampus Montpellier). De potentielles phéromones impliquées dans la communication sociale sont également recherchées via l'analyse chimique d'urines et fèces de cétacés échoués. Ce dernier volet bénéficie des compétences techniques de la Plateforme d'analyses chimiques en écologie (LabEx CeMEB*). **Cette recherche apporte un éclairage nouveau sur l'implication des signaux chimiques dans l'écologie des cétacés et pourrait générer des applications pour la conservation de ces espèces emblématiques et menacées comme l'usage de répulsifs chimiques.**

Contacts (CEFE) :
A. Célérier, aurelie.celerier@cefe.cnrs.fr
et S. Campagna, sylvia.campagna@cefe.cnrs.fr

* Laboratoire d'excellence « Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité »

◀ **Image aérienne prise par drone montrant un groupe de globicéphales en mer Méditerranée.**
© Bertrand Bouchard/ CEFE/CNRS



Rencontre du troisième type : les Archaea

Les microorganismes marins sont très abondants (plusieurs millions par millilitre) et constituent une biomasse bien supérieure à celle des poissons dans ces milieux. Parmi ces microorganismes, les *Archaea* représentent une fraction considérable de la biomasse microbienne ainsi qu'une part importante de la biodiversité. Leur détection récente dans le milieu marin révèle **qu'elles pourraient être l'une des sources océaniques les plus importantes d'émission d'oxyde nitreux (N_2O) et de méthane (CH_4), deux gaz à effet de serre puissant qui contribuent significativement au réchauffement climatique. Estimer la contribution des *Archaea* à l'émission de ces gaz en étudiant leur dynamique constitue donc un enjeu sociétal.** Sans compter les nombreux secrets que l'étude de leur diversité pourrait nous révéler. La difficulté de cultiver ces microorganismes constitue toutefois un verrou limitant l'évaluation de leurs rôles dans le fonctionnement des écosystèmes marins.

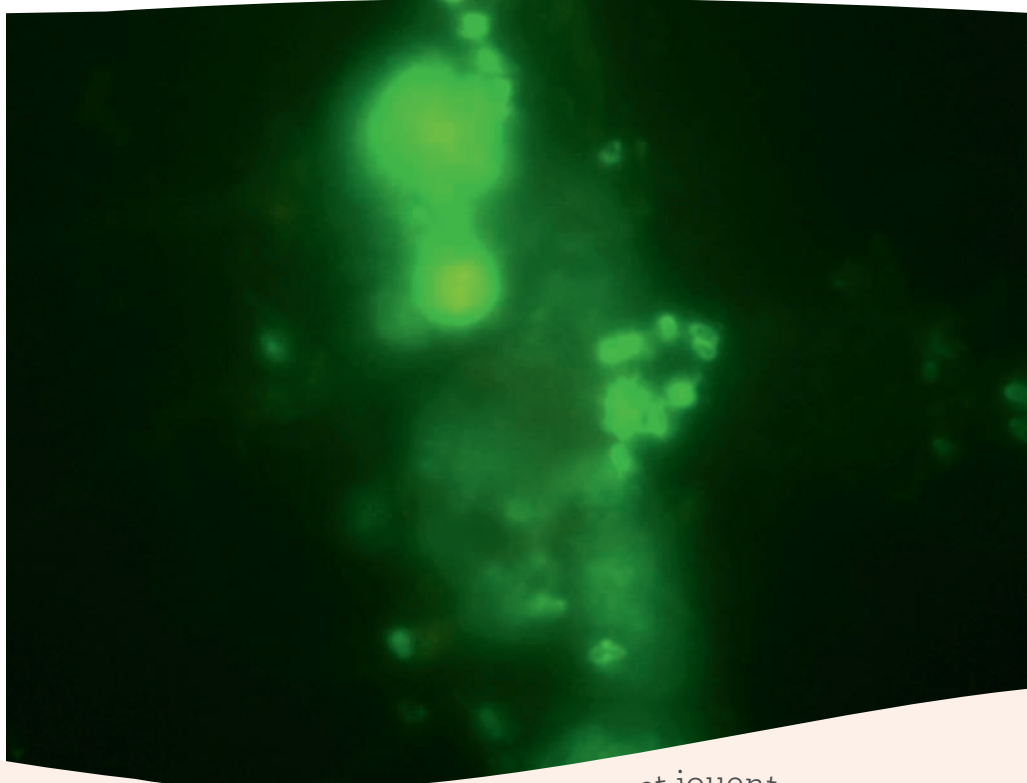
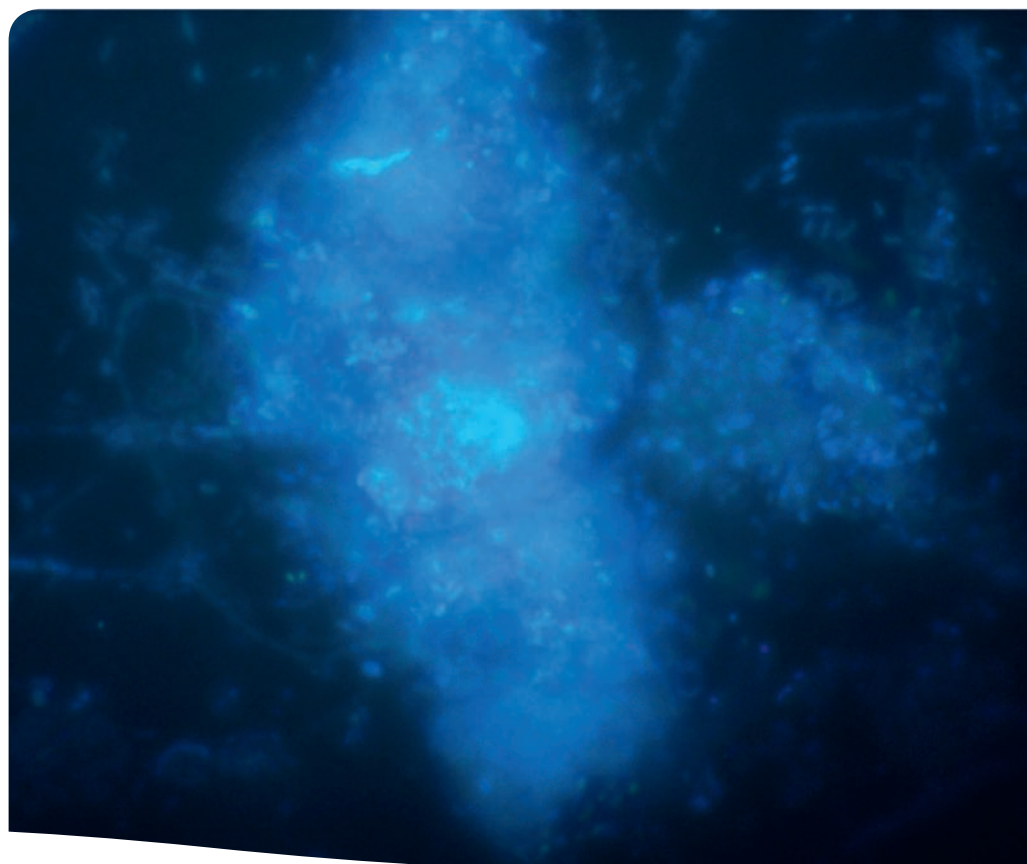
Le projet EUREKA*, dans lequel sont impliquées MARBEC, LECOB et LMGE**, a pour objectif de faire sauter ce verrou en substituant les méthodes classiques de culture par de nouvelles approches moléculaires basées sur du séquençage massif du patrimoine génétique de ces microorganismes. Un autre objectif de ce projet est l'utilisation de séries historiques (échantillons collectés mensuellement depuis une dizaine d'années) obtenues auprès des observatoires biologiques méditerranéens de Banyuls et de l'étang de Thau pour une exploration plus fine de la dynamique des *Archaea*, notamment celles impliquées dans la production de gaz à effet de serre. Ceci permettra d'estimer (et de prédire) leur contribution à l'émission de ces gaz en fonction de la variabilité physico-chimique des eaux côtières.

Contacts : J.-C. Auguet (MARBEC),
jean-christophe.auguet@cnrs.fr et
 P. Galand (LECOB), pierre.galand@obs-banyuls.fr

* Projet EUREKA (ANR) : Rôle fonctionnel et écologie des *Euryarchaeota* non cultivables, des *Archaea* essentielles dans les écosystèmes aquatiques

** LMGE : Laboratoire Microorganismes : génome et environnement localisé à Clermont-Ferrand

► *Photographie au microscope à épifluorescence (x1000) de microorganismes totaux marins (en haut). Parmi eux, les Archaea sont spécifiquement ciblées par une sonde pour pouvoir être dénombrées (en bas).* © J.-C. Auguet



Des micro-organismes sont à la base des écosystèmes océaniques et jouent un rôle fondamental dans les cycles élémentaires de la planète comme celui du Carbone.

Le microbiome des organismes marins, un gigantesque réservoir de diversité encore méconnu

Les dernières expéditions d'échantillonnage de la biodiversité microbienne marine ont recensé plus de 35 000 espèces planctoniques en provenance de tous les océans du globe. Malgré ce niveau de diversité élevé, celui du microbiome des organismes marins pourrait le surpasser. Le microbiome représente l'ensemble des microorganismes symbiotiques, commensaux et pathogènes associés de près ou de loin à un organisme de plus grande taille (vertébrés, mollusques, etc.). Ils sont présents partout à la surface, dans les muqueuses et dans certains organes clés tels que le tube digestif. L'étude des microbiomes marins a pris un essor considérable depuis 2010. Comme lors de chaque exploration d'un monde nouveau, il est nécessaire de connaître l'identité et les fonctions de ces microorganismes, d'en mesurer leur variabilité à la fois entre les individus et les espèces, mais aussi d'examiner si des tendances géographiques existent et d'en identifier les causes. Pour l'instant, le niveau de connaissance des microbiomes

marins est rudimentaire, seules quelques études suggèrent que **ces microorganismes associés protègent leur hôte des pathogènes et des perturbations environnementales.**

Le microbiome serait-il donc crucial pour la santé des animaux marins ? Cela mérite une attention particulière à tous les niveaux trophiques dans des écosystèmes diversement impactés, afin de savoir s'ils participent véritablement au bon fonctionnement des écosystèmes, de leurs habitants et de leur conservation. C'est une problématique abordée par MARBEC en Méditerranée, mais aussi dans l'océan Atlantique, Indien et Pacifique, et sur des modèles biologiques comme la daurade, le loup, la sardine, le thon, le requin, les mammifères marins et certains invertébrés comme le corail.



▲ Prélèvement de microbiome sur un mammifère marin. © Martène Chiarello

Contacts (MARBEC) : T. Bouvier, thierry.bouvier@cnrs.fr et Y. Bettarel, yvan.bettarel@ird.fr

Diversité phytoplanctonique et interactions virales

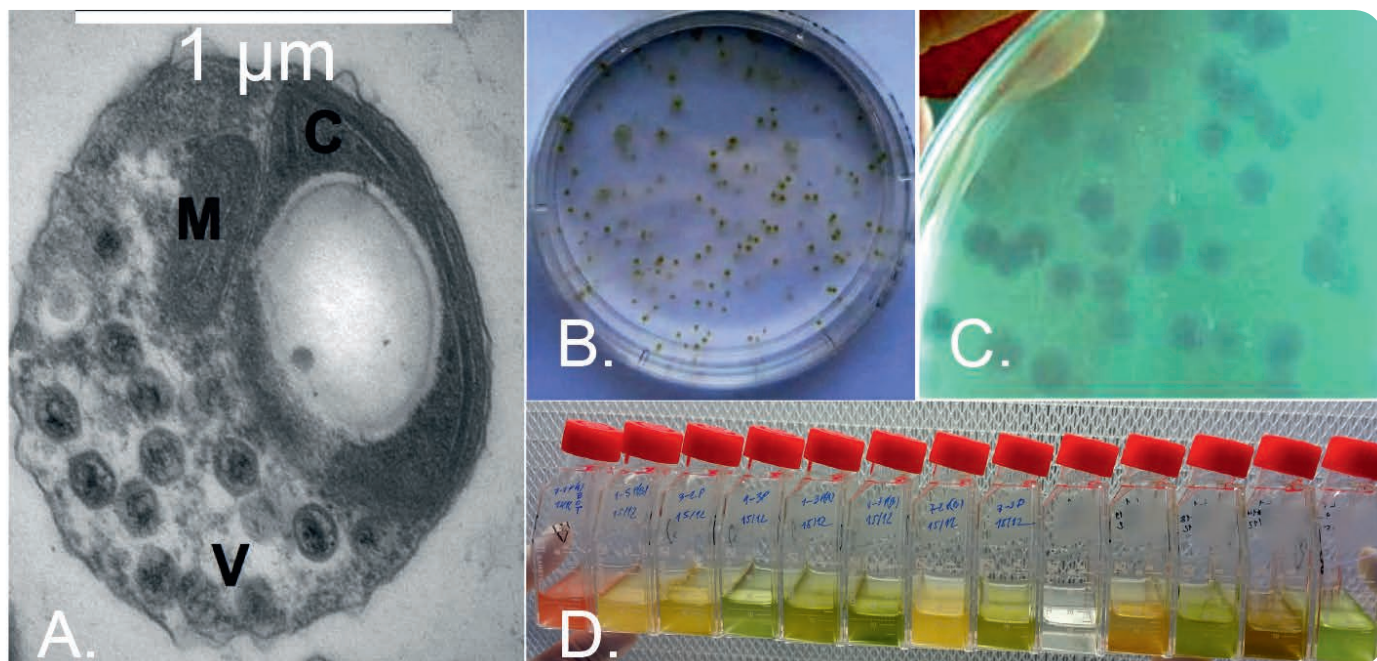
Les organismes photosynthétiques du plancton océanique et leur virus représentent un réservoir de biodiversité exceptionnel, bien que peu exploité, de notre planète. Pourtant, le phytoplancton produit la moitié de l'O₂ que nous respirons et contient de nombreuses espèces à forts potentiels biotechnologiques dans les domaines des compléments alimentaires (nutraceutique) ou des biocarburants. **La dynamique des populations des communautés phytoplanctoniques est régulée par des virus, notamment des virus à ADN de la famille des virus « géants », les prasinovirus, qui sont dix à cent fois plus nombreux que les microalgues dans le milieu naturel. La compréhension des interactions microalgues-virus est donc au cœur des**

modèles de prédictions de l'évolution des communautés planctoniques face aux changements environnementaux, qui impactent leur consommation du CO₂ de l'atmosphère.

Notre équipe de Génomique du Phytoplancton (GENOPHY) a développé les méthodes d'isolement et d'analyse de microalgues du phytoplancton et des virus qui les infectent. Des centaines de nouvelles souches ont ainsi été isolées dont certaines sont de nouveaux modèles unicellulaires émergents pour la biologie des interactions. L'utilisation des plateformes bio2mar (Biodiversité et Biotechnologies Marines) et PCI (Plateforme Cytométrie et Imagerie) de l'Observatoire Océanologique de

Banyuls-sur-Mer (OOB) permet l'acquisition de données sur les caractéristiques physiologiques de ces ressources génétiques. Combinées à des approches bioinformatiques, ces données permettent l'estimation de leur diversité ainsi que l'étude des mécanismes de diversification des microalgues et des prasinovirus. L'étude des interactions est appréhendée à la fois sur le court terme, avec le suivi de l'émergence de microalgues résistantes à l'infection virale et les mécanismes moléculaires impliqués, et, sur le long terme, en analysant les signatures génomiques de la coévolution entre les hôtes et leur virus, et leurs conséquences sur la spéciation.

Contact (BIOM) : G. Piganeau, gwenael.piganeau@obs-banyuls.fr



▲ Modèles biologiques pour les interactions microalgues et virus du phytoplancton. A. Microscopie électronique d'une microalga infectée par des prasinovirus. B. Clones de microalgues isolées sur gel. C. Plages de lyses virales résultant de l'infection d'une microalga. D. Diversité des microalgues prélevées dans la baie de Banyuls-sur-mer. © Gwenaél Piganeau, équipe GENOPHY, BIOM – UMR 7232 (Sorbonne Université – CNRS).

L'origine des espèces marines révélée par l'analyse des génomes

Comment se forment les espèces et quels sont les mécanismes impliqués dans le processus à l'origine de la biodiversité ? L'utilisation de données génomiques permet aujourd'hui de traduire les séquences des génomes en un livre de l'histoire des espèces. En étudiant les branches les plus récentes de l'arbre des espèces, il est possible d'accéder à l'échelle temps où se mettent en place les changements génétiques qui permettent de passer d'une à deux espèces. Pour déterminer quels sont les mécanismes évolutifs impliqués et leur chronologie, les données de polymorphisme génomique sont comparées à différents scénarios hypothétiques modélisés par simulation. On peut ainsi déterminer des paramètres essentiels du processus de spéciation, tels que l'âge de la divergence et des éventuels échanges génétiques entre espèces naissantes. Cette reconstitution de l'histoire démographique de la divergence est un préalable nécessaire à l'identification des changements

fonctionnels impliqués dans l'évolution de l'isolement reproductif et l'adaptation locale.

En appliquant ces approches à des espèces marines, les travaux de l'ISEM ont révélé l'existence de lignées évolutives en cours de spéciation chez de nombreuses espèces communes comme la moule, l'huître creuse, le bar, l'anchois ou l'hippocampe. Dans la plupart des cas, ces lignées évolutives, qui ne présentent pas de différences morphologiques, étaient inconnues avant l'utilisation d'outils génétiques. Les événements à l'origine de la formation de ces espèces dites « cryptiques » semblent souvent liés à un isolement géographique passé causé par les variations climatiques du Quaternaire. Ce que ces découvertes révèlent de plus surprenant, c'est l'existence d'échanges génétiques anciens ou actuels entre lignées au cours de leur divergence. Les différences génétiques entre espèces

cryptiques sont ainsi continuellement remodelées par l'alternance d'épisodes d'isolement et de contact, faisant de chaque cas de spéciation en cours une expérience réversible qui n'aboutit pas systématiquement. Ces travaux révèlent ainsi l'existence d'un niveau de diversité rarement pris en compte en biologie de la conservation. Les espèces cryptiques constituent des unités de conservation pertinentes de par leurs répartitions géographiques distinctes et leurs différences écologiques. Les approches génomiques commencent à révéler les adaptations spécifiques de ces lignées aux milieux qu'elles occupent, apportant ainsi des informations évolutives et fonctionnelles afin de mieux orienter les futures mesures de conservation.

Contacts (ISEM) : P.-A. Gagnaire, pierre-alexandre.gagnaire@umontpellier.fr, F. Bonhomme, francois.bonhomme@umontpellier.fr et N. Bierne, nicolas.bierne@umontpellier.fr



◀ Les mécanismes de formation de nouvelles espèces marines révélés grâce aux génomes. © ISEM

Perception esthétique et diversité des habitats sous-marins

La valeur esthétique des paysages et des espèces est un élément central de la conservation de la biodiversité en faisant intervenir les dimensions affectives et émotionnelles de notre rapport à la nature. Le lien entre biodiversité et perception esthétique demeure cependant peu étudié dans le cadre des services écosystémiques. Deux études* menées sur des habitats sous-marins (récifs coralligènes et récifs coralliens) ont permis de mieux comprendre et de quantifier le lien entre la biodiversité et notre perception esthétique de ces habitats. Une série d'enquêtes, fondées sur des questionnaires photographiques hébergés sur la plateforme MBB (Montpellier Bioinformatics Biodiversity) du LabEx CeMEB, a permis d'évaluer les préférences esthétiques humaines pour (i) des communautés benthiques de récifs coralligènes méditerranéens, et (ii) des communautés de poissons de récifs coralliens tropicaux (cf. ci-contre). Ces préférences esthétiques ont ensuite été reliées à différentes mesures de la biodiversité (diversité taxonomique, phylogénétique et fonctionnelle) de chacun de ces systèmes. Les résultats ont montré que la biodiversité et la composition en espèces influencent positivement nos préférences esthétiques.

Ces résultats confirment l'importance de la biodiversité dans notre perception de la valeur esthétique, ce qui pourrait avoir des conséquences majeures sur la façon dont nous protégeons notre environnement. Cette convergence entre écologie et perception esthétique constitue une réelle opportunité pour la valorisation et la conservation de la biodiversité à travers sa beauté.

Contacts : A.-S. Tribot (MARBE), anne-sophie.tribot@univ-montp3.fr, J. Deter (ISEM), julie.deter@umontpellier.fr et N. Mouquet (MARBE), nicolas.mouquet@cirs.fr

Partenaires : UMR ISEM et MARBE, Andromède Océanologie, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Centre Universitaire de Mayotte, Fondation de France et l'OSU OREME.

* Projet doctoral réalisé de 2014 à 2017 : Tribot, 2017. Esthétique et Biodiversité des écosystèmes sous-marins. Mémoire de thèse. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01665278> (Financement Fondation de France/CNRS)

▶ Exemple de photographies utilisées pour mesurer les préférences esthétiques de communautés de (A) récifs coralligènes méditerranéens et (B) récifs coralliens tropicaux.



▲ A. © Andromède Océanologie pour l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse



▼ B. © A.S. Tribot/UMR MARBE

Les fluides hydrothermaux et leurs populations microbiennes

L'existence de la circulation de l'eau dans les sédiments marins et dans la croûte océanique est confirmée à la fin des années 1970 par l'observation directe d'expulsion de décharge de fluides à basses et hautes températures (quelques dizaines de degrés à 410°C). De plus, une population biologique importante, rare à de telles profondeurs, s'agglutine autour des événements hydrothermaux. La découverte de systèmes hydrothermaux le long des dorsales océaniques et aux arcs volcaniques a été un des événements majeurs de ces quarante dernières années et a conduit à un bouleversement dans l'approche des processus non seulement thermiques et géochimiques mais aussi biologiques sur la Terre.

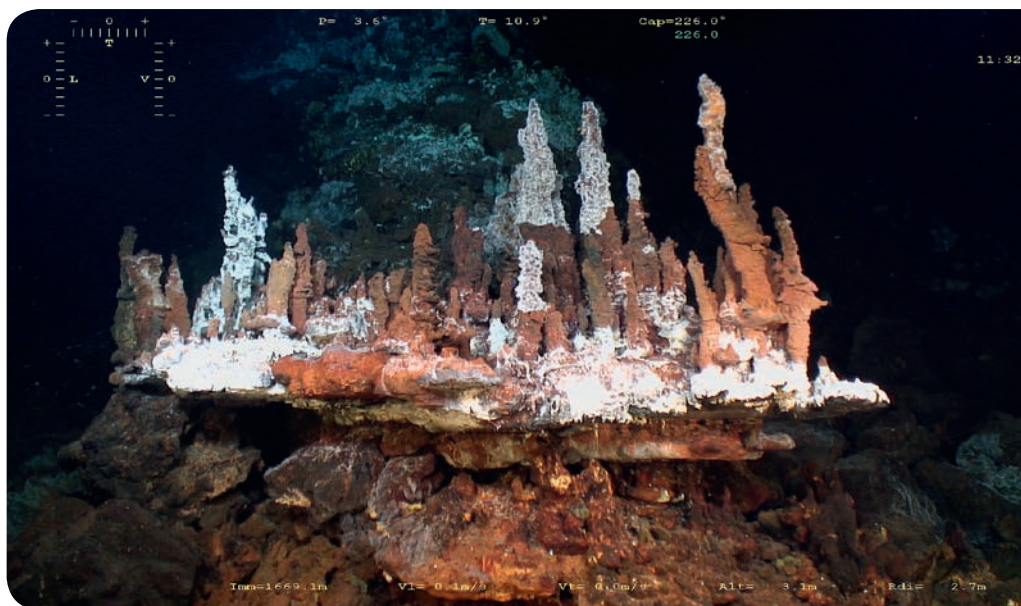
La circulation hydrothermale est due à la pénétration et la percolation d'eau de mer dans la croûte océanique et les sédiments marins. Lors de ce trajet, de nombreuses réactions chimiques prennent place et altèrent les roches traversées, transformant l'eau de mer initiale en un fluide hydrothermal soit acide et chaud (jusqu'à 410°C), soit alcalin et froid (<100°C). Ainsi, certains éléments majeurs de l'eau de mer sont stockés dans la roche, alors que les métaux lourds (Fe, Mn, Cu, Zn...) et alcalins s'enrichissent jusqu'à des facteurs 10⁶. À la surface du plancher océanique, ces fluides hydrothermaux se mélangent avec l'eau de mer ambiante neutre, froide et oxygénée, générant un gradient environnemental favorable au développement d'écosystèmes. En particulier, dans un milieu marin profond sans lumière, les communautés microbiennes utilisent les flux d'éléments chimiques des fluides hydrothermaux pour vivre, nous les appelons les communautés chimiosynthétiques. Nos recherches visent à étudier l'influence des paramètres environnementaux, c'est-à-dire les flux hydrothermaux chimiques, sur le développement de ces écosystèmes. Les résultats acquis via la plateforme instrumentale et analytique de pointe de l'Observatoire Midi-Pyrénées (PANGEE) ont permis d'identifier les concentrations des éléments (e.g. fer, manganèse, méthane, azote...) indispensables à la vie de ces organismes et d'en étudier l'impact sur la diversité des populations microbiennes.

Contact (GET) :

V. Chavagnac, valerie.chavagnac@get.omp.eu

Plus d'informations :

www.emso-fr.org/EMSO-France



▲ Site hydrothermal de Capelinhos en 2013. © ROVVictor6000/Ifremer/CNRS

Comprendre et inférer la connectivité marine pour mieux gérer les ressources

La distance de dispersion (qui sépare les enfants de leurs parents) est un paramètre fondamental pour comprendre les dynamiques écologiques et évolutives des populations et communautés d'espèces spatialement subdivisées. Inconnue pour beaucoup d'organismes marins, elle se fait lors d'une phase larvaire microscopique dans le plancton, alors que les adultes sont sédentaires. La différence de taille entre juvéniles et adultes, répandue chez les espèces marines, rend le suivi de cette dispersion larvaire impossible dans l'eau. Pour la retracer, les chercheurs du Groupement de recherche sur la connectivité marine* combinent différentes approches pluridisciplinaires :

- La modélisation des courants, combinée à des paramètres comportementaux des larves, peut prédire leur déplacement dans les masses d'eau ;
- l'analyse chimique – via l'étude de la calcification de l'oreille interne des poissons ou de la coquille des mollusques – peut déterminer les environnements qu'une larve a traversés pendant son développement.
- La méthode génétique analyse les parentés entre individus ainsi que la distance géographique qui les sépare. Le séquençage de l'ADN à haut débit permet d'analyser à faible coût un très grand nombre d'individus. Appliqué en routine, il informe sur la dispersion et la taille des populations (par ex.

stocks de pêche). En utilisant des relations de parentés plus éloignées sur un nombre plus modeste d'individus, l'approche génétique permet d'estimer la connectivité génétique (dispersion sur le long terme, moyennée sur un grand nombre de générations) importante pour les processus évolutifs qui se déroulent sur des échelles de temps plus longues que les processus écologiques.

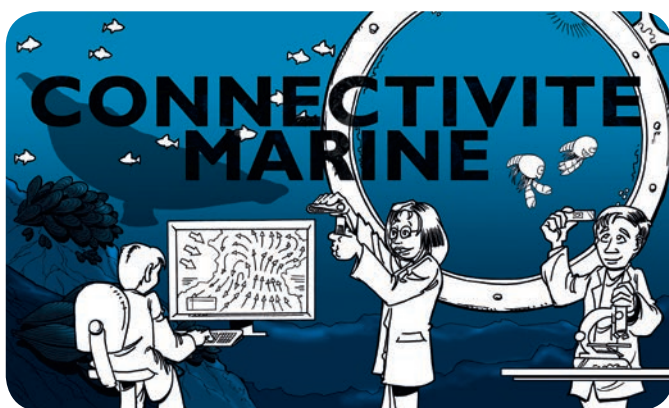
L'utilisation conjointe de ces trois méthodes rendra possible la compréhension des dynamiques éco-évolutives afin, par exemple, de définir les zones d'activité et les quotas de pêche ou de prévenir d'éventuels risques d'extinction. L'objectif à terme est de contribuer à une meilleure gestion des ressources marines et de tendre vers un développement durable des activités maritimes.

Contacts : N. Bierre (ISEM), nicolas.bierre@umontpellier.fr et S. Arnaud-Haond (MARBEC), sophie.arnaud@ifremer.fr

Plus d'informations :
<https://youtu.be/L-Y615SHILU>

* Groupement de recherche MarCo (CNRS-Ifremer) piloté par les UMR ISEM et MARBEC : www2.ifremer.fr/gdrmarco

► La modélisation océanographique, l'analyse chimique et la génétique sont utilisées par les chercheurs pour comprendre et inférer la connectivité marine.
© Sébastien Lerigoleur



Organismes marins : modèles biologiques et plateformes d'expérimentation

EMBRC-FRANCE : UNE INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE NATIONALE POUR L'ACCÈS ET L'ÉTUDE DE LA BIODIVERSITÉ MARINE ET DES ÉCOSYSTÈMES CÔTIERS

Avec le programme « Investissements d'avenir », et particulièrement avec l'appel à projets « Infrastructures nationales en biologie et santé », l'État a voulu doter la France de grandes infrastructures d'envergure nationale et très compétitives au niveau international. Le Centre national de ressources biologiques marines (EMBRC-France) est la seule infrastructure française dans le domaine de la biologie marine. EMBRC-France intègre les activités et expertises de trois stations marines de Sorbonne Université et du CNRS : Station Biologique de Roscoff (SBR), Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer (OOB) et Institut de la Mer de Villefranche (IMEV).

L'exploitation des ressources marines et de leur diversité représente un véritable enjeu avec de multiples retombées dans divers domaines : halieutique, aquaculture, biotechnologies, ingénierie écologique, géosciences marines et océanographie. Face à ces enjeux sociétaux, les stations marines se positionnent naturellement comme des maillons essentiels dans le processus d'innovation lié aux ressources marines. Chaque station, via le guichet unique d'EMBRC-France, offre et facilite, pour toutes les communautés académiques et pour les entreprises,

l'accès aux écosystèmes marins des trois stations, localisés en façades atlantique (SBR) et méditerranéenne (OOB et IMEV), et à leurs services. La station de Banyuls-sur-Mer, fournit, avec diverses spécificités, des moyens à la mer (bateaux, marins, plongeurs...), des aquariums et laboratoires alimentés en eau de mer courante, des plateformes analytiques et une structure d'hébergement. Sa principale caractéristique est de pouvoir fournir des modèles microbiens, animaux ou végétaux qui représentent des lignées évolutives majeures et qui ne sont pas présentes dans les écosystèmes terrestres, ainsi que l'accès à des ressources génétiques de certains organismes modèles, procaryotes ou eucaryotes. EMBRC-France est un formidable outil de valorisation de la recherche en biologie et écologie marine qui s'appuie sur un fort potentiel d'innovation. Par ailleurs, EMBRC-France est le nœud français de l'infrastructure européenne EMBRC, dont la France porte le siège.

Contacts (EMBRC-France) :

N. Pade, nicolas.pade@sorbonne-universite.fr
et N. Turque, nathalie.turque@embrc-france.fr

EMBRC-France

Centre National de Ressources Biologiques Marines
Infrastructure Nationale en Biologie et Santé

www.embrc-france.fr

Offrir l'accès aux écosystèmes marins et aux ressources biologiques, en s'appuyant sur des plateformes technologiques

Monde Académiques & Entreprises Français & Internationaux

Accès aux écosystèmes côtiers

Ressources biologiques

Plate-formes technologiques

Laboratoires d'accueil

Hébergement et Restauration

Formation

Navire de station
Embarcations légères
Plongée scientifique

Microorganismes
Macroorganismes
Ressources génétiques

Analyses structurales et chimiques
Imagerie
Bioinformatique
Etc...

Laboratoires, Aquarium
Bureaux

Ressources prélevées
Ressources stabulées
Ressources cultivées, élevages
Collections (plancton, microalgues, bactéries)

▲ EMBRC-France offre via son guichet unique, une combinaison d'accès aux écosystèmes des trois stations marines de Roscoff, Banyuls-sur-Mer et Villefranche-sur-Mer, à leurs services et expertises.

Études expérimentales de l'impact du changement climatique sur les réseaux planctoniques marins

Les réseaux planctoniques sont à la base du fonctionnement des écosystèmes pélagiques marins ainsi que des systèmes marins côtiers très riches en ressources exploitées. L'impact de différents changements, notamment climatiques, est étudié expérimentalement sur les réseaux planctoniques marins dans des conditions contrôlées en mésocosmes (enceinte étanches de plusieurs m³) depuis plus de deux décennies. Les résultats montrent que les zones côtières, de par leurs faibles profondeurs, sont très réactives aux changements en particulier à l'augmentation de la température. En effet, **un bouleversement en cascade a lieu dans les réseaux planctoniques de la lagune de Thau, suite à la simulation *in situ* d'une augmentation de la température de 3°C, à travers des interactions en chaîne entre les organismes hétérotrophes de ce réseau** (e.g. copépodes, ciliés, flagellés, bactéries). En fait, les *nauplii* de copépodes deviennent adultes plus rapidement sous l'effet de la température, réduisant ainsi l'abondance de ciliés, permettant l'augmentation des flagellés hétérotrophes, ce qui diminue, au final, l'abondance des bactéries hétérotrophes. Ce résultat était inattendu car des études antérieures, n'englobant pas l'ensemble des organismes des réseaux planctoniques, suggéraient le contraire. Nos résultats montrent également une augmentation de la production primaire nette suite à l'augmentation de 3°C de l'eau de la lagune.

Partant de l'hypothèse que les divers types de plancton répondent différemment à l'augmentation de la température liée aux changements climatiques, nous avons conduit récemment (avril 2018) d'autres expérimentations en mésocosmes (cf ci-contre). Ces expériences avaient comme objectif de vérifier cette hypothèse pour les communautés planctoniques de la lagune de Thau, divisées en deux classes de taille de prédateurs zooplanctoniques (< 1 000 µm versus < 200 µm) et d'étudier les conséquences éventuelles sur la production phytoplanctonique, l'accumulation et le transfert des matières vers les échelons trophiques supérieurs. Ces expériences ont été réalisées dans le cadre du projet de l'Agence nationale de la recherche (ANR) Photo-Phyto* avec la participation d'une vingtaine de chercheurs



▲ *Expérimentations liées aux études des effets de l'augmentation de la température sur le fonctionnement des réseaux planctoniques marins, réalisées en mésocosmes in situ immergés dans la lagune de Thau de la plateforme MEDIMEER (avril 2018). © Behzad Mostajir*

et étudiants, dont plusieurs collègues européens bénéficiant du dispositif *Transnational Access* dans le cadre du projet européen AQUACOSM*.

Contacts : B. Mostajir (MARBEC), behzad.mostajir@umontpellier.fr; behzad.mostajir@cnr.fr; S. Mas (OREME), sebastien.mas1@umontpellier.fr; D. Parin (OREME), david.parin@univ-montp2.fr et F. Vidussi (MARBEC), francesca.vidussi@univ-montp2.fr

* Plus d'informations :

Projet Photo-Phyto « Effets du réchauffement climatique sur le déclenchement des blooms phytoplanctoniques marins » : photopériodisme, composition et adaptation : www.umar-marbec.fr/IMG/pdf/photophyto_fiche_projet_fr.pdf

Projet AQUACOSM « Network of leading european aquatic mesocosm facilities connecting mountains to oceans from the Arctic to the Mediterranean » : www.aquacosm.eu

Intérêt des modèles biologiques marins

La jeune discipline de biologie évolutive du développement (évo-dévo) a pour objectif principal de comprendre comment l'évolution des mécanismes développementaux a participé à l'apparition de la diversité morphologique des organismes pluricellulaires. La méthodologie de travail est fondée sur une analyse comparative des processus mis en jeu lors de l'embryogenèse entre différents organismes afin de différencier les mécanismes communs, et donc ancestraux, de ceux qui sont divergents et qui ont donc potentiellement été générateurs de diversité au cours de l'évolution. Pour répondre à ce type de question, deux points sont fondamentaux : (i) la possibilité d'utiliser sur les organismes choisis les techniques d'étude de biologie du développement et (ii) l'accès à des modèles situés à des positions

évolutives clés, qui sont propres à chaque question spécifiquement adressée.

Dans ce sens, le milieu marin est incontournable. En effet, les océans représentent le plus grand volume offert à la vie et le plus important réservoir de biodiversité, diversité qui reflète toutes les étapes majeures de l'évolution des êtres vivants depuis leur apparition jusqu'à aujourd'hui. Ainsi **on trouve dans ce milieu des représentants des 33 phyla de métazoaires existants, et 12 d'entre eux sont exclusivement marins. Ce milieu offre donc un panel de modèles adaptés à un grand nombre de questions en évo-dévo.** L'UMR BIOM s'intéresse à l'évolution morphologique au sein du groupe des chordés. Pour cela, différentes équipes étudient

les mécanismes contrôlant plusieurs aspects du développement embryonnaire d'espèces situées à des positions clés dans cette lignée évolutive telles que les amphioxus (céphalochordés), les ascidies (urochordés) ou plusieurs espèces de vertébrés comme la roussette (requin) ou la lamproie (cyclostomes). Ces modèles marins, dits « non-conventionnels », ont apporté des réponses à plusieurs questions fondamentales auxquelles les modèles conventionnels ne permettent pas de répondre et sont donc devenus incontournables de la discipline.

Contact (BIOM) :

H. Escriva, hector.escriva@obs-banyuls.fr

▼ *Juvenile de petite roussette, Scyliorhinus canicula.* © S. Mazan/UMR BIOM



Les cycles de vie et développement larvaire d'organismes modèles. Métamorphose et recrutement

La quasi-totalité des poissons marins ont un cycle de vie en deux phases bien distinctes : une phase larvaire pélagique, où la larve est dans le plancton, et une phase juvénile puis adulte où l'animal est le plus souvent benthique. La transition entre ces deux phases est une véritable métamorphose. L'équipe « Eco-Evo-Devo » de BIOM, en collaboration avec celle du CRIOBE, a montré que, chez des poissons coralliens, cette étape était contrôlée par les hormones thyroïdiennes (comme la métamorphose du têtard en grenouille). Ainsi, la sécrétion de ces hormones, déclenchée par l'axe hypothalamo-hypophysio-thyroïdien sous le contrôle de l'environnement et de l'état physiologique de l'organisme, déclenche le phénomène.

Par ailleurs, ces hormones orchestrent le déroulement ordonné dans le temps de ce phénomène et, par là-même, la qualité des juvéniles résultant de cette transformation. Aussi, une altération de la sécrétion thyroïdienne au cours de ce processus résulte en des juvéniles qui ne remplissent plus correctement leur fonction écologique et qui sont donc plus facilement victimes des prédateurs. C'est par exemple le cas des animaux qui ont été exposés aux polluants environnementaux (comme le chlorpyrifos) qui interfèrent avec la fonction thyroïdienne. Les larves perturbées par une exposition à ces molécules donnent des juvéniles de moins bonne qualité que ceux des animaux non exposés. De très nombreuses

données suggèrent que le même type de phénomène existe chez les poissons de Méditerranée. Chez ces espèces, les ports peuvent jouer le rôle de nurseries où les jeunes juvéniles vont poursuivre leur croissance dans un environnement calme et relativement protégé... mais hélas très souvent pollué par diverses substances nocives. Cette fonction de nurserie des ports a été exploitée ces dernières années pour tenter d'accroître la production de juvéniles de plusieurs espèces de poissons. Les recherches doivent se poursuivre pour comprendre comment les différents polluants agissent sur ces stades de vie précoce des poissons et mieux connaître les mécanismes de résilience que ceux-ci peuvent développer.

Contact (BIOM) : V. Laudet, vincent.laudet@obs-banyuls.fr

Plus d'informations :

<http://biom.obs-banyuls.fr/fr/equipe-e6-biologie-integrative-de-la-metamorphose.html>

▼ *Les larves de poissons coralliens comme ce poisson-chirurgien bagnard, *Acanthurus triostegus*, se transforment lors du recrutement larvaire. Cette transformation est une véritable métamorphose régulée par les hormones thyroïdiennes. Une transformation similaire existe chez les poissons de Méditerranée et conditionne la qualité du futur juvénile et donc, à terme le maintien des populations adultes. © M. Besson/UMR BIOM/USR CRIOBE*

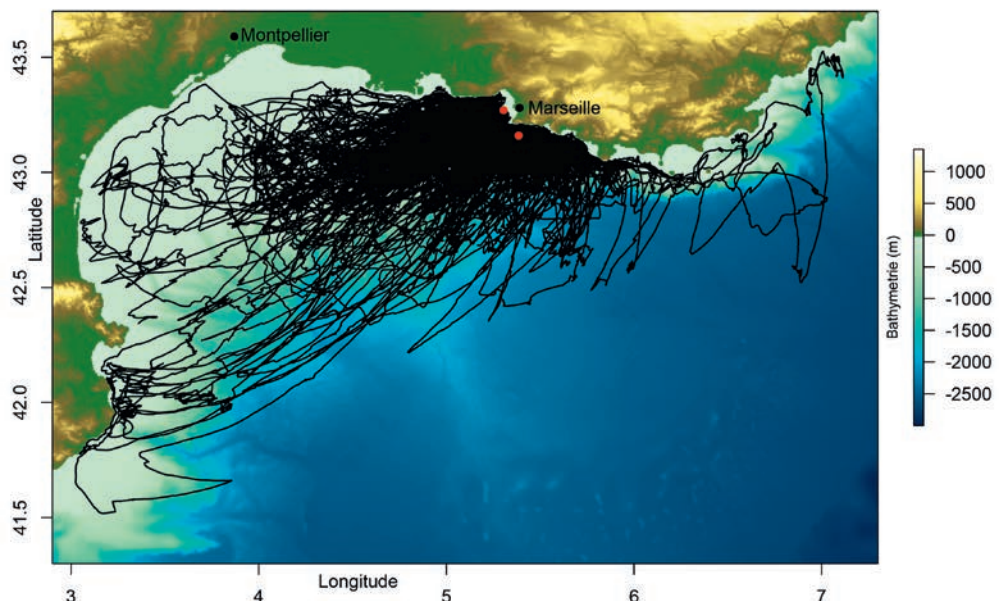


Détectives à plumes. Ce que les oiseaux nous apprennent sur leur environnement

Visibles de tous, les oiseaux nous renseignent sur l'état de leurs milieux de vie. Ils y sont exposés aux pollutions plastiques et chimiques, aux agents pathogènes, aux conséquences des changements climatiques et à la surexploitation des ressources naturelles. **Bioindicateurs avérés, les oiseaux marins présentent des réponses qualitatives et/ou quantitatives aux changements globaux et émergent comme d'excellentes sentinelles environnementales.** Ainsi, les recherches centrées sur les goélands leucophées (*Larus michahellis*) de l'ouest de la Méditerranée permettent d'étudier leur exposition à différents agents infectieux (virus de l'influenza aviaire et bactéries antibiorésistantes notamment), en considérant les modes de transmission de ces agents et leurs éventuels liens avec les activités humaines. De plus, l'étude à long terme des puffins de Scopoli (*Calonectris diomedea*) nicheurs aux îles de Marseille quantifie l'impact de l'effondrement des ressources halieutiques sur la structure de l'écosystème marin côtier, ainsi que la pertinence des dispositifs de gestion, par exemple des aires marines protégées. Des prélèvements réguliers effectués sur goélands et puffins facilitent une veille aux niveaux de polluants (métaux lourds, hydrocarbures, perturbateurs endocriniens) présents dans les écosystèmes. Finalement, les suivis des déplacements en mer des oiseaux par le biais de balises GPS permettent de déterminer l'impact de divers facteurs d'anthropisation, tels que le trafic maritime et la mise en place de parcs éoliens en mer. L'ensemble de ces études sont co-construites par les équipes de recherches du CEFE et de la Tour du Valat*, avec les gestionnaires des espaces naturels sensibles concernés, notamment le Parc naturel régional de Camargue et les Parcs nationaux des Calanques et de Port Cros. Les travaux sont effectués sous la houlette de l'Agence française pour la biodiversité et de l'Observatoire des sciences de l'univers OREME*, en lien avec de nombreux organismes internationaux**.



▲ Goélands leucophée nicheur aux îles de Marseille, Parc national des Calanques. © David Grémillet



▲ Suivi GPS des déplacements de 133 puffins de Scopoli pendant les saisons de reproduction 2011-2017 aux îles de Marseille, Parc National des Calanques. © Nicolas Courbin

Contacts :

D. Grémillet (CEFE), david.gremillet@cefe.cnrs.fr, M. Vittecoq (Tour du Valat), vittecoq@tourduvalat.org et T. Boulinier (CEFE), thierry.boulinier@cefe.cnrs.fr

* Plus d'informations :

<https://tourduvalat.org/>

<https://oreme.org/services/observation/ecopop>

** Par exemple : www.isprambiente.gov.it/it
www.ub.edu/web/ub/en - www.birdlife.org

Les océans représentent le plus grand réservoir de biodiversité, offrant ainsi une palette étendue de modèles biologiques pour un grand nombre de questions scientifiques.



Des preuves scientifiques de la vulnérabilité de l'océan



L'érosion du littoral est un phénomène naturel, lié à l'action du vent, de la houle et des courants qu'elle génère, des variations du niveau de la mer, à l'importance des apports sédimentaires des fleuves côtiers, à la géologie et à la morphologie locale. À ces facteurs naturels s'ajoutent souvent des facteurs anthropiques (artificialisation du littoral, déstabilisation des dunes, barrages réduisant les apports sédimentaires) qui peuvent aggraver fortement ce phénomène.

La submersion marine est due à la fois aux effets atmosphériques (vent, dépression), au déferlement des vagues de tempêtes (*setup*), au jet de rive (*run-up*) et, dans une moindre mesure en Méditerranée, à la marée. Les tempêtes marines et les inondations continentales étant en partie provoquées par les mêmes phénomènes, il est possible d'avoir une concomitance des deux manifestations (crues, élévation du niveau de la mer). Le risque existe lorsque des enjeux sont en présence. Il peut s'agir de personnes, de biens ou d'aménagements divers, exposés à un aléa (érosion du littoral ou submersion marine) et pouvant subir des dommages en conséquence.

Les régions littorales sont le siège d'une activité économique importante (40 % du produit intérieur brut [PIB] européen). Elles dépendent à la fois directement et indirectement de l'économie maritime et connaissent une croissance plus rapide que la moyenne de l'économie européenne. La longueur importante de la côte européenne (68 000 km) est un atout économique et écologique, et un facteur d'attractivité pour l'Europe. Dans ce contexte, les atteintes à l'environnement marin croissent : artificialisation des côtes, littoralisation des activités et des implantations urbaines, résidentielles et touristiques, augmentation des rejets de polluants et de macro-déchets non dégradables. Cette menace sur les habitats et la biodiversité peut avoir des conséquences importantes aux niveaux social, économique et biologique.

En région Occitanie, plusieurs équipes de recherche réparties sur l'ensemble du territoire sont mobilisées pour étudier les variations du niveau de la mer et l'évolution du trait de côte et réaliser des outils de prédiction qui soient utiles aux décideurs. Au-delà du trait de côte et des modifications du littoral, de nombreuses équipes s'intéressent également aux atteintes à la biodiversité marine. Ces dernières résultent d'une démographie humaine croissante et d'une activité humaine en pleine expansion économique dont les besoins en ressources renouvelables (pêche) et non renouvelables (minérales, énergétiques) ne cessent de s'accroître. Il est toutefois difficile de différencier les modifications qui résultent des contraintes naturelles (facteurs climatiques) de celles qui sont induites par les activités humaines. Plusieurs causes ont une incidence sur la biodiversité marine, aux niveaux génétique, spécifique et écosystémique ; il est admis d'en reconnaître cinq principales : la pêche, la pollution chimique et l'eutrophisation, la dégradation physique des habitats, l'invasion d'espèces exotiques et le changement climatique. Il est difficile d'imputer l'extinction d'espèces, de races ou de variétés, ainsi que la dégradation d'écosystèmes ou de services écosystémiques, à une seule de ces causes, car toutes agissent simultanément, parfois même en interaction avec des effets synergiques.

La pêche est le principal facteur qui menace la biodiversité des poissons marins. Par exemple, dans le monde, plus de 40 populations locales de poissons marins ont disparu en raison de la surexploitation. Les effets de la pêche sur la biodiversité ont été largement étudiés et décrits et concernent les effets sur les espèces ciblées par la pêche, sur la structure génétique des populations, sur les captures accessoires, sur les communautés et les réseaux trophiques ainsi que sur l'habitat. De récentes études ont montré que la surpêche entraînait une diminution de la taille et de l'âge des poissons, de la diversité des classes d'âges et de l'âge à la maturité sexuelle. En outre, la pêche affecte non seulement les biomasses mais aussi la composition des peuplements exploités.

Par ailleurs, les activités humaines sont responsables de l'introduction dans le milieu marin d'un grand nombre de substances. Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), 80 % des pollutions marines sont d'origine terrestre et anthropique. Aux sources industrielles s'ajoutent les effluents domestiques et urbains ainsi que les apports diffus dus aux usages agricoles. L'impact de la pollution des eaux marines est mal mesuré, mais il serait responsable d'importants effets létaux et sublétaux sur les organismes marins. La pollution a des répercussions à tous les niveaux trophiques, des producteurs primaires aux consommateurs supérieurs et, par conséquent, affecte le fonctionnement des écosystèmes.

Notre compréhension générale de la façon dont la pollution et les différents contaminants influencent la biodiversité marine est limitée. Du point de vue de la gestion, les principales questions sont de savoir quels habitats marins sont plus vulnérables aux contaminants et quelles classes de contaminants sont plus susceptibles de causer des impacts négatifs sur la biodiversité. Au-delà des substances surveillées classiquement (métaux, organochlorés, pesticides, hydrocarbures), une préoccupation majeure concerne les éventuels effets de nombreuses autres substances chimiques que l'on retrouve pour les usages domestiques ou comme produits cosmétiques ou pharmaceutiques (antibiotiques, hormones, stéroïdes). Ces substances sont qualifiées de « contaminants émergents ».

La pollution par les macro-déchets est un problème de pollution généralisé qui affecte tous les océans du monde. Sa menace pour le milieu marin a été ignorée pendant longtemps et ce n'est que récemment que sa gravité a été reconnue. Les macro-déchets sont la cause de lésions et de décès de nombreuses espèces marines (tortues, albatros, phoques, baleines ou poissons), soit parce que ceux-ci y restent emprisonnés soit parce qu'ils les prennent pour des proies et les avalent. Ils constituent des pièges physiques et des leurres pour la biodiversité marine. Dans le monde, 10 % des 260 millions de tonnes de matières plastiques produites annuellement se retrouvent en mer.

Philippe Lebaron (Sorbonne Université, CNRS, USR LBBM)

Variations du niveau de la mer et impact sur le trait de côte

Variations climatiques et dépôt sédimentaire dans le golfe du Lion

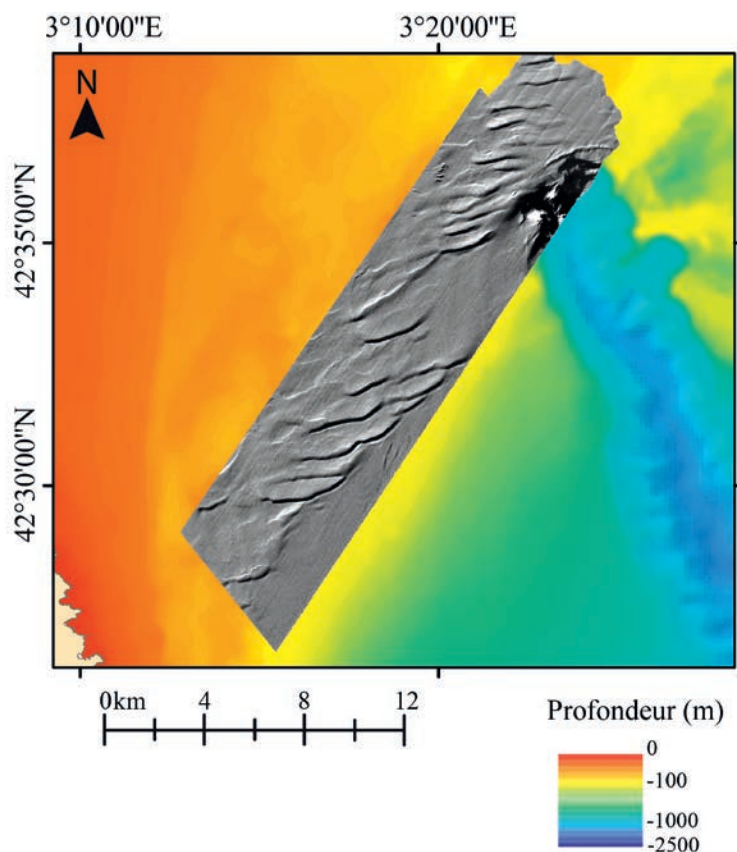
Les variations climatiques et eustatiques pendant le Quaternaire (2,6 millions d'années) sont enregistrées et étudiées dans les sédiments marins et continentaux à l'échelle de la planète. Depuis quelques dizaines d'années, la précision de ces reconstitutions permet d'intégrer les données obtenues par l'étude des enregistrements sédimentaires dans les modèles de prévision climatique future. La Méditerranée, région densément peuplée autour d'une mer semi-fermée, est particulièrement sensible aux changements climatiques et du niveau de la mer, même de faible amplitude. Le CEFREM s'intéresse, dans le cadre de projets européens et nationaux, à la caractérisation des dépôts dans le golfe du Lion par la combinaison de méthodes sismiques, sédimentologiques et géochronologiques, couplées à la modélisation numérique. Ces travaux ont mis en évidence l'impact de la variation du niveau de la mer sur l'évolution des systèmes sédimentaires marins au cours des derniers 500 000 ans, et ont daté la surface de ravinement et les dépôts postérieurs à la dernière glaciation (environ 20 000 ans) qui s'organisent sous forme de corps sédimentaires (bancs, dunes) dont la partie supérieure est périodiquement remaniée durant les périodes de tempête (cf. fig. 1).

À l'échelle de l'Holocène (11 700 dernières années), le CEFREM s'intéresse à la quantification des changements d'apports hydriques du Rhône dans les enregistrements des deltas sous-marins et des contourites* peu profondes (cf. fig. 2). Les travaux récents montrent que l'Holocène, bien que considéré jusqu'à présent comme une période de grande stabilité climatique, était affecté par des changements importants du climat (en lien avec l'activité solaire et le volcanisme) qui ont influencé le développement des civilisations. **L'utilisation des archives sédimentaires issues des deltas sous-marins et des contourites peu profondes est une approche nouvelle en paléoclimatologie (qui considérait traditionnellement les sédiments hémipélagiques des bassins profonds). L'analyse de ces corps sédimentaires permet d'accéder à des archives à très haute résolution (annuelles ou décennales) et de faire un lien direct terre/mer grâce aux proxys continentaux et marins qui s'y trouvent préservés.**

Contact (CEFREM) :

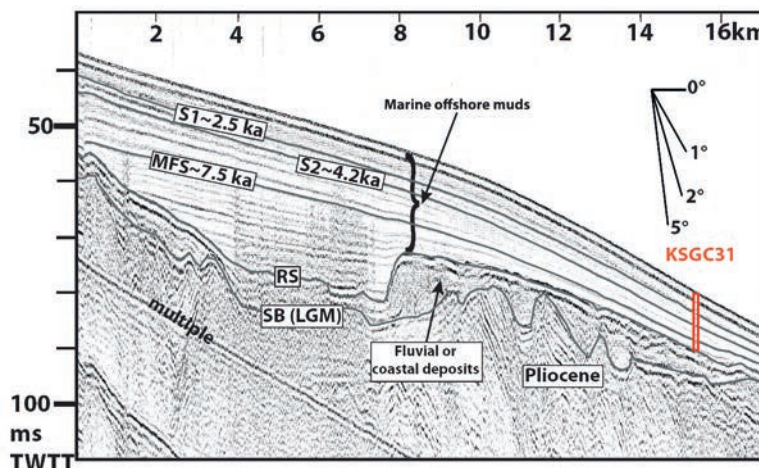
M.-A. Bassetti, maria-angela.bassetti@univ-perp.fr

* Contourites : dépôts issus du remaniement de sédiments océaniques par des courants de fond.



▲ Fig. 1. Dunes sous-marines au rebord de la plateforme continentale dans le golfe du Lion. D'après Alonso Y., 2016. Caractérisation morpho-structurale des dunes sous-marines du golfe du Lion, canyon de Lacaze-Duthiers. Mémoire de stage, UPVD. (Campagne CARTHAM -AFB).

▼ Fig. 2. Profil sismique NW-SE traversant la vasière d'âge Holocène sur le plateau continental du golfe du Lion. D'après Bassetti et al., 2016. Clim. Past. 12: 1539-1553. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1539-2016>, 2016





érosion du littoral dans le golfe du Lion

L'érosion globale de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon (d'Argelès au Boucanet) entre 1895 et 2009 a été mise en évidence par le CEFREM via le calcul du budget sédimentaire global (-26,1 millions de m³ sur cette période, cf. fig. 1), avec quelques nuances : ce budget est excédentaire entre 1895 et 1984 (4,1 millions de m³ de gains, cf. fig. 2) puis déficitaire (-30,2 millions de m³) à partir de 1984. On observe donc un basculement d'une situation de léger excédent (1895-1984) à une situation d'érosion de l'avant-côte (1984-2009).

Il existe également des nuances par compartiments : Roussillon, Narbonnais, lido de Sète, golfe d'Aigues Mortes (cf. fig. 2) :

- Entre 1895 et 1984, les compartiments en accrétion correspondent à la moitié sud du Languedoc-Roussillon – Roussillon (9,4 millions de m³) et Narbonnais (8,7 millions de m³) – alors que les compartiments de la moitié nord du Languedoc-Roussillon sont en érosion – lido de Sète (-1,1 millions de m³) et golfe d'Aigues Mortes (-12,8 millions de m³).

- Entre 1984 et 2009, l'ensemble des compartiments sont en érosion : -6,3 millions de m³; -15,7 millions de m³; -3,2 millions de m³ et -4,8 millions de m³ perdus respectivement pour le Roussillon, Narbonnais, lido de Sète et golfe d'Aigues Mortes. Durant cette période, l'érosion se généralise donc à l'ensemble des compartiments, avec une intensification au nord et une inversion de tendance au sud.

Par ailleurs, les volumes gagnés en 89 ans (1895-1984) sont sept fois inférieurs aux volumes érodés en 25 ans (1984-2009) !

On constate donc une intensification significative des processus d'érosion de l'avant-côte à l'échelle du Languedoc-Roussillon au cours du XX^e siècle. Devant ce constat, le groupement GLADYS (cf. p. 75), à travers le Service National d'Observation

(SNO) DYNALIT*, réalise un suivi à long terme de certains sites représentatifs, comme le lido rétrogradant de Maguelone ou la plage progradante de la Franqui afin de corrélérer les évolutions constatées au forçage hydrodynamique moyen.

Contact (CEFREM) :

R. Certain, certain@univ-perp.fr

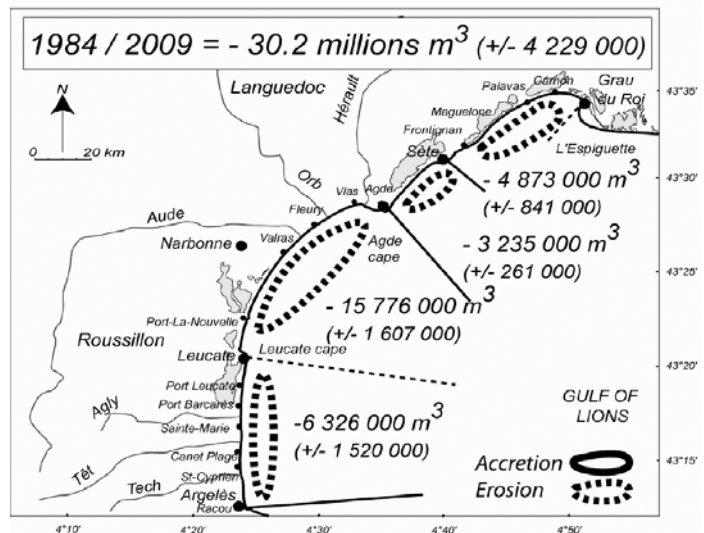
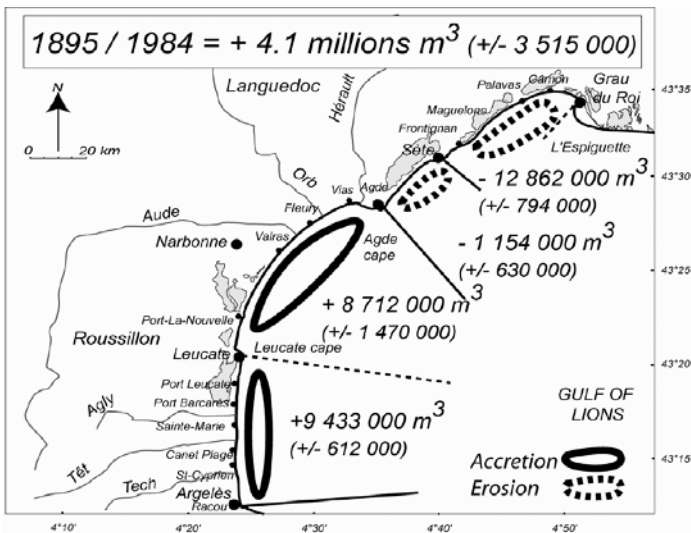
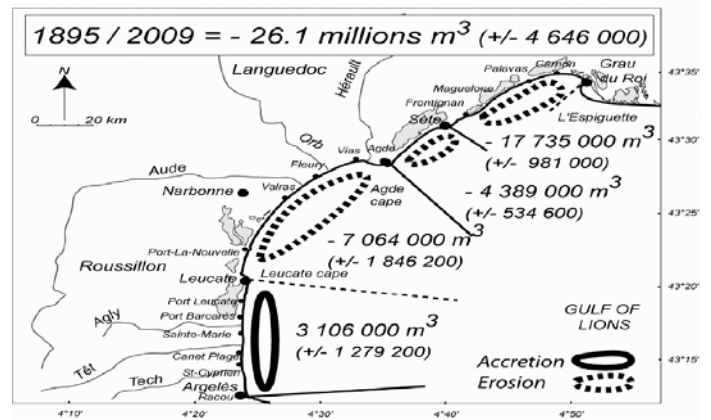
Plus d'informations :

<https://elmusca.wordpress.com>

* Service National d'Observation DYNALIT : www.dynalit.fr

► Fig. 1. Budget sédimentaire entre 1895 et 2009 par compartiments et marges d'erreur (en m³, d'Argelès au Boucanet). D'après Brunel et al., 2014. Geomorphology. 204: 625-637.

▼ Fig. 2. Budget sédimentaire entre 1895/1984 et 1984/2009, par compartiments et marges d'erreur (en m³, d'Argelès au Boucanet). D'après Brunel et al., 2014. Geomorphology. 204: 625-637.



Surcote et houle sont les principaux contributeurs de la variation du niveau de la mer en Méditerranée.

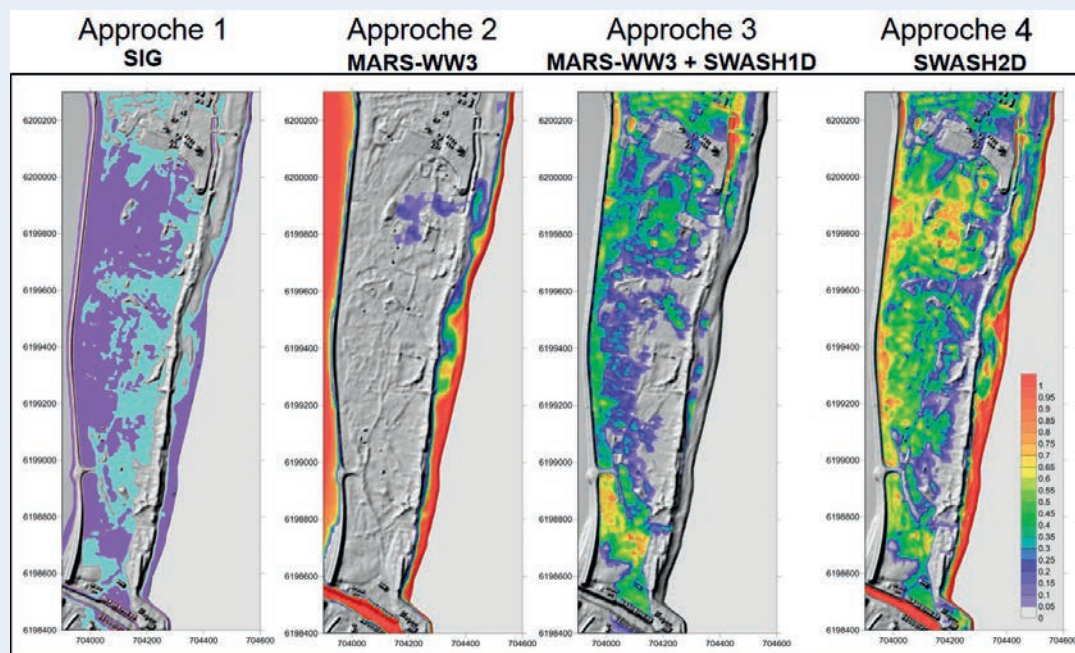
MESURE DE LA VULNÉRABILITÉ À L'ÉROSION

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours. Si la modélisation des phénomènes (surcote atmosphérique, surcote de vagues, jet de rive, mécanismes de franchissement et d'écoulement à terre) est possible par une approche « tous modèles », la mise en œuvre de ces outils reste coûteuse en temps de calcul et des approches simplifiées sont souvent mises en œuvre pour évaluer cet aléa. En 2017, une étude méthodologique a été réalisée sur le site pilote de Leucate-Le Barcarès pour comparer différentes techniques d'évaluation de

la submersion, des approches ultra simplifiées de type SIG aux approches de modélisation vagues à vagues. La fiabilité des simulations a pu être validée grâce aux observations du Réseau de suivi des tempêtes et de leurs impacts en Occitanie*. **Les outils développés permettent, au-delà de l'évaluation de l'aléa et des risques, d'améliorer significativement la compréhension des mécanismes de débordement/franchissement, ainsi que des effets de l'ouverture de brèches dans les cordons littoraux à l'occasion des tempêtes marines les plus extrêmes.**

Contact (BRGM) : Y. Balouin, y.balouin@brgm.fr

* <http://littoral.languedocroussillon.fr/suivi-des-tempetes-et-de-leurs-impacts.html>



▲ Comparaison des résultats obtenus en termes de hauteur de submersion pour des approches simplifiées (méthode SIG 1) à des approches de modélisation de plus en plus complexes (2 à 4). D'après Nicolae-Lerma et al., 2018.

Les surcotes : un phénomène qui contribue aux variations du niveau de la mer

Les variations majeures du niveau de la mer sont dominées par trois dynamiques distinctes : la marée, les surcotes et la houle. En Méditerranée, du fait de l'amplitude limitée des marées, les principaux contributeurs sont la surcote et la houle. La surcote du large est liée essentiellement au différentiel de pression atmosphérique entre les différentes zones du bassin, suivant peu ou prou la règle du baromètre inversé : une diminution d'un millibar de la pression atmosphérique entraîne une compensation de l'océan dont le niveau s'élève alors d'un centimètre. Lors d'une tempête sévère, une chute de 100 millibars de la pression atmosphérique entraînera une surcote d'un mètre. Sur le littoral, l'obstacle du continent permet au vent d'amplifier cette surcote en poussant les masses d'eau océanique en direction de la côte où leur accumulation s'ajoute aux effets de la pression. Le déferlement de la houle sur la bande littorale crée aussi une montée du niveau de la mer (setup de houle) qui peut atteindre un demi-mètre (en plus

des oscillations des vagues). Lorsque ces trois facteurs se combinent, des surcotes, de deux mètres ou plus, deviennent possibles sur la durée du phénomène météorologique, en général une dizaine d'heures, créant les conditions d'une submersion dramatique de la bande littorale et la pénétration des vagues jusqu'aux ouvrages côtiers, bâtiments, infrastructures, etc., sans parler de leur impact déclencheur de crues des fleuves côtiers, gonflés par les précipitations concomitantes et bloqués dans leur écoulement naturel. L'étude et la prévision précise de ces phénomènes, via la modélisation numérique, reste aujourd'hui un enjeu majeur, impliquant les communautés océanographiques,

atmosphériques et hydrologiques. Le LEGOS développe et transfère les configurations de modélisation de la surcote océanique à l'échelle de l'océan mondial qui sont utilisées en routine par les services opérationnels de traitement de la donnée altimétrique satellitaire (NASA/CNES/ESA). Il participe à des études à l'échelle régionale, notamment dans les mers européennes, en mettant ses capacités de modélisation à haute résolution de la marée et de la surcote au service des équipes de recherche nationales et internationales, en collaboration avec le service national pour la topographie océanique et hydrologique (CTOH, OMP).

Contact (LEGOS) :
F. Lyard, florent.lyard@legos.obs-mip.fr

Plus d'informations : www.avisio.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products.html

Impacts côtiers des apports continentaux

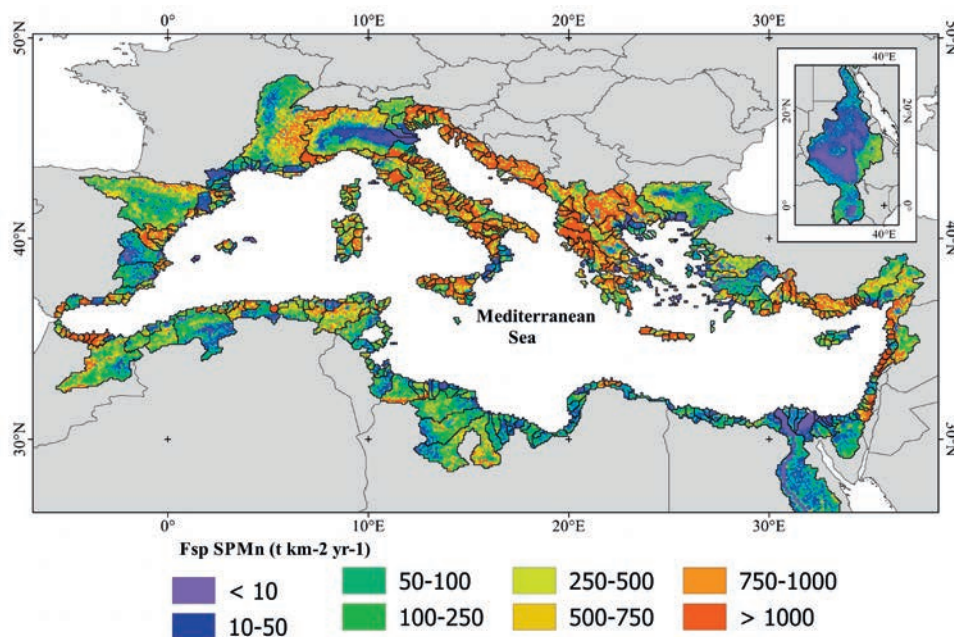
Les apports fluviaux : vecteurs de la répercussion des changements globaux en mer

La Méditerranée, mer semi-fermée, est très exposée aux apports fluviaux, aujourd'hui largement contrôlés par les activités humaines dans les bassins versants. L'étude des transferts de matières le long du continuum terre-mer en Méditerranée est une des spécificités du CEFREM. Pour la Méditerranée et la mer Noire, le laboratoire s'est spécialisé, dans le cadre de projets européens, dans la mise en place d'un système d'information géographique détaillé sur les bassins versants et dans la modélisation rétrospective et prospective des apports en eau, en sédiments, en nutriments et en contaminants en fonction des forçages climatiques et anthropiques. Ces travaux ont montré les tendances marquées que caractérisent ces apports et leurs impacts considérables sur la productivité des eaux côtières.

À l'échelle du golfe du Lion (zone d'étude privilégiée du laboratoire), le CEFREM a initié le suivi systématique des fleuves côtiers pour comparer leurs apports avec ceux du Rhône, aujourd'hui le plus grand fleuve de la Méditerranée. Ce travail, initié dans le cadre d'une zone atelier du CNRS, a été pérennisé grâce à l'intégration dans le SNO MOOSE* de deux stations de prélèvement automatique sur le Rhône et la Têt (pilotees par le CEFREM). **Les recherches sur les fleuves du golfe du Lion ont permis de quantifier le rôle des apports particulaires terrigènes dans la dynamique sédimentaire du plateau continental et leurs exportations vers le large**, y compris leurs transformations dans les grands cycles biogéochimiques comme celui du carbone. Par le couplage avec les contaminants associés – métaux lourds (cf. p. 43) et, depuis peu, débris plastiques (cf. p. 48) –, ces travaux servent à identifier les zones de pression anthropique en mer et offrent ainsi de précieuses informations au Parc naturel marin du golfe du Lion pour sa mission de gérer durablement les ressources marines. **À l'intérieur des bassins versants, ces travaux aident à quantifier l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau et la biodiversité aquatique et contribuent à l'élaboration des stratégies de mitigation face à la menace des changements climatiques et anthropiques.**

Contact (CEFREM) :
W. Ludwig, ludwig@univ-perp.fr

* Système national d'observation MOOSE : Mediterranean Ocean Observing System for the Environment.



▲ Flux de sédiments spécifiques (t km⁻² an⁻¹) des bassins versants à la Méditerranée. D'après Sadaoui et al., 2018. Progress in Oceanography. 163: 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.poccean.2017.08.003>

▼ Assemblage de particules de plastique collectées à l'embouchure de la Têt. © Ph. Kerhervé



M odélisation de la dynamique du trait de côte et de la submersion marine

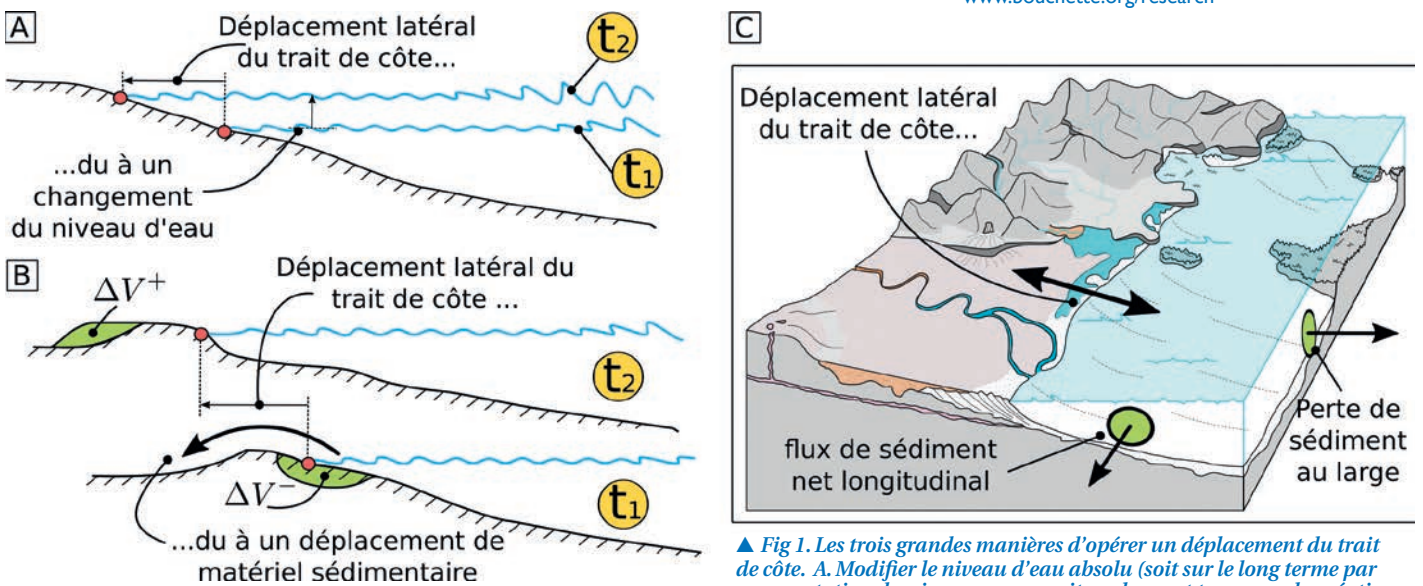
Le trait de côte est sans aucun doute l'élément le plus emblématique du paysage littoral puisqu'il marque la frontière entre le monde terrestre et le monde marin. De fait, ses caractéristiques (sableux, à galets, rocheux, à mangrove, sur récif, protégé ou exposé, à marée ou pas...) déterminent nos pratiques en matière d'habitat et d'aménagement, nos activités récréatives et même notre style de vie. Son évolution au cours du temps – surtout lorsqu'il est en recul – nourrit tous les fantasmes ; il s'invite dans de nombreux débats sociétaux : élévation du niveau marin, surexploitation de la ressource en sable de plage, déficit en apports sédimentaires par les rivières, recrudescence supposée des tempêtes.

Pour autant, le trait de côte est un objet complexe dont la dynamique, hautement non-linéaire, est plutôt mal comprise. En effet, la position du trait de côte résulte de la compétition incessante (instantanée et moyenne) entre la dynamique du niveau d'eau et celle des apports sédimentaires dans/hors le système littoral (cf. fig. 1). C'est pourquoi la modélisation mathématique, numérique et expérimentale de ces deux familles de mécanismes fait l'objet de toute l'attention de la communauté des chercheurs littoralistes. Les questions importantes sont (i) la modélisation exacte de la surcote de tempête avec la prise en compte des couplages 3D entre vent, houle, courant et marée et (ii) la modélisation physique-mathématique des

instabilités non-linéaires du trait de côte (cf. fig. 2, 3 et 4) qui se développent selon des mécanismes quasiment impossibles à reproduire avec les outils d'ingénierie actuels. Différentes équipes de recherche de la région Occitanie (GLADYS, Université de Montpellier [UM], Université de Perpignan Via Domitia [UPVD], UMR GM, IMAG, L2C, LA) travaillent conjointement sur ces questions et prennent régulièrement soin de reformuler leurs résultats pour améliorer les outils R&D de prévision de la surcote marine et de la morphodynamique sédimentaire littorale.

Contact (GM) : F. Bouchette,
frederic.bouchette@umontpellier.fr

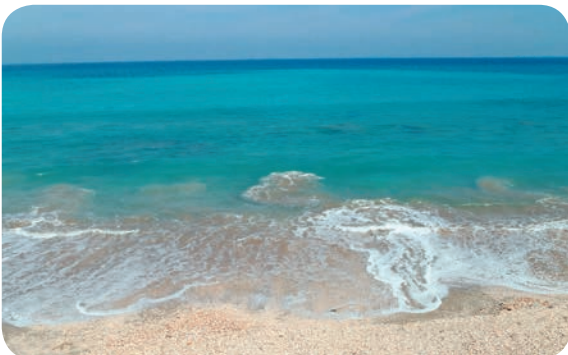
Plus d'informations :
www.bouchette.org/research



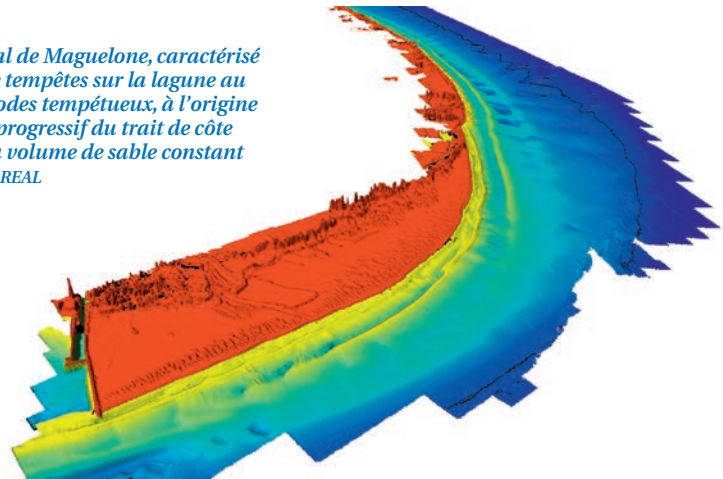
▲ Fig 1. Les trois grandes manières d'opérer un déplacement du trait de côte. A. Modifier le niveau d'eau absolu (soit sur le long terme par augmentation du niveau moyen, soit sur le court terme par la création d'une surcote pendant les tempêtes). B. Déplacer à volume constant du matériel sédimentaire de la mer vers les lagunes, en général pendant les événements tempétueux. C. Modifier le bilan sédimentaire de tout le système littoral en créant des variations de flux longitudinaux ou des pertes vers le large, entraînant une modification du stock sédimentaire sableux littoral.



◀ Fig. 2. Le littoral de Maguelone, caractérisé par des dépôts de tempêtes sur la lagune au moment des épisodes tempétueux, à l'origine du déplacement progressif du trait de côte vers le piémont, à volume de sable constant sur le littoral. © DREAL



◀ Fig. 4. Un trait de côte développant ce qu'on appelle des « chevrons de plage », des instabilités auto-cycliques à l'origine de la dynamique à court terme du trait de côte. © F. Bouchette



▲ Fig. 3. Une image LIDAR (imagerie laser aéroportée) de la plage de l'Espiguette. On y distingue le trait de côte (changement jaune/rouge) et les morphologies sous-marines très caractéristiques de la dynamique sédimentaire littorale, si complexes à modéliser à cause des couplages complexes entre hydrodynamisme et transport sédimentaire à toutes les échelles de temps et d'espace. © F. Bouchette/GLADYS

Les décharges d'eau souterraine en mer le long du golfe du Lion : des « robinets » grands ouverts entre les continents et la mer

Il existe le long du littoral méditerranéen français de nombreuses résurgences karstiques qui se déchargent en mer et dans les lagunes côtières. **Ces décharges d'eau souterraine constituent une source encore méconnue de matières et d'éléments chimiques qui pourraient impacter la qualité des eaux côtières et le fonctionnement des écosystèmes marins côtiers.** De plus, ces résurgences sont une perte nette d'eau douce, puisque cette eau n'est pas utilisée pour les activités humaines. Ces eaux souterraines sont généralement enrichies en sels nutritifs qui peuvent favoriser le développement du phytoplancton (y compris les espèces toxiques) et transportent également des polluants (ex. mercure). À l'échelle globale, ces décharges d'eau souterraine en mer représentent environ 6 % du flux d'eau apporté par les fleuves à l'océan mais, en Méditerranée, les quantités de nutriments introduites sont équivalentes, voire supérieures, aux apports des rivières locales (à l'exception du Rhône).

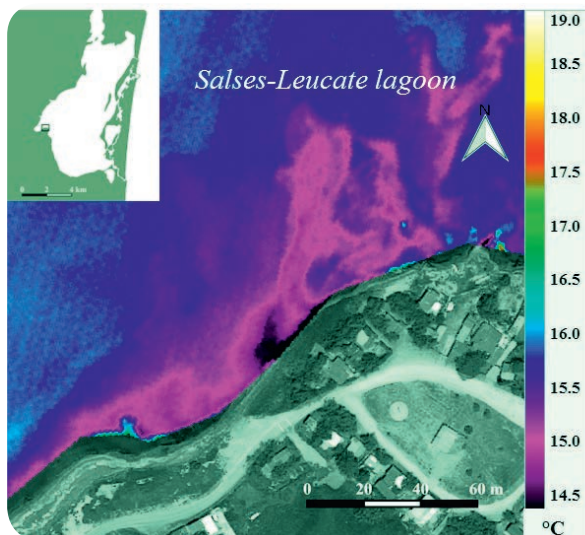
L'étude de ces systèmes est rendue complexe par la difficulté de les détecter précisément et par la nature souvent diffuse des rejets (cf. image ci-contre). Une approche novatrice, combinant l'utilisation d'images aéroportées en infrarouge thermique (LEGOS/CNES) et des analyses *in situ* acquises au cours de campagnes de terrain, a été mise en œuvre dans le cadre du projet MED-SGD* (2016-2018) par des laboratoires de la région Occitanie – LEGOS et GET (Toulouse), LOMIC (Banyuls-sur-Mer), HSM (Montpellier) – en collaboration avec d'autres laboratoires français et étrangers. La mesure de radioéléments naturels tels que les isotopes du radium (analysés au laboratoire de mesure des faibles radioactivités, LAFARA, en Ariège, avec le soutien de la Région Occitanie et de l'Union européenne ; FEDER SELECT) a permis de tracer les décharges d'eau souterraine et de quantifier les flux d'eau et d'éléments chimiques associés

à ces systèmes. En parallèle, les mesures biogéochimiques mettent en évidence l'influence de la stœchiométrie** élémentaire sur les populations microbiennes locales.

* Projet MED-SGD (financement ANR) : Décharges d'eau souterraine en mer : étude d'une source cachée d'éléments chimiques à l'océan. Collaboration avec : Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement, l'UMR « Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux », l'Institut Méditerranéen d'Océanologie, l'Université autonome de Barcelone, l'Université de Heidelberg, Woods Hole Oceanographic Institution et Stony Brook University.

** Proportions dans lesquelles les composés chimiques sont présents dans le milieu et sont utilisés dans les réactions biochimiques.

Contacts : P. van Beek (LEGOS), vanbeek@legos.obs-mip.fr, P. Conan (LOMIC), pascal.conan@obs-banyuls.fr et S. Bejannin (LEGOS), simon.bejannin@legos.obs-mip.fr



► **Utilisation de l'imagerie aéroportée en infrarouge thermique pour détecter un panache d'eau souterraine qui se décharge dans la lagune de Salses-Leucate.** D'après Bejannin et al., 2017. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 13: 72–90. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.001>

Pourquoi tracer la dynamique côtière par l'analyse des métaux lourds ?

Les zones côtières, qui ne représentent qu'une faible partie du milieu marin,

sont pourtant un environnement clé à la croisée des domaines continentaux, océaniques et atmosphériques. Elles constituent « un réacteur » où les apports, naturels ou anthropiques, peuvent être stockés dans le sédiment ou redistribués, voire exportés plus au large par des processus hydrodynamiques (courants, houle, tempêtes, *cascading*, cf. p. 17). Les éléments traces métalliques (ex. Pb, Zn, Cu), souvent considérés comme des contaminants délétères pour l'environnement, ont des origines variées (naturelles *via* l'érosion des sols ou anthropiques *via* les activités industrielles, l'agriculture ou les rejets urbains...) et font l'objet d'une attention toute particulière en Méditerranée et dans le golfe du Lion.

Depuis une dizaine d'années, le CEFREM, réalise un suivi des flux élémentaires métalliques entrant dans le golfe du Lion. Cette activité a été intégrée au sein du SNO MOOSE. Les apports continentaux par les fleuves sont mesurés sur le Rhône et cinq fleuves côtiers se déversant dans le golfe du Lion (Hérault, Orb, Aude, Agly, Têt) afin

d'en quantifier et d'en étudier la variabilité saisonnière et interannuelle. Le compartiment atmosphérique est pris en considération par la récolte des retombées atmosphériques sur les deux stations côtières du Cap Béar (Port-Vendres) et de l'île du Frioul au large de Marseille. Il est évident que les événements météo-climatiques (fortes pluies, crues, épisodes sahariens...) qui sévissent périodiquement dans la région ont une influence majeure sur les flux de métaux. En Méditerranée nord-occidentale, l'export de matières hors du plateau continental se fait essentiellement vers le sud, *via* les canyons qui l'entaillent. Les quantités de polluants exportés sont estimées grâce à des pièges à particules déployés dans ces sites stratégiques et contribuent à l'établissement d'un bilan de « l'épuration côtière ». **La poursuite d'un suivi exhaustif à long terme des flux de métaux lourds dans cette partie de la Méditerranée permettra d'appréhender à la fois les changements météo-climatiques et anthropiques qui régissent sa dynamique.**

Contact (CEFREM) :

[D.Aubert, dominique.aubert@univ-perp.fr](mailto:D.Aubert,dominique.aubert@univ-perp.fr)

Plus d'informations :

www.moose-network.fr/?page_id=269



▲ **Système de collecte des retombées atmosphériques au Cap Béar.** © D. Aubert

Conséquences des activités industrielles et anthropiques sur la mer et les zones côtières

Impact de l'extraction de sable sur la macrofaune benthique

Compte tenu des problématiques d'érosion actuelles ainsi que de la volonté de ré-ensabler les plages sur notre littoral touristique, il est nécessaire de pouvoir mesurer l'impact sur le milieu des activités d'extraction de sable ainsi que d'évaluer les capacités et les temps de résilience des habitats marins. Afin de répondre à ces questions, le LECOB participe au projet IMPECAPE*, financé par l'Agence Française pour la Biodiversité et réalisé en partenariat avec la Communauté d'Agglomération Hérault Méditerranée pour sa partie méditerranéenne. Ce projet vise à mettre en relation des données quantitatives de pressions physiques anthropiques avec des données biologiques pour définir précisément les étapes de restauration des habitats benthiques suite aux pressions exercées.

La zone d'extraction de sable étudiée est localisée au droit du domaine des Orpellières sur la commune de Valras-Plage, au sein du site Natura 2000 « Côtes sableuses de l'Infralittoral Languedocien ». Le sédiment extrait à l'aide d'une drague aspiratrice a été utilisé pour ré-ensabler la plage de Vias soumise à une forte érosion. Les prélèvements de la macrofaune benthique (faune de plus de 1 mm qui vit étroitement associé au sédiment) ont été effectués en mars 2015 juste avant les travaux de dragage, ainsi qu'un mois, sept mois et un an après les travaux. Malgré un aspect semi-désertique, cet habitat abrite des espèces exploitées et caractéristiques de ces fonds tels que les *Solenidae* (couteaux) et les *Donax* (tellines). **Les résultats montrent que l'impact est très localisé et que le milieu n'a pas totalement récupéré un an après les travaux.** Les caractéristiques hydrodynamiques du site laissaient espérer un retour à l'équilibre plus rapide. Le suivi écologique sera donc poursuivi.

Contact (LECOB) :

C. Labrune, labrune@obs-banyuls.fr

* Projet « Étude des pressions et impacts des activités humaines sur les habitats benthiques côtiers pour la mise au point d'indicateurs et de protocoles de surveillance de l'état écologique de ces habitats ».



▲ Habitat des sables fins de haut niveau, caractéristique de la zone peu profonde du littoral languedocien. © Andromède Océanologie

Impact des produits de santé sur les organismes et les écosystèmes

La présence de produits pharmaceutiques et d'hygiène corporelle (PPCP) dans l'environnement est connue depuis les années 1970. Par contre, c'est seulement depuis 10-15 ans que les techniques analytiques se sont suffisamment améliorées pour permettre de quantifier la présence de ces substances dans les eaux (effluents des stations d'épuration des eaux usées domestiques, eaux de surface, eaux souterraines, etc.), dans les sols et dans les organismes vivants, même à des niveaux de concentration très faibles. Les PPCP sont introduits dans le milieu aquatique via les réseaux d'assainissement municipaux et les effluents des stations d'épuration mais aussi directement via la baignade pour les produits solaires par exemple. Les technologies de traitement utilisées dans les stations d'épuration municipales n'étant pas efficaces pour l'élimination de ces substances, une fraction de ces produits se retrouve *in fine* dans les boues dont certaines sont utilisées pour l'épandage.

La présence de PPCP dans l'environnement est devenue un problème de société et les pouvoirs publics sont sollicités quant aux mesures de prévention et de réduction à mettre en place. Les niveaux d'exposition et les impacts à long terme de ces substances sur l'homme et les écosystèmes nécessitent un gros effort de recherche et une meilleure capitalisation des informations déjà acquises. Un des objectifs du LBBM de Banyuls est de déterminer les niveaux d'exposition (consommation, sources de contamination, niveaux de concentration dans les différents compartiments de l'environnement), les dangers et les risques pour l'environnement et les organismes. Une attention particulière est également portée aux normes et méthodes d'analyse des risques associés à la présence de ces molécules afin de contribuer à l'évolution de la réglementation.

Contact (LBBM) :

P. Lebaron, philippe.lebaron@obs-banyuls.fr

Plus d'informations : http://usr3579.obs-banyuls.fr/fr/activites_de_recherche/theme_3/degradation_personal_care_products2.html



◀ Plage de Collioure en période estivale. © Philippe Lebaron

Surveillance *in situ* de microorganismes pathogènes dans les environnements littoraux à l'aide de bio-capteurs

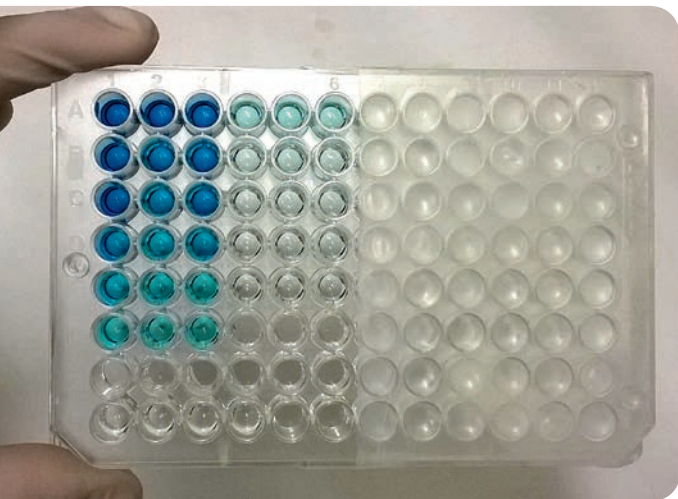
Certains effets du changement climatique et de l'augmentation de la population côtière sont d'ores et déjà mesurables sur les communautés bactériennes marines des eaux côtières et sur l'occurrence d'agents bactériens pathogènes émergents ou ré-émergents. En raison des répercussions sanitaires et des pertes économiques liées aux

ressources aquacoles contaminées, le contrôle microbiologique de la qualité des eaux littorales reste un axe majeur de surveillance. Aujourd'hui, la surveillance en temps réel et *in situ* de variables dynamiques peut être réalisée à l'aide de capteurs autonomes. La surveillance des zones sensibles (eau de baignade, zone de production aquacole) est aujourd'hui rendue possible par l'implantation de bouées de mesure permettant une analyse sur site et à haute fréquence de paramètres principalement physico-chimiques (température, salinité, pH, oxygène dissous, sels nutritifs...). Toutefois, l'analyse automatisée de contaminants bactériens n'est pas aujourd'hui encore accessible. C'est dans cette optique que le LBBM et l'équipe associée « Biocapteurs-Analyse-Environnement » (UPVD) travaillent à l'élaboration de biocapteurs à ADN pour le suivi de contaminants bactériens dans les écosystèmes aquatiques. Des

biocapteurs pour la détection de *Escherichia coli* (indicateur de la dégradation de la qualité de l'eau par des contaminations fécales) et du genre bactérien *Vibrio* (dont de nombreuses espèces sont pathogènes), ont d'ores et déjà été développés. Ces biocapteurs utilisent un format d'hybridation en sandwich permettant de piéger et de révéler une séquence d'ARN spécifique des contaminants recherchés. Deux modes de détection par colorimétrie et chimiluminescence, respectivement ont récemment été évalués sur des eaux naturellement contaminées de la lagune de Salses-Leucate (Aude). Leur transfert vers des modes de détection par électrochimie permettra de miniaturiser les capteurs développés et offre de nouvelles perspectives dans la surveillance bactériologique en continu et sur site des eaux côtières.

Contacts (LBBM) :

J. Baudart, baudart@obs-banyuls.fr
et L. Barthelmebs, barthelm@univ-perp.fr



▲ Bio-capteur colorimétrique pour la détection des bactéries. L'intensité de la coloration bleue est proportionnelle à la quantité d'acide nucléique cible piégé par le capteur. © Elise da Silva

Comprendre et prédire les maladies multifactorielles de bivalves marins : le cas de l'huître

Durant des décennies, l'étude des maladies infectieuses a été simplifiée à des pathosystèmes expérimentaux minimisant les influences de la diversité des hôtes et des pathogènes, ainsi que des environnements biotiques et abiotiques. Ces approches réductionnistes ont rendu difficile la caractérisation de maladies d'étiologies complexes. C'est le cas de maladies provoquant des mortalités massives et récurrentes chez de nombreuses espèces d'intérêt écologique et économique telles que les pollinisateurs, les coraux et les mollusques marins exploités.

Les travaux coordonnés par IHPE dans le cadre du projet ANR DECIPHER* ont permis de décrypter une telle maladie d'étiologie complexe affectant l'une des principales espèces d'invertébrés marins exploitées dans le monde, l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Les mortalités, affectant principalement les stades juvéniles de ce mollusque, n'ont cessé d'augmenter depuis 2008, en France et dans le monde entier, mettant en péril l'activité conchylicole. Face à ce défi, nous avons mis en œuvre une approche intégrative combinant l'utilisation de protocoles expérimentaux écologiquement réalistes avec des analyses moléculaires approfondies (étude du transcriptome et du microbiome), sur des familles d'huîtres présentant des susceptibilités contrastées à la maladie. Les résultats obtenus ont montré que l'étape initiale et nécessaire de la pathogenèse est l'infection de l'huître par un herpesvirus (*OsHV-1 μvar*) qui induit une altération de ses défenses



▲ Suivi des mortalités d'huîtres sur le terrain dans le cadre du projet ANR DECIPHER. © Y. Gueguen/Ifremer

antimicrobiennes et une déstabilisation de son microbiote. Ce processus conduit à une infection secondaire par des bactéries opportunistes potentiellement pathogènes qui se multiplient dans les tissus entraînant des dommages tissulaires irréversibles conduisant à la mort des huîtres. Ces travaux ont aussi permis d'identifier des gènes candidats de la résistance des huîtres ouvrant la voie à de nouvelles stratégies d'élevage ostréicole via la mise en œuvre de programme de sélection d'huîtres résistantes à la maladie.

Contacts (IHPE) :

J. de Lorgetil, jdorgetil@ifremer.fr,
Y. Gueguen, ygueguen@ifremer.fr
et G. Mitta, mitta@univ-perp.fr

* Projet DECIPHER : Déchiffrement des maladies multifactorielles : cas des mortalités de l'huître (financement ANR). Le consortium du projet réunit les UMR IHPE, LEMAR (Laboratoire des sciences de l'environnement marin), I2BC (Institut de Biologie Intégrative de la Cellule) et MARBEC ainsi que le CRCM (Comité Régional de Conchyliculture de Méditerranée).

Origine, impact et solutions à la pollution des microplastiques en Méditerranée

Le CEFREM et LOMIC étudient la pollution de la Méditerranée par les microplastiques (MPs < 5mm) en développant des approches innovantes.

Quelle est l'origine de cette pollution ? Les bassins versants représentent la principale source de MPs. Un suivi mensuel mené par le CEFREM sur le Rhône et un petit fleuve côtier (la Têt) montre l'importance des épisodes pluvieux dans le transfert de ces MPs vers la mer. On estime que **90 % de la pollution en mer provient du continent.**

Quel est son impact sur le milieu marin ? Au-delà de la pollution visuelle, les plastiques peuvent être ingérés par certaines espèces et

provoquer leur mort par obstruction de leurs voies aériennes (tortues, poissons, oiseaux...) ou par accumulation de polluants adsorbés sur les plastiques (hydrocarbures, PCB...). Le LOMIC a montré que les plastiques sont également colonisés par un grand nombre de bactéries (« la plastisphère »). La détection de cyanobactéries (qui fixent le CO₂) et l'activité particulièrement importante des bactéries hétérotrophes (qui produisent du CO₂) posent aujourd'hui **la question de l'impact de la plastisphère sur le bilan de carbone dans les océans.**

Quelles solutions ? La sensibilisation des consommateurs est encore aujourd'hui nécessaire, puisque **les ménages sont principalement à l'origine de cette pollution, par négligence ou par manque de collecte satisfaisante des déchets.** La production de plastiques « biodégradables » est également d'actualité, même si elle représente aujourd'hui moins de 5 % du marché. L'OOB travaille actuellement en lien avec le ministère de la Transition écologique et solidaire pour la mise au point de tests de biodégradabilité et de toxicité en milieu marin.

Contacts : J.F. Ghiglione (LOMIC), jean-francois.ghiglione@obs-banyuls.fr et P. Kerhervé (CEFREM), kerherve@univ-perp.fr

▼ *Exemple de la quantité de microplastiques collectée après 1 heure de prélèvement de l'eau de surface par un filet Manta lors de la mission TARA-Méditerranée. © Noélie Pansiot/Fondation TARA-Expéditions*



90 % de la pollution marine provient du continent.

La tortue caouanne, une espèce indicatrice de la pollution des mers par les plastiques

Nos déchets plastiques sont omniprésents dans les écosystèmes marins. Ils interagissent avec les espèces à tous les niveaux trophiques, par ingestion ou emmêlement, avec des mortalités directes ou indirectes, en altérant les capacités d'alimentation ou de protection des individus. Les tortues marines sont très concernées par l'ingestion de déchets, si bien que la tortue caouanne (*Caretta caretta*) a été proposée comme un bio-indicateur des impacts des déchets sur la faune marine dans le cadre de directives européennes visant à mesurer l'efficacité des mesures de restauration du Bon état écologique (BEE) du milieu marin (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin [Europe], conventions des mers régionales OSPAR [Atlantique Nord-Est] et Barcelone [Méditerranée]).

Pour mettre en œuvre l'indicateur « Déchets ingérés par les tortues marines » (>1 mm), une approche globale et standardisée ainsi que la définition d'un seuil (BEE) en dessous duquel les déchets ne provoquent plus de dommages aux espèces, sont nécessaires et urgents. C'est une des missions du programme INDICIT (*INDICator Impact Turtles*), cofinancé par la Commission européenne

et coordonné par le CEFE (2017/2019). Il implique des partenaires de cinq pays européens (Portugal, Espagne, France, Italie, Grèce) et deux non européens (Turquie et Tunisie), tous travaillant en étroite partenariat avec des réseaux qui recueillent des tortues marines et collectent les déchets ingérés. En France, les chercheurs sont associés aux centres de soin, aux réseaux d'échouages et à des vétérinaires, afin de collecter ensemble des données standardisées*. Des contenus stomacaux de plus de plus de 1 200 tortues ont pu être décrites au cours du programme INDICIT. **L'occurrence d'ingestion de déchets est de 55 % de ces contenus stomacaux chez la tortue caouanne en Méditerranée et de 74 % en zone atlantique.** Ces données permettront de définir le seuil et, ainsi, évaluer à long terme les effets des politiques de réduction de l'usage des plastiques.

Contacts :

G. Darmon (CEFE), gaelle.darmon@cefe.cnrs.fr et C. Miaud (CEFE-EPHE), claudie.miaud@cefe.cnrs.fr

Plus d'informations : <https://indicit-europa.eu/>

* Collaboration avec le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), le Centre d'étude et de sauvegarde des Tortues Marines de Méditerranée (CestMed), le réseau des tortues marines de Méditerranée française (RTMMF), le laboratoire d'analyses vétérinaires départemental du Gard, l'Ifremer et le Centre d'étude et de sauvegarde des Tortues Marines de l'Aquarium La Rochelle (CESTM).



► Contenu stomacal d'une tortue marine échouée.
© S. Ciccione/Réunion des Musées régionaux/Kélonia

Les bio-essais : un outil d'évaluation des risques écologiques associés à la pollution en milieu littoral

Le milieu marin est considéré comme le récepteur ultime d'une grande

variété de polluants provenant du continent, souvent accumulés dans la zone littorale qui abrite une grande biodiversité. La protection et la restauration des milieux aquatiques font l'objet d'un développement réglementaire volontaire, porté au niveau européen par la directive cadre sur l'eau (DCE) en 2000, le règlement REACH sur les produits chimiques en 2005 et la directive cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM) en 2008. Les rapports des campagnes DCE 2006 et 2009 faisant apparaître un « état moyen » sur le littoral de la côte Vermeille, l'OOB a été mandaté par le Parc naturel marin du golfe du Lion pour évaluer les sources de la pollution et leurs effets sur la qualité du milieu dans cette zone. Soutenus également par le Fond Européen pour la Pêche (FEP), par le Conseil Général des Pyrénées-Orientales et par le CNRS, les projets VERMEILLECOTOX* (2012-2015) et ECOLEAU (2016-2017) ont mis en évidence les sources de pollution de l'eau et des sédiments respectivement par des pesticides à la sortie des stations d'épuration et par des métaux lourds dans

les ports. Leur dangerosité pour les organismes marins a été évaluée en combinant plusieurs bio-essais qui utilisent des tests sur des organismes vivants pour évaluer la toxicité du milieu. Chaque organisme ayant des sensibilités différentes aux polluants, nous avons testé plusieurs organismes modèles marins : la bactérie bioluminescente *Vibrio fischeri*, l'oursin *Paracentrotus lividus*, le céphalochordé *Branchiostoma lanceolatum* et le bar commun *Dicentrarchus labrax*. Un travail important a été réalisé grâce à l'implication remarquable de plus de 30 agents qui ont analysé plus de 30 000 données provenant d'échantillons d'eau et de sédiments prélevés tous les mois dans 14 sites (ports, stations d'épurations, fleuves, zones côtières). **Les résultats de ce travail ont permis d'établir un schéma de stratégie de réduction des risques en relation directe avec les usages qui sera mis en place par l'intermédiaire du Parc naturel marin du golfe du Lion.**

* Projet VERMEILLECOTOX (Qualité chimique et écologique du littoral de la côte Vermeille) : http://lomic.obs-banyuls.fr/fr/axe_4_ecotoxicologie_et_ingenierie_metabolique_microbienne/vermeillecotox.html

Contact (LOMIC) : J.F. Ghiglione, ghiglione@obs-banyuls.fr

Plus d'informations : http://lomic.obs-banyuls.fr/fr/axe_4_ecotoxicologie_et_ingenierie_metabolique_microbienne/projets-theme-3.html

◀ Conditionnement d'eau de mer à bord du navire océanographique Néréis II pour l'analyse en laboratoire de la qualité chimique et écologique du milieu marin. © Jean-François Ghiglione



Des ressources menacées

Vulnérabilité des activités conchylicoles à la qualité des milieux

La surveillance de la qualité sanitaire des eaux lagunaires et côtières s'effectue mensuellement en situation de surveillance régulière et hebdomadairement lors des épisodes d'alerte. En cas de dépassement des normes de contamination bactériologique, la commercialisation des coquillages est interdite, ce qui peut être très préjudiciable pour les exploitants. Le CEE-M a participé à deux projets européens qui ont évalué ces dommages dans le cas de la lagune de Thau. À partir d'une simulation de la diffusion des contaminations selon les courants (modèle MARS3D) et de la géolocalisation des chiffres d'affaires en fonction des types d'exploitation

et des zones de productivité, il a été possible de déterminer un chiffre d'affaires par maille (carrés de 100 m*100 m) et, par la suite, d'estimer le coût économique des périodes de fermeture en fonction de leur durée moyenne. **Sur la période 2000-2005, ce coût est estimé en moyenne à 2,8 millions d'euros durant la période de Noël et à 2,2 millions en période estivale**, sans intégrer les pertes d'image pour la lagune de Thau ou les reports de fournisseurs. Par la suite, une analyse plus précise de la vulnérabilité a été réalisée sur la période 2005-2009 en fonction de l'exposition, de la sensibilité et des capacités d'adaptation selon les types d'unités de production et les circuits de commercialisation.

La distribution des scores de vulnérabilité conduit à distinguer quatre catégories d'entreprises selon un gradient décroissant de vulnérabilité et avec une répartition assez équilibrée des entreprises entre les quatre catégories. **L'analyse montre également l'intérêt des stratégies de diversification et d'équipement en bassin de purification pour réduire la vulnérabilité.**

Contact (CEE-M) : H. Rey-Valette,
helene.rey-valette@umontpellier.fr

▼ © Syndicat Mixte du Bassin de Thau



De nombreuses menaces liées aux activités anthropiques pèsent sur les ressources marines de Méditerranée : pêche, hydrocarbure, pollution...

Conséquences des mortalités massives de juvéniles d'huitres dans la lagune de Thau

Des mortalités massives de juvéniles d'huitre sont observées sur tout le littoral français depuis 2008, en lien avec une infection virale. Lors de ces phénomènes, les malades et les cadavres ne sont pas extraits du milieu. Quelles sont les conséquences de ces pratiques sur le cycle de la matière, les communautés planctoniques et les transferts de pathogènes des milieux confinés, comme celui de la lagune de Thau ? En couplant des expérimentations en laboratoire et en milieu naturel, les résultats des projets MORTAFLUX et FATE ont montré que (i) l'infection virale induit une diminution du métabolisme de l'huitre tandis que la décomposition des chairs engendre une production de nutriments dans la colonne d'eau, (ii) les communautés planctoniques microbiennes changent significativement au moment de l'infection et des premières observations d'huitres moribondes avec la prolifération de pico (< 3 µm) phytoplancton et d'organismes hétérotrophes bactériovores, (iii) au cours des mêmes périodes, les juvéniles consomment le picoplancton par l'intermédiaire de la filtration des flagellés et des ciliés de tailles plus importantes (10-30 µm), (iv) l'herpes virus est observé dans les chairs d'huitres et en association avec de la matière en suspension de tailles pico (0-3 µm) et nano (3-20 µm) planctonique, (v) un transfert d'ADN viral est observé à proximité des lanternes de prégrossissement, une semaine avant les premiers symptômes de la maladie, avec des valeurs maximales en présence d'huitres

moribondes et de chairs en décomposition. La transmission de la maladie a sans doute lieu par l'intermédiaire de la filtration des chairs en décomposition et des organismes microbiens associés. L'herpes virus peut entraîner des mortalités chez d'autres espèces dès le stade larvaire, ce qui pourrait induire des impacts sur la biodiversité des écosystèmes côtiers. **Il est ainsi recommandé de ne pas introduire d'huitres porteuses d'herpes dans le milieu. L'élevage d'espèces de mollusques filtreurs capables de retenir directement le picoplancton pourrait agir comme bio-filtre pour limiter la transmission de la maladie.**

Contact (MARBEC) :

M. Richard, marion.richard@ifremer.fr

Plus d'informations :

Projet MORTAFLUX (DS Ifremer, EC2CO, 2014-2016) : Étude intégrée de l'incidence des phénomènes de mortalité de naissain d'huitres sur les flux dans le couplage pelagos-benthos d'un écosystème lagunaire, Étang de Thau, France, 2015-2017. <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.03.026>

Projet FATE « Devenir » : étude de cas développée dans le cadre du projet européen VIVALDI, « Preventing and Mitigating farmed Bivalve Diseases » (2016-2020) : www.vivaldi-project.eu/What-is-the-Vivaldi-project/Presentation
<https://pole-lagunes.org/vivaldi-un-projet-europeen-pour-repondre-aux-mortalites-massives-des-coquillages/>



▲ Enceinte pélagique déployée dans la lagune de Thau dans le cadre du projet MORTAFLUX.
© J. Oheix/Ifremer

La surexploitation des ressources halieutiques dans le golfe du Lion

Quatre espèces de poisson d'intérêt commercial, surexploitées ou en état de déséquilibre écologique, font l'objet de suivis scientifiques réguliers dans le golfe du Lion depuis une quinzaine d'années selon l'espèce :

- **Le merlu, dont le stock est surexploité, a vu sa biomasse diminuer – tout comme celle du stock reproducteur ces dernières années – jusqu'à atteindre en 2016 son niveau le plus bas.** Depuis 2007, le recrutement* de cette espèce régresse pour afficher aujourd'hui sa valeur la plus basse jamais atteinte. Depuis 2010, la mortalité par pêche n'a jamais été aussi élevée et l'exploitation, principalement concentrée sur les jeunes, est trop importante pour être durable. Malgré une diminution importante du nombre de chalutiers français (50 % environ) depuis 1998 (surtout depuis 2011), le stock est toujours surexploité.

- **Le stock de rouget de vase est également surexploité avec, toutefois, une biomasse relativement élevée et un recrutement à la hausse.** Actuellement, la mortalité par pêche fluctue sans tendance claire et la biomasse du stock reproducteur tend à augmenter. L'exploitation est principalement concentrée sur les jeunes individus (0-2 ans).

- Alors que la biomasse des stocks d'anchois et de sardines a chuté ces dernières années, entraînant avec elle une crise de la pêcherie, leur abondance (nombre de poissons) s'est

maintenue, voire a augmenté pour la sardine. Aussi, **l'effondrement des captures de ces deux espèces n'est pas dû à leur raréfaction mais à la diminution de l'effort de pêche en l'absence de marché pour des poissons plus petits et plus maigres qu'auparavant.** Nos recherches ont montré que les changements observés dans les populations d'anchois et de sardines (poissons plus petits, plus maigres et plus jeunes) ne sont pas dus à la pression de pêche (le taux d'exploitation des sardines par les pêcheries a ainsi fluctué entre 0 et 2 % depuis 2013, très loin des 40 % généralement utilisés comme cible d'exploitation durable), mais plutôt à des modifications environnementales (changements de la communauté planctonique, cf. p. 27). Pour ces raisons, les stocks de sardine et d'anchois sont actuellement estimés être en déséquilibre écologique.



▲ Chalutiers, Sète. © Isabelle Cheret, 2008

Contacts (MARBEC) :

A. Jadaud, angelique.jadaud@ifremer.fr
et C. Saraux, claire.saraux@ifremer.fr

Plus d'informations :

www.fao.org/gfcm/reports/technical-meetings

* Le recrutement est l'arrivée dans le stock d'une nouvelle classe d'âge. L'âge de recrutement varie selon les espèces.

Impact du chalutage dans le golfe du Lion

Pour une meilleure gestion du milieu marin, il est nécessaire de décrire les habitats marins et la distribution des principales espèces macrobenthiques, de caractériser les effets des pressions anthropiques et d'évaluer la capacité des écosystèmes benthiques à s'adapter aux perturbations d'origine humaine. **Sur le plateau continental, la pêche aux arts traînants (chalut et dragues) est la source principale de perturbation des fonds.** Notre étude tente d'évaluer son impact, dans des contextes hydrodynamiques et sédimentaires variés, à travers trois questions : Comment suivre l'état écologique des habitats benthiques du plateau continental ? Quelles espèces, selon les types sédimentaires concernés, sont à considérer

prioritairement en tant qu'indicateurs d'habitats benthiques sensibles à l'effort de pêche ? L'influence de l'hydrodynamisme peut-il masquer les effets de la pêche selon les habitats considérés et comment définir le « bon état écologique » sans états de référence ?

Pour répondre à ces questions, la combinaison des cartes de pression d'abrasion des fonds et sédimentaires permettra de définir, pour chaque type sédimentaire, des stations impactées et non (ou peu) impactées par la pêche aux arts traînants et de distinguer les effets des processus naturels (hydrodynamiques et sédimentaires) de ceux induits par le chalutage. Par ailleurs, l'échantillonnage exhaustif de ces

stations à l'aide d'un chalut, d'une drague et d'un traîneau vidéo permettra de dresser des listes faunistiques complètes et de rechercher les espèces indicatrices. De plus, une approche par vidéo (comme le *Pagure2*, cf. photo ci-dessous) permettra de mieux observer la faune macro-invertébrée qui est fixée au fond et qui constitue pourtant, au regard de son exposition, un indicateur très précis des habitats benthiques sensibles à l'effort de pêche. **Nos recherches devront contribuer *in fine* à mettre au point des indicateurs à méso-échelles, combinant si nécessaire plusieurs méthodes d'observation, afin de faciliter le suivi de l'impact des arts traînants sur les habitats benthiques.**

Contact (MARBEC) : S.Vaz, sandrine.vaz@ifremer.fr

Plus d'informations : wwz.ifremer.fr/webtv/Campagnes-a-la-mer/PAGURE-2

▼ *Traineau benthique de vidéo sous-marine.* © Sandrine Vaz/Ifremer





▲ *Jeunes caouannes, Maguelone, le 7 octobre 2018.*
©Jean-Baptiste Sénégas

L'OBSERVATOIRE HOMMES-MILIEUX « LITTORAL MÉDITERRANÉEN » (OHM-LM)

L'OHM-LM est un dispositif de recherche interdisciplinaire du CNRS créé en 2012 et soutenu par le LabEx DRIIHM*. Son projet scientifique est l'étude de l'urbanisation et de l'anthropisation côtière en Méditerranée. Dans un contexte de changement des modes de gestion du littoral (gestion intégrée des zones côtières), il s'intéresse à quatre systèmes socio-écologiques littoraux, inégalement soumis à l'artificialisation et aux fréquentations touristiques et récréatives, des régions Occitanie (golfe d'Aigues-Mortes, GAM), Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA, littoral marseillais) et Corse (Balagne et Biguglia). L'OHM-LM réunit les équipes de recherche et les acteurs locaux, institutionnels ou associatifs, autour de problématiques partagées : la gestion et la protection des espaces et des milieux, les services écosystémiques et les aménités environnementales, la qualité bio-physico-chimique des milieux et la santé, le développement/fonctionnement des territoires et la qualité de vie des populations humaines littorales. Trois thématiques majeures intéressent le GAM :

- L'urbanisation côtière. Les logiques d'étalement urbain prévalent encore sur les bassins versants du GAM, alors que les inondations et l'érosion côtière menacent les aménagements réalisés sur le littoral. De nombreuses questions interrogent les formes que doivent prendre les aménagements urbains pour s'inscrire dans le champ de la durabilité, compte tenu du risque de submersion marine et de la perspective de relocalisation des biens et des activités exposés.

- Les usages récréatifs côtiers inspirent de nombreux chercheurs pour comprendre leurs interactions avec l'environnement. Les milieux fréquentés, les attentes des usagers, leur perception des mesures de gestion et de l'évolution de la qualité de l'environnement sont interrogés, en particulier sur les interactions entre la qualité des eaux de baignade, les conditions hydroclimatiques et le tourisme.

- Le fonctionnement, l'intégrité et la restauration des milieux lagunaires constituent une problématique fondamentale compte tenu de la sensibilité et de la vulnérabilité de ces milieux à l'interface terre-mer. Ces milieux suscitent un intérêt grandissant de la part des gestionnaires et des acteurs locaux qui participent et collaborent activement aux travaux de recherche.

Responsable (site du GAM) : P. Monfort (HSM),
patrick.monfort@umontpellier.fr

Plus d'informations : www.ohm-littoral-mediterraneen.fr

* DRIIHM : dispositif de recherche interdisciplinaire sur les interactions hommes-milieux : www.driihm.fr



▲ *Vue aérienne du littoral du golfe d'Aigues-Mortes avec, de bas en haut, Palavas-Les-Flots, Carnon, La Grande Motte.* © P Monfort



▲ *Vue aérienne de la Grande Motte.* © P Monfort

Fondamentaux d'un développement durable du « système mer »



À l'origine perçus comme des milieux hostiles et dangereux réservés à la pêche, le littoral et la mer sont désormais des espaces attractifs qui concentrent une part importante de la population et des activités économiques. D'après l'observatoire national de la mer et du littoral, les communes littorales concentrent 10 % de la population métropolitaine* – soit 365 habitant/km² à moins de 500 m du rivage ! – avec un taux de construction quatre fois plus élevé que la moyenne nationale (notamment pour les résidences secondaires). Des outils et des connaissances spécifiques sont alors nécessaires pour concilier et réguler les inévitables tensions entre des intérêts souvent divergents. D'ailleurs, les littoraux ne sont-ils pas définis en France comme des espaces partagés entre « ceux qui y vivent, ceux qui en vivent et ceux qui y viennent » (Datar, 2004**).

L'intégration du développement durable dans le champ des espaces marins et littoraux fait souvent référence au *Coastal Zone Management Act*, voté en 1972 aux États-Unis – au même moment que la première conférence des Nations Unies sur l'environnement humain de Stockholm. Si la notion de « gestion intégrée des zones côtières » est introduite dès 1972, il faut attendre 1989 pour que ses contours et méthodes soient définis lors d'un séminaire de recherche international tenu à Charleston (Caroline du Sud, USA). Cette prise de conscience intervient en réaction à l'urbanisation et l'artificialisation croissantes, et souvent incontrôlées, des littoraux. Parallèlement, le développement d'approches « systèmes », les recherches et les politiques de conservation des écosystèmes et de la biodiversité, introduisent de nouvelles logiques de régulation spatiale, à travers, par exemple, diverses formes d'aires marines protégées ou en s'appuyant sur des programmes intégrés qui élargissent le périmètre des recherches jusqu'aux bassins versants par exemple. Ainsi, les principes du développement durable des espaces marins et littoraux sont nés avant même la conférence de Rio de 1992, expliquant la traduction rapide des principes et recommandations définies à Charleston dans des programmes expérimentaux associant chercheurs et décideurs publics. Dès lors, on note une volonté de passer de recherches sectorielles, souvent mono-disciplinaires, à des problématiques transversales et concertées mobilisant des équipes pluridisciplinaires. De nouvelles approches comme – par exemple « l'économie écologique » – émergent ainsi que de nouvelles communautés scientifiques pluridisciplinaires autour d'associations et de revues telles que *Ecological Economics* à l'échelle internationale ou *Natures Sciences et Sociétés* à l'échelle française.

Les recherches sur la mise en œuvre du développement durable ont approfondi, pour chaque domaine – pêche, aquaculture, tourisme, transport maritime... –, les interactions entre usages, activités, nature et écosystèmes, en déclinant des approches écosystémiques ciblées. En effet, à partir de 2005, avec le *Millennium Ecosystem Assessment* et la notion de services écosystémiques, il ne s'agit plus seulement de

veiller à la durabilité des activités mais aussi de s'interroger et d'agir sur leur contribution à la durabilité des territoires dans lesquels elles sont implantées et avec lesquels elles interagissent. De nouvelles questions de recherche ont ainsi émergé sur l'articulation entre échelles, par exemple pour les espèces migrantes ou invasives ou pour la caractérisation des flux biologiques, chimiques ou physiques. Les connaissances scientifiques ainsi produites permettent d'orienter et d'accompagner des changements de pratiques des acteurs économiques, des citoyens et des décideurs publics, en faveur de processus et d'usages plus respectueux de l'environnement. On parle alors par exemple de pêche et aquaculture durables et inclusives à travers l'apport des recherches dans les pays du Sud mobilisant les référentiels des moyens d'existence dans des contextes sociaux, culturels et politiques différenciés. Plus récemment, les connaissances sur les écosystèmes ont fait naître deux nouveaux champs de recherche et d'applications : (1) la restauration écologique, dont le développement est stimulé par les réglementations imposant de réduire ou de compenser les impacts anthropiques sur l'environnement et (2) l'agroécologie qui devrait permettre de concevoir des systèmes de production, en aquaculture par exemple, qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes.

D'abord déclinée sur les littoraux et la zone côtière, la problématique du développement durable s'étend progressivement vers le large comme en témoignent les nouvelles directives cadres de l'Union européenne sur la qualité du milieu marin et sur la planification maritime. En outre, la notion de « croissance bleue » oriente recherches et activités vers l'exploitation, supposée durable et raisonnée, des espaces et ressources marines. Ainsi, la production énergétique en mer (éolien, géothermie, hydrolien...) constitue un secteur porteur d'innovations techniques et qui conduit aussi à élargir (1) l'espace des représentations sociales de la mer au large et (2) les recherches sur la régulation des conflits littoraux et maritimes. Cette problématique de croissance bleue est stratégique pour la France, qui bénéficie de la deuxième plus grande zone maritime économique exclusive au monde (près de 11 millions de km², dont 100 000 en Méditerranée) générant une valeur ajoutée de 35,6 milliards d'euros en 2013 (données économiques de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Ifremer). Aussi, la France dispose dans ce domaine d'atouts mais aussi de responsabilités importantes. Par ailleurs, face à l'accroissement spectaculaire du trafic maritime intercontinental, sa régulation devient indispensable.

Le développement durable s'inscrit dans la problématique de la résilience des écosystèmes, des espèces marines et des territoires face au changement climatique et à ses impacts – acidification, réchauffement de l'eau, montée du niveau de la mer, submersions marines qui renforceront les dommages des tempêtes... –, ce qui nécessite d'étudier et de gérer la vulnérabilité des milieux et des sociétés.

Suite page suivante...

Dès lors, il s'agit d'explorer de nouveaux champs de connaissance, d'expérimenter de nouveaux outils de régulation qui soient intégrés, concertés et adaptatifs à long terme. Mais il s'agit avant tout de mettre en place les conditions d'un changement de valeur, une sorte de révolution copernicienne conduisant à repenser la relation de l'homme à la nature, non plus comme un dualisme entre deux mondes séparés, mais comme une dualité entre les deux faces issues d'un même processus de coévolution millénaire. Par exemple, afin de maintenir l'attractivité des territoires littoraux, il convient de revoir les principes d'occupation de l'espace et de s'interroger sur les solidarités territoriales entre collectivités territoriales et types de résidents, d'usagers de ces territoires et plus largement entre citoyens à différentes échelles. Ainsi dans ce domaine où la région Occitanie est un territoire leader en France et en Méditerranée, les nouvelles doctrines d'aménagement prônent de relocaliser les constructions et infrastructures les plus exposées aux submersions marines et d'aménager ces zones (végétalisation, rechargement en sable...) pour qu'elles puissent (re)jouer leur rôle de protection.

Ces thématiques, et les méthodologies qui permettent de les traiter, sont portées par de nombreuses recherches menées en Occitanie, avec de multiples collaborations entre disciplines et laboratoires, mais aussi avec les décideurs publics et des entreprises privées qui s'engagent sur ces nouveaux enjeux. Ce chapitre est structuré autour

de six enjeux qui illustrent ces travaux de recherche conduits en Méditerranée : (1) connaissance des bases fonctionnelles pour une gestion écosystémique des pêches et de l'aquaculture, (2) identification des questions liées au trafic maritime et aux activités industrielles et portuaires, (3) biotechnologies et bio-ingénieries et leurs applications pour la restauration écologique des milieux, (4) évaluation des risques côtiers et adaptation aux impacts du changement climatique, (5) aires marines protégées et stratégies de bioconservation, (6) perspectives des énergies marines.

**Hélène Rey-Valette (UM, UMR CEE-M)
et Bernard Hubert (Inra, EHESS, Agropolis International)**

* 1,1 million de personnes à moins de 500 m et 8,1 millions à moins de 10 km des côtes.

** DATAR, 2004. *Construire ensemble un développement équilibré du littoral*. La Documentation Française, 155 p.

KEY INITIATIVE SEA & COAST : UN OUTIL AU SERVICE DES SCIENTIFIQUES ET DES ACTEURS DE LA CROISSANCE BLEUE EN OCCITANIE

Le projet d'I-SITE MUSE « Montpellier Université d'Excellence » mobilise les forces de 19 institutions vers une ambition commune : faire émerger à Montpellier une université thématique de recherche intensive, internationalement reconnue pour son impact dans les domaines liés à l'agriculture, l'environnement et la santé. Parmi les actions initiées, un appel à propositions a porté sur des dispositifs thématiques et transversaux pour affirmer l'identité singulière de MUSE dans son territoire et favoriser les synergies recherche-formation-monde économique. Parmi les thématiques identifiées, l'une, effective dès juin 2018, porte sur la Mer et le Littoral. L'ambition de la *Key Initiative* de MUSE (KIM) *Sea & Coast* est que MUSE soit reconnue pour son dynamisme dans les sciences marines et littorales en Méditerranée, dans les pays du Sud et ailleurs dans le monde. Cette initiative trouve sa légitimité dans les forces pluridisciplinaires locales (biodiversité, environnement, géosciences, modélisation, ingénierie marine, sciences humaines et sociales...) investies dans les grands enjeux de société sur la mer et le littoral, avec 300 scientifiques permanents issus de 20 UMR de MUSE. Cet atout s'inscrit dans le dynamisme de la région Occitanie qui a identifié la mer et le littoral comme une priorité, avec la mise en place d'une direction de la Mer au sein de son administration, et du Parlement de la Mer en 2013.

La KIM *Sea & Coast* représente ainsi un projet unique sur la façade maritime méditerranéenne, embrassant également l'ambition spécifique de MUSE sur les pays du Sud.

Lancée en juin 2018, les premiers objectifs de cette initiative sont de créer une communauté locale « sciences et société » autour des enjeux liés à la mer et au littoral et de la rendre visible et attractive à l'international. Cela se traduit notamment par la mise en place d'appels à projets internationaux, des Challenges masters et des actions d'animation scientifique (écoles d'été, conférences grands-public, journées scientifiques...). La KIM représente une structure simple pour rapprocher les acteurs locaux de la croissance bleue et adaptée à l'émergence de synergies pluridisciplinaires entre acteurs socio-économiques, chercheurs et étudiants.

Contact : L. Dagorn (MARBEC), muse-kimsc@umontpellier.fr

Plus d'informations : <http://muse.edu.umontpellier.fr/territoire-et-societe/key-initiatives-muse/sea-coast>



LA RÉGION CONTRIBUE AU PROGRAMME DE LA FAO SUR LA « CROISSANCE BLEUE »

À la poursuite d'objectifs de « croissance bleue », de nombreux pays du Nord comme du Sud s'engagent dans des stratégies intersectorielles. La transition d'une économie traditionnelle à une économie bleue se nourrit des approches conventionnelles mais elle dépasse les visions sectorielles en créant des complémentarités qui contribuent à renforcer la durabilité des écosystèmes exploités et à créer de la valeur (« économie bleue »), le tout grâce à des économies inclusives productrices d'emplois et de richesse. Afin de guider ses États membres et de s'assurer que les stratégies de croissance bleue nationales sont conformes aux instruments internationaux tels que le Code de conduite pour une pêche responsable ou les Approches écosystémiques de la pêche et de l'aquaculture, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a élaboré l'Initiative Croissance Bleue (ICB) à laquelle le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) a participé sur les aspects aquacoles. L'ICB plaide en faveur de solutions aptes à réaliser l'équilibre entre croissance économique, développement social, sécurité alimentaire et utilisation durable des ressources bio-aquatiques. Elle est déjà mise en œuvre dans différentes régions, notamment en Méditerranée et dans les petits États insulaires en développement. À terme, cette problématique aboutira à de nouvelles dynamiques économiques au niveau des territoires et contribuera à l'effort des pays pour atteindre les objectifs du développement durable définis par l'Agenda 2030.

Contacts : L. Dabbadie (Cirad), lionel.dabbadie@cirad.fr
et J. Catanzano (FAO), joseph.catanzano@fao.org

Plus d'informations :

www.fao.org/policy-support/policy-themes/blue-growth
<https://uved-formation-aquaculture.cirad.fr>
www.fao.org/blogs/blue-growth-blog/en/

Gestion écosystémique de la pêche et de l'aquaculture

La gestion du thon rouge : histoire de la surexploitation et de son rétablissement

Dès l'Antiquité, les phéniciens, puis les romains, ont établi une centaine de sites en Méditerranée pour exploiter les migrations saisonnières du thon rouge. Durant deux millénaires, le thon rouge fut exploité de manière durable et ce malgré des fluctuations naturelles d'abondance très importantes. L'essor du marché du sushi-sashimi dans les années 1980, au sein duquel le thon rouge est une espèce « phare », va briser ce long équilibre. La forte valeur marchande du thon rouge alliée à une gestion inefficace aux niveaux international et national, vont en effet conduire à une forte surcapacité, à savoir le déploiement d'une flottille de pêche dont la capacité de capture est bien supérieure à ce que peut supporter la population exploitée. Cette surcapacité va générer une augmentation vertigineuse des captures et se traduire par une surexploitation. En 1998, la Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique (CICTA) établit un quota, mais celui-ci était bien supérieur à l'avis scientifique et sans réel contrôle. En conséquence, les captures sont restées bien trop élevées jusqu'à fin des années 2000, générant un fort risque d'effondrement des pêcheries et de la population du thon rouge. C'est finalement la forte pression des ONG environnementales et de l'opinion publique qui va obliger la CICTA à accorder plus d'attention à l'avis scientifique et à mettre en place un plan de reconstitution efficace. Depuis, le stock du thon rouge se rétablit rapidement, montrant par là même que **l'amélioration de l'état d'un stock surexploité et à forte valeur marchande est réalisable lorsqu'il existe une réelle volonté politique**. Les enjeux portent maintenant sur la réduction des incertitudes inhérentes à tout avis scientifique, ce qui nécessite le développement de modèles d'évaluation des stocks qui soient plus robustes et des données d'observation indépendantes de la pêche. Ainsi, l'UMR MARBEC développe des suivis aériens réguliers depuis 2000 pour recenser les populations de thon rouge en Méditerranée nord-occidentale et déploie des marques électroniques pour mieux comprendre les routes migratoires du thon. Plus de science, moins d'incertitude... de meilleures recommandations de gestion devraient se traduire par une gestion durable à moyen et à long termes et, finalement, à des revenus accrus pour les pêcheries.



▲ © Ifremer

La dimension spatiale dans la gestion des pêches : les droits territoriaux

Les ressources halieutiques sont souvent surexploitées et nécessitent des politiques conciliant productivité des pêches et conservation. Pour répondre à ce problème, les concessions sont de plus en plus utilisées dans de nombreux pays pour la gestion des pêches. Un tel système pose un défi potentiel : les concessions à durée limitée octroient des droits d'utilisation localisés géographiquement alors que les espèces concernées peuvent se déplacer (via des processus migratoires) en dehors du domaine contrôlé par un exploitant donné. Cela peut altérer les incitations à gérer la ressource de manière durable, chaque exploitant ayant tendance à se concentrer exclusivement sur sa zone, sans prendre en compte les processus migratoires. Les travaux du CEE-M sur les droits territoriaux se concentrent sur l'analyse des contrats de concession permettant de résoudre ce problème. Quand plusieurs zones sont concernées par la mesure, un type de contrat est proposé, qui octroie des droits territoriaux à durée limitée sur chaque zone donnée à un exploitant (un exploitant par zone), avec possibilité de renouvellement des droits sous certaines conditions. Le régulateur annonce pour chaque zone un stock minimum au-dessous duquel le gestionnaire ne doit pas prélever. **Les résultats montrent que la durée de la concession et les caractéristiques de l'espèce concernée (dispersion due aux processus migratoires) influencent fortement les incitations des exploitants de toutes les zones à coopérer**. D'autres travaux en cours s'intéressent à la capacité d'un tel type d'instrument à prendre en compte des pratiques de gestion écosystémique. En effet, de nombreux types de concession sont définis pour la gestion d'une espèce donnée, ignorant de fait les interactions écologiques existantes avec d'autres espèces. Le CEE-M s'intéresse à la capacité d'un système de concession à satisfaire des objectifs économiques et de conservation lorsque ces interactions sont prises en compte.

Contacts (MARBEC) : J.-M. Fromentin,
jean.marc.fromentin@ifremer.fr
et T. Rouyer, tristan.rouyer@ifremer.fr

Contact (CEE-M) : N. Quérou, nicolas.querou@supagro.fr

Plus d'informations sur le projet ANR GREEN-Econ :
<https://sites.google.com/view/anr-green-econ/home>

DES SOLUTIONS POUR RESTAURER LES PETITS FONDS CÔTIERS

Restauration écologique et évolution des ressources de poissons

Un des enjeux majeurs du 21^e siècle est de trouver un équilibre entre la protection des environnements maritimes et le maintien, voire le développement, des activités humaines qui en découlent (pêche, tourisme...). La gestion durable des ressources marines repose sur une bonne compréhension des différentes composantes et enjeux du système maritime qu'ils soient écologiques, économiques et sociaux, pour mettre en place des actions concertées par différents acteurs : scientifiques, gestionnaires ou usagers du milieu. En ce sens, le CEFREM s'intéresse à la caractérisation multi-échelle des impacts humains, qu'ils soient directs (pêcheries) ou indirects (artificialisation des littoraux), sur le milieu méditerranéen et, plus particulièrement, sur les populations ichthyologiques qui y gravitent. Des suivis réguliers* de la pêche professionnelle et récréative** ont été initiés par le laboratoire, en coopération avec les gestionnaires du Parc naturel marin du golfe du Lion. Ces suivis, associés à des opérations de sensibilisation, ont permis d'établir des séries temporelles visant la caractérisation des pressions, réelles ou potentielles, exercées sur le milieu et les populations afin d'adapter les pratiques pour minimiser, voire prévenir, les impacts humains. Parallèlement, le laboratoire s'intéresse à la préservation, voire la restauration, des habitats nécessaires pour chaque étape du cycle de vie des poissons et de leurs fonctions en initiant divers systèmes de restauration écologique, du récif artificiel aux nurseries portuaires artificielles, propices au développement des juvéniles de poissons. **Grâce à des habitats artificiels le long des quais ou sous les pontons, la fonction de nurserie est réhabilitée afin de soutenir les populations naturelles de poissons***.** Ces recherches s'appuient notamment sur la plateforme technologique CREM-IEEM (Intervention et expertise en environnement marin) de l'UPVD, hébergée sur le site du Centre de Recherche sur les Écosystèmes Marins (CREM) à Port-Barcarès.

Contact (CEFREM) : P. Lenfant, lenfant@univ-perp.fr

* Programme PechGere cofinancé par l'Agence française pour la biodiversité et la Région Occitanie.

** Il s'agit par définition d'une pêche non commerciale : les espèces pêchées sont destinées à la consommation exclusive du pêcheur et de sa famille et ne peuvent être vendues.

*** Programme REPNSE financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Les petits fonds côtiers sont soumis depuis longtemps à de fortes pressions anthropiques terrestres et marines. Ils sont pourtant essentiels aux cycles de vie des poissons côtiers en abritant les habitats de nurserie. Depuis 5 ans, sous l'impulsion de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, du Pôle de compétitivité Mer Méditerranée et des collectivités locales, de nombreux projets de R&D ont été menés en Occitanie pour définir des solutions techniques de restauration des habitats de nurserie, les tester dans des pilotes et, pour celles qui ont fait leurs preuves, les déployer à grande échelle. Un nouveau champ de compétences s'est aujourd'hui créé en Occitanie, mobilisant l'UPVD (CREM/CEFREM), qui a porté trois thèses sur le sujet, ECOCEAN (PME montpelliéraine leader mondial dans ce domaine), des bureaux d'études en environnement (Andromède Océanologie, Biotope, CREOCEAN, etc.) et, dans une moindre mesure, des grands groupes comme Egis Eau ou SUEZ ainsi que des très petites entreprises (TPE) locales. Cette thématique, aujourd'hui intégrée à la stratégie régionale d'innovation (SRI / 3S) de la Région Occitanie, offre désormais des outils à maturité technologique pour quelques solutions éprouvées techniquement et scientifiquement – pour partie déjà commercialisées (cf. p. 68) – et, pour la plupart des solutions, des niveaux de maturité technologique moyens ou faibles, qu'il reste à consolider (cf. tableau ci-dessous). Vingt-trois ports de plaisance (dont huit en Occitanie) et deux ports de commerce sont ainsi engagés dans une démarche NAPPEX (Nurseries artificielles pour ports exemplaires, cf. p. 69).

Contacts : S. Fonbonne (ECOCEAN), sebastien.fonbonne@ecocean.fr, G. Lecaillon (ECOCEAN), gilles.lecaillon@ecocean.fr et P. Lenfant (CEFREM), lenfant@univ-perp.fr

Plus d'informations : www.nappex.fr



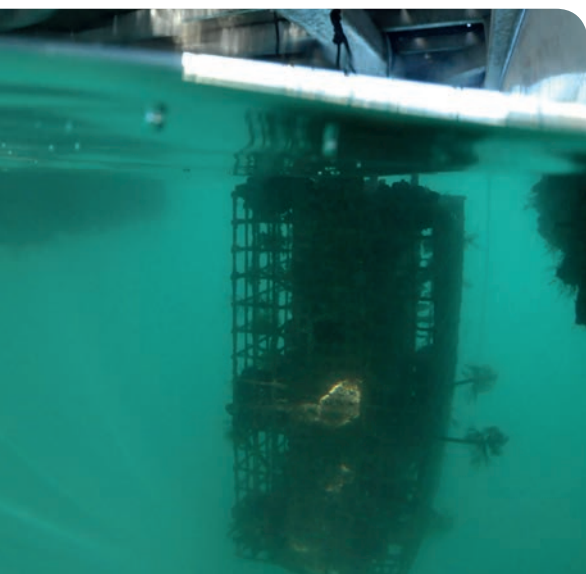
▲ Sous la surface d'un port. © Rémy Dubas / Ecocean

Type de solutions de restauration	Opérationnalité	Lien approche écosystémique
Création d'habitats artificiels pour les larves et juvéniles de poissons marins dans les zones portuaires	Démontrée	Démontré, lien avec l'économie de la pêche aux petits métiers
Créations d'habitats artificiels dans les zones côtières	Démontrée	Démontré, lien avec l'économie de la pêche aux petits métiers
Compensation à l'absence de nurseries fonctionnelles ou disfonctionnement de la colonisation larvaire (capture de post-larves et nurseries en laboratoire)	À consolider	Démontré, lien avec l'économie de la pêche aux petits métiers
Restauration des peuplements végétaux	À consolider	Non démontré

▲ **Principaux types de solutions de restauration des petits fonds côtiers développés depuis 2013.** D'après Agence de l'eau RMC. In. ASTEE, 2018. *Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pour qui ? Pour quels bénéfices ?*

◀ **Habitat artificiel pour juvéniles de poissons placé sous un ponton de port.**

© M. Mercader



La recherche pour un développement durable de la pisciculture marine

Comprendre les interactions « animal-systèmes d'élevage-environnement » est essentiel au développement durable des filières piscicoles tempérées et tropicales, alliant performance économique, respect de l'environnement et acceptabilité sociale.

Les recherches menées par MARBEC et ses partenaires* (à Sète et sur la plateforme expérimentale Ifremer de Palavas-les-Flots) portent sur la compréhension des processus d'adaptation et d'adaptabilité des organismes et des systèmes soumis aux variations naturelles et anthropiques du milieu. Ces études concernent :

- L'architecture génétique, génomique, physiologique et comportementale de l'adaptation et des performances des organismes : pour les poissons, les caractères ciblés sont

l'efficacité alimentaire, la résistance aux maladies, le déterminisme du sexe, l'adaptation aux conditions d'élevage et aux ingrédients alimentaires d'origine végétale terrestre ou marine.

- La flexibilité des systèmes aquacoles et la résilience des écosystèmes impactés avec : (1) la caractérisation et la bioremédiation des rejets biologiques par des maillons trophiques extracteurs au sein de systèmes intégrés multi-trophiques, (2) les voies de valorisation de ces maillons (bivalves, détritivores, algues) et (3) la modélisation des rejets et l'évaluation de la capacité de support environnemental.

- Les interactions entre l'évolution des variables environnementales et les écosystèmes aquacoles en mer, comme, par exemple, l'impact du changement de régime alimentaire sur la

croissance et la reproduction des huîtres ou l'étude de l'impact des mortalités d'huîtres sur l'écosystème naturel.

La plateforme expérimentale de Palavas-les-Flots fait partie des centres d'excellence européens impliqués dans la recherche piscicole (projet AquaExcel²⁰²⁰). Elle est aussi un lieu d'échange en appui à la concertation recherche-secteur économique au travers du Groupement d'intérêt scientifique « Pisciculture Demain » (GIS PsD) et en soutien aux politiques publiques avec la Direction des pêches maritimes et de l'aquaculture du ministère en charge de l'Agriculture.

* Principaux partenaires : Inra, Cirad et UMR IHPE.

Contacts (MARBEC) : E. Roque, emmanuelle.roque@ifremer.fr, D. Covès, denis.coves@ifremer.fr, B. Chatain, beatrice.chatain@ifremer.fr et M. Callier, myriam.callier@ifremer.fr

Plus d'informations :

www.umr-marbec.fr/fr/recherche/aquacultures-durables,011.html

<https://uved-formation-aquaculture.cirad.fr/10-la-production-durable>

▼ Ferme aquacole marine. © Gloria Maris Groupe



L'approche systémique des pêches et de l'aquaculture réconcilie conservation et exploitation.



▲ *Herbier de posidonies (Posidonia oceanica) en Méditerranée.* © Laurent Ballesta/Andromède Océanologie

Évaluation économique et perceptions des services écosystémiques marins

L'évaluation économique des services écosystémiques apprécie la contribution des écosystèmes au bien-être humain et peut ainsi aider les décideurs publics à faire des choix favorables au développement territorial. Dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée du PNUE, le CEE-M a évalué, à l'échelle de la Méditerranée, sept services écosystémiques (cf. fig. ci-dessous) fournis par cinq grands types d'écosystèmes marins. **La valeur des bénéfices soutenables liés à ces services écosystémiques provenant des écosystèmes marins à l'échelle de la Méditerranée française s'élevait en 2005 à plus de 26 milliards €, principalement issus de la fourniture d'aménités et de supports récréatifs (environ 18 milliards €) fournis par trois secteurs d'activité : hôtellerie et restauration, immobilier et tourisme (68 %).**

Le CEE-M s'intéresse aussi aux herbiers de posidonies qui sont en forte régression bien que protégés. Ils offrent de nombreux services écosystémiques qu'il convient d'identifier à partir de la liste de référence préconisée par la *Common International Classification of Ecosystem*

Services. Du fait du manque de données, seules les valeurs de sept biens et services** (sur un total de 11) ont été évaluées entre 25,3 et 45,9 millions €/an, soit 283 à 513 €/ha/an, les deux-tiers relevant de la seule fonction de protection du littoral.

Le CEE-M analyse également les perceptions, selon les types de services, de panels diversifiés d'usagers, parties prenantes et citoyens. Il s'agit d'appréhender le niveau de connaissance et de hiérarchiser les services pertinents pour un groupe cible ou un territoire, et ainsi de rendre compte de la diversité des points de vue et d'anticiper d'éventuels conflits entre groupes ou entre niveaux d'organisation. Des informations complémentaires concernent les niveaux de familiarité, d'expériences, d'émotions et de ressentis qui influencent les comportements.

Grâce à ces éléments, les perceptions propices à des comportements pro-environnementaux sont identifiées, mais aussi les besoins (1) de sensibilisation et de formation en la matière, et (2) d'adaptation des dispositifs de gouvernance pour, *in fine*, renforcer la conservation de ces services. En privilégiant des mesures volontaires, ces approches s'inscrivent dans les courants de « l'écologie de la réconciliation » en faveur d'une cohabitation positive entre l'homme et la nature.

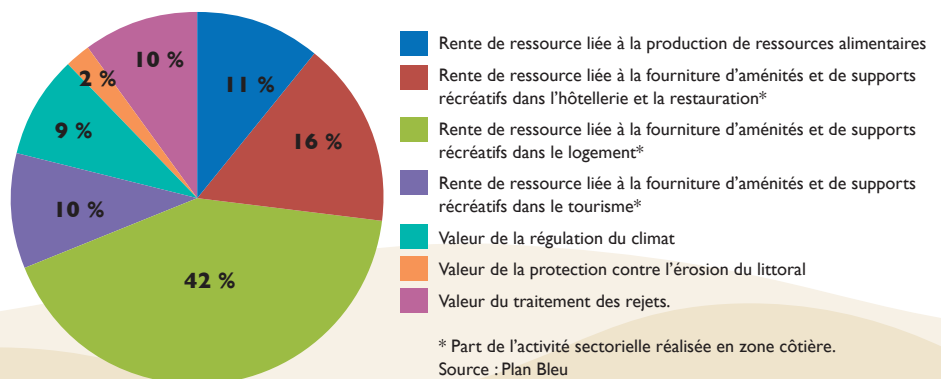
Contacts (CEE-M) :

J.-M. Salles jean-michel.salles@supagro.fr,

A. Mangos, anaimangos@gmail.com et

H. Rey-Valette, helene.rey-valette@umontpellier.fr,

** Utilisation des feuilles mortes comme matériaux ou bio-indicateur, protection contre l'érosion du littoral, purification par filtration de l'eau, séquestration de carbone, oxygénation de l'eau, habitat et frayère pour la pêche, contribution à la connaissance scientifique.



▲ Répartition de la valeur par type de bénéfices rendus par les écosystèmes marins méditerranéens.

Trafic maritime, activités industrielles et portuaires

Le transport maritime par conteneurs : la Méditerranée, carrefour du trafic mondial

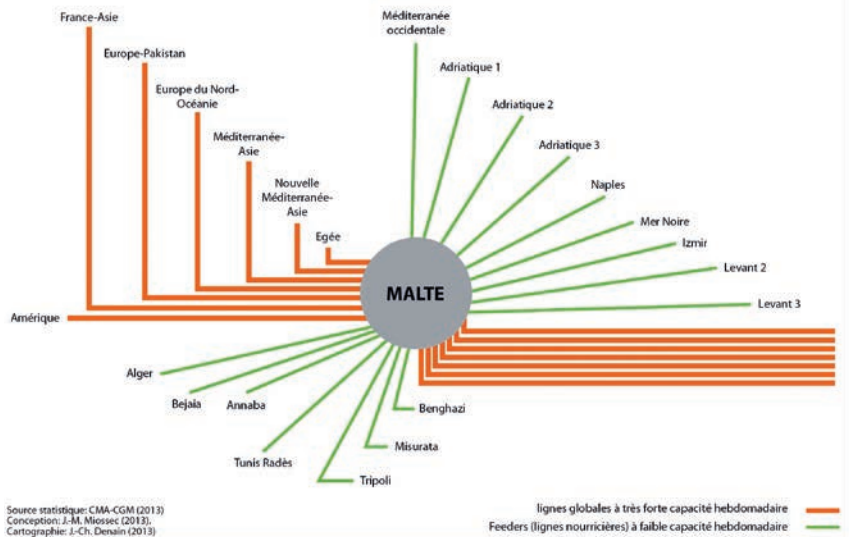
Le *shipping* a connu une révolution dans les dernières décennies avec la généralisation de la conteneurisation. La « boîte », standardisée, est désormais devenue une unité de mesure (EVP, équivalent vingt pieds, *TEU* en anglais) et le symbole de la maritimisation et de la mondialisation. L'adoption de cette logistique multimodale (le conteneur peut être chargé indifféremment sur les modes de transport) a modifié la géographie des océans et des rivages de la mer. À l'échelle du globe, de nouveaux pays-ateliers ont émergé. La Chine en est le plus illustre ; elle tisse sa toile. De nouveaux réseaux de communication, et de nouvelles lignes maritimes sont apparus, avec des relais majeurs où sont concentrés des ports de transbordement (*hubs*) : détroit de Malacca (Singapour, Port Kelang, Tanjung Pelepas), golfe arabo-persique (Jebel Ali, Khor Fakkan, Salalah), Méditerranée (Malte, Gioia Tauro, Le Pirée), détroit de Gibraltar (Algeciras, Tanger Med), Caraïbe (Kingston, Port of Spain). Les grands canaux interocéaniques ont été re-calibrés (Suez, Panama, demain le Bosphore), de nouveaux corridors terrestres apparaissent désenclavant les territoires intérieurs (Éthiopie, Kazakhstan, Chine occidentale). De grandes portions de continents sont désormais bien irriguées par la conteneurisation-maritimisation-mondialisation. L'Amérique latine et l'Afrique, en retard, s'entrouvrent peu à peu. Cette poussée a nécessité une révision des modes de gestion des ports et de terminaux avec la multiplication des concessions et la naissance de très grands

opérateurs de gouvernance portuaire aux côtés des armements maritimes qui se sont consolidés : une dizaine d'armements et une dizaine d'opérateurs de terminaux dominant aujourd'hui le monde du *shipping* ; ils sont tous européens ou asiatiques. **Ceci remet en cause la hiérarchie initiale des ports et des façades maritimes, les cartes étant rebattues avec des ports déclassés et d'autres qui émergent. Les techniques du transport maritime et de la manutention se sont améliorées non seulement dans**

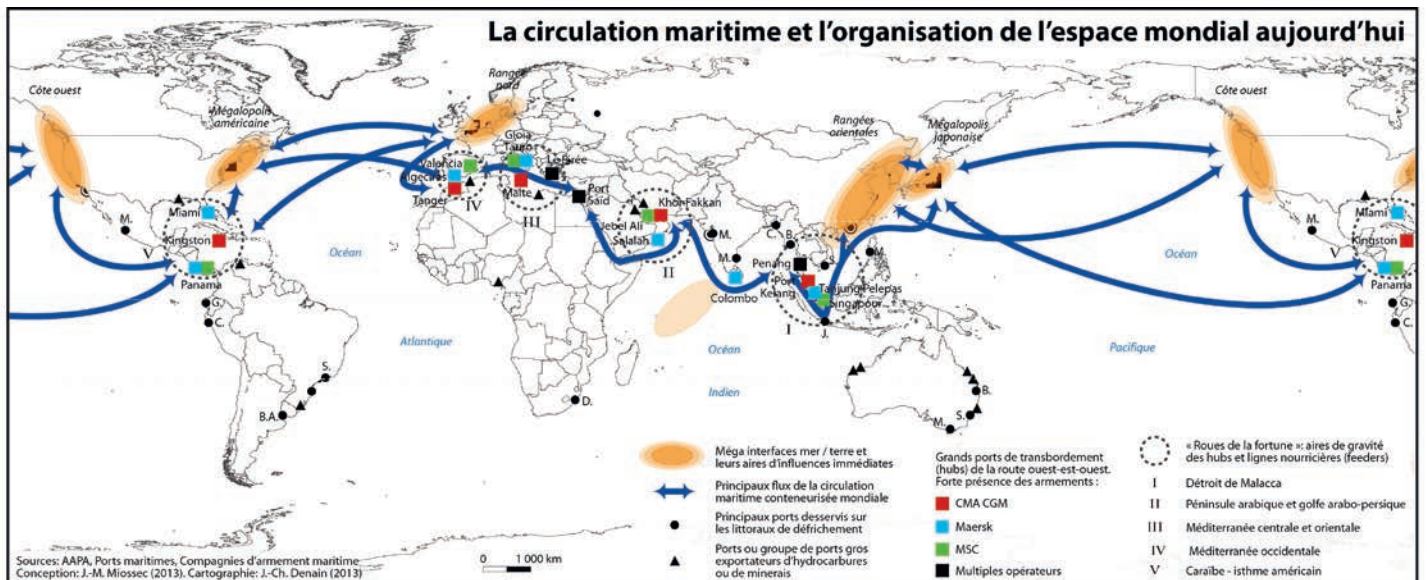
un souci de productivité mais aussi de préoccupation des risques d'atteinte à l'environnement. L'abandon du fioul lourd au profit du gaz comme énergie motrice est en cours. L'ouverture au trafic commercial de l'océan Arctique est en attente d'une déglaciation significative et la plupart des grands armateurs s'y sont déjà préparés (base chinoise en Islande).

Contact (GRED) : J.-M. Miossec, jean-marie.miossec@univ-montp3.fr

Le hub CMA-CEM de Malte: l'articulation des lignes globales et des lignes régionales nourricières



▲ Le terminal de transbordement (hub) CMA CGM de Malte : l'articulation des lignes globales et des lignes régionales nourricières.

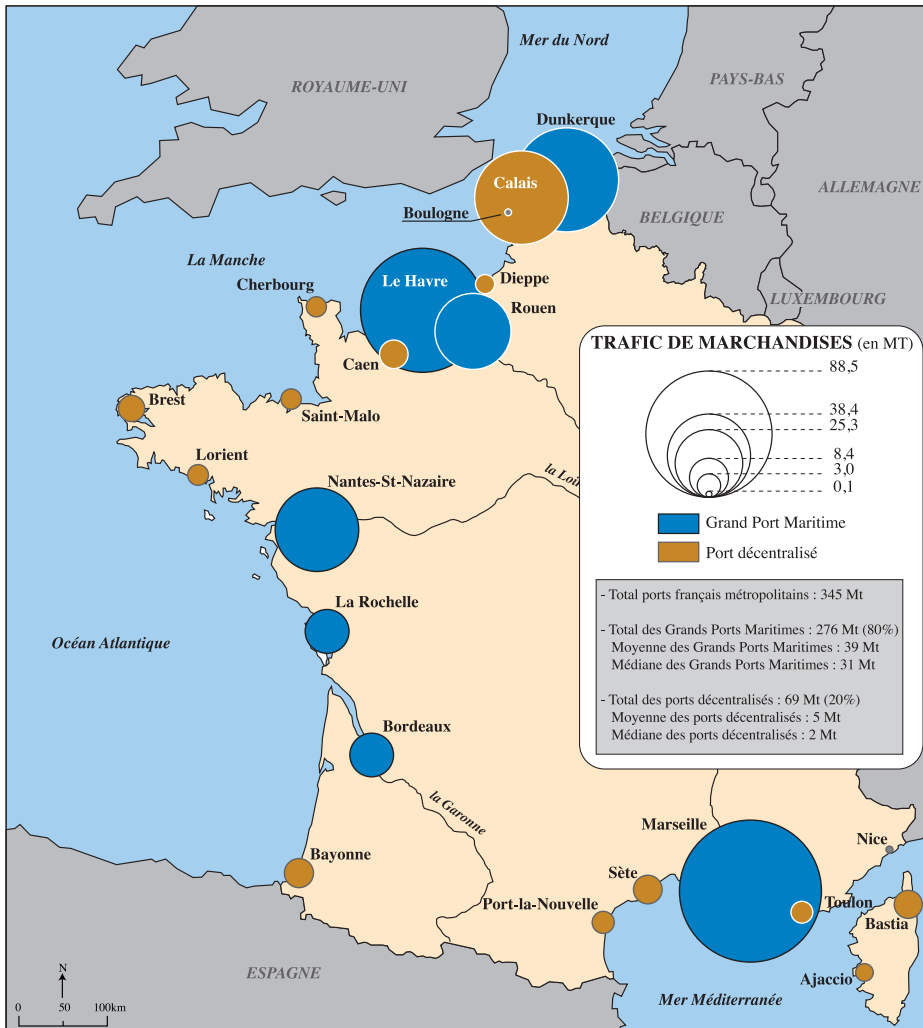


es ports : gestion et conflit

Sur les littoraux, les ports de commerce sont des espaces conflictuels car soumis à des objectifs contradictoires et à différentes menaces : besoin d'équipement au service du transport maritime (les 10 milliards de marchandises transportées par navire en 2016 représentent 80 % en volume et 70 % en

valeur du commerce mondial), menaces sur les écosystèmes (artificialisation des côtes, dégradation de la biodiversité...) et menaces sur les socio-systèmes (chômage, risques technologiques, pollutions et nuisances...). **L'enjeu majeur de la gestion portuaire consiste donc à concilier, d'un côté, le développement industrialo-**

portuaire accompagnant la mondialisation des économies, et, de l'autre, des exigences accrues en termes de conservation des écosystèmes et de qualité de vie des populations. Dans un champ dominé par l'ingénierie technique, les recherches sur les ports relèvent des sciences humaines et sociales. Elles ont pour objectif d'identifier les enjeux portés par les différents acteurs dans et autour des ports et d'analyser les rapports de force en jeu. Leurs questionnements scientifiques concernent (1) les formes du politique et la place du citoyen dans les territoires portuaires, (2) le niveau et les modalités de la conflictualité portuaire et (3) les hiatus entre gestion et vécu des territoires portuaires.



▲ Carte des ports français et de leur trafic de marchandises (2011).
© Valérie Lavaud-Letilleul/ART-Dev (conception)-Stéphane Coursière/ART-Dev (réalisation)

Les méthodologies utilisées comprennent des diagnostics territoriaux sur le temps long, l'expertise des projets et politiques portuaires, des enquêtes par entretien auprès des acteurs institutionnels, usagers et habitants... Dans ce domaine, ART-Dev a développé une expertise sur les ports de la région Occitanie, notamment Sète-Frontignan et Port-la-Nouvelle, et, plus largement, sur la façade méditerranéenne française (Marseille-Fos, Toulon, Nice...), dans une perspective comparatiste (cf. carte). L'unité développe des partenariats avec des équipes scientifiques nationales et internationales (Europe, Amérique du Nord et du Sud), mais également avec des acteurs publics (autorités portuaires, collectivités territoriales...) et de la société civile (associations, habitants...). Son activité s'inscrit dans les principaux réseaux de la recherche maritimes et portuaires (Association Internationale Villes et Ports, OHM-LR, Fondation de France...).

Contacts (ART-Dev) : V. Lavaud-Letilleul, lavaud.letilleul@club-internet.fr et I. Berry-Chikhaoui, berry-chikhaoui.isabelle@neuf.fr

a transition socio-écologique des territoires portuaires : analyse dans une perspective d'économie circulaire

Les territoires portuaires sont des lieux de transit et de transformation massive de matières et d'énergie. Des spécificités locales ainsi que des dynamiques globales dirigent leur évolution. **Leur étude peut fournir de précieuses informations sur l'état d'avancement de la transition socio-écologique (TSE) aux niveaux local et global.** La mise en œuvre de démarches d'économie circulaire (EC) à l'échelle du territoire (écologie industrielle et territoriale, EIT) peut influencer sur cette transition. IMT Mines Alès (LGEI) étudie ces aspects depuis plus de 10 ans à travers plusieurs projets de recherche collaborative. Une analyse comparée internationale des pratiques d'EIT a montré l'existence de typologies différentes dans leur mise en œuvre, en fonction de la représentation qu'ont les différents acteurs de leur territoire, dans ses dimensions spatiales et temporelles (projets DEPART et REX*). L'analyse

plus poussée de la TSE de territoires portuaires en Europe et en Asie a mis en évidence des initiatives de recréation de liens entre les composantes urbaines, industrielles et agricoles, la percée des énergies renouvelables et la valorisation accrue de différents types de déchets. Savoir comment favoriser ces initiatives est devenu une préoccupation première des territoires portuaires, non seulement pour diminuer les pressions environnementales, mais aussi comme facteur d'attractivité économique. L'EC nécessite aussi la mise en place de nouvelles formes d'animation territoriale de co-construction d'un projet de territoire, telles qu'illustrées par le projet EIT-MAMP**. Enfin, des travaux conjoints avec des spécialistes de l'analyse de cycle de vie, notamment via le groupement de recherche régional ELSA***, des économistes et des experts en sciences de gestion visent à développer des méthodes permettant d'estimer les externalités sociales,

économiques et environnementales générées par ces nouvelles pratiques (projet MODEVACT****).

* Projets financés par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) :
DEPART : De la gestion des déchets à l'économie circulaire, étude de l'émergence de nouvelles dynamiques partenariales.
REX : Retour d'expérience « Les ports à l'heure de l'écologie industrielle »
** Projet EIT-MAMP : Métropole Aix - Marseille - Provence. Aide à la planification du développement du territoire ; préparer l'opérationnalité de l'économie circulaire.
*** Projet européen Ecotech Sudoe, Chaire industrielle ANR ELSA-PACT (Environmental Life cycle and Sustainability Assessment- A Pathway to Competitiveness through social & ecological Transition).
**** Projet MODEVACT : Nouveaux modèles économiques et création de valeur territoriale - Autour de l'économie circulaire, de l'économie de la fonctionnalité et de l'écologie industrielle.

Contact (LGEI) :
G. Junqua, guillaume.junqua@mines-ales.fr

Plus d'informations :
<http://lgei.mines-ales.fr/pages/recherche-l>

La valorisation des produits de dragages, un enjeu pour les territoires littoraux

À l'heure de l'économie circulaire, la réutilisation des déchets est un enjeu majeur et leur gestion a pris une forte dimension sociétale et technique. À ce jour, les sédiments de dragage des ports ne bénéficient pas encore de filières structurées de valorisation mais les politiques publiques encouragent les gestionnaires de territoires, ports autonomes, ports régionaux et ports de plaisance communaux, à œuvrer dans le sens d'une gestion vertueuse de leurs déblais issus de dragages. Depuis 2009, IMT Lille Douai et IMT Mines Alès développent des solutions innovantes pour les dragages et la gestion des sédiments extraits :

- En 2010, IMT Mines Alès a participé au projet ECODREDGE-MED[®] piloté par la région autonome de Port Camargue : mise au point d'un procédé embarqué de séparation des sables et des fines. L'eau et les parties fines ont été remises en place dans le port avec un suivi adapté.
- Depuis 2009, IMT Lille Douai et le port autonome de Dunkerque développent une filière de traitement à terre des vases non immergeables, notamment au travers de la création d'une plateforme dédiée au traitement et à la valorisation de ces sédiments.

À ce jour, tout maître d'ouvrage portuaire confronté à une problématique de sédiments cherche des solutions adaptées à sa situation, pouvant être mises en œuvre à l'échelle de son territoire. Par exemple, la Région Occitanie a mis en place un schéma directeur des dragages pour évaluer ses gisements de dragages. En termes de valorisation,

la démarche Sédimatériaux permet de mettre en place des filières de valorisation innovantes. Dans ce contexte, les besoins de R&D sont importants pour valoriser les sédiments de dragages en granulats ou en liants hydrauliques utilisables au sein de matériaux de construction par exemple.

* Projet ECODREDGE-MED : Écotechnologie de gestion globale et à flot des dragages de sédiments de port.
** Laboratoire de génie civil et géo-environnement (IMT Lille Douai).

Contacts : J.C. Souche (C2MA), jean-claude.souche@mines-ales.fr, N. Abriak (LGCgE**), nor-edine.abriak@imt-lille-douai.fr, C. Gonzalez (LGEI), catherine.gonzalez@mines-ales.fr et N. Azema (C2MA), nathalie.azema@mines-ales.fr

▼ *Chaussée en grave recyclée et sédiments traités (entreprise Razel-Bec). © J.C. Souche*



▼ *Planche d'essai en grave recyclée et sédiments traités (carrière LRM). © J.C. Souche*



La Méditerranée est une des principales routes maritimes du commerce international, avec de nombreux ports et installations de plaisance.

Les éco-matériaux et leur durabilité : application aux ouvrages et aux navires

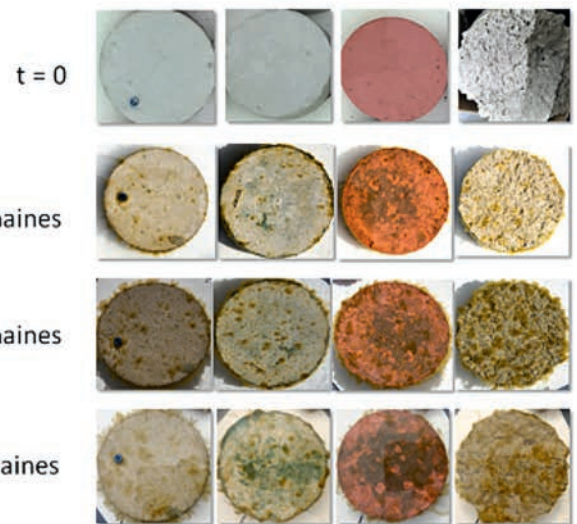
Les domaines des transports et de la construction doivent contrôler et réduire leurs effets sur l'environnement : il faudra limiter les émissions de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles non renouvelables, penser à la déconstruction et à la réutilisation des déchets produits, tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux et en veillant à la santé et au confort des personnes. **Aussi, dans un souci d'économie circulaire globale, de nouveaux matériaux — les éco-matériaux — vont, à terme, substituer ceux usuels.** Le C2MA s'intéresse aux éco-matériaux à partir de matériaux traditionnels : le béton et les éco-composites polymères. Leur durabilité est étudiée afin

d'augmenter leur durée de vie et de minimiser les coûts de maintenance et les déchets produits.

Le C2MA s'intéresse également à l'optimisation du choix du liant avec l'utilisation de ciment écologique dosé plus faiblement. Par ailleurs, l'approche performantielle permet d'optimiser les dosages en liant en fonction de l'environnement auquel est exposé le béton, d'innover dans l'utilisation de formulations plus performantes pour diminuer les sections et ainsi augmenter la durabilité de ces matériaux. Le C2MA porte aussi son attention aux éco-composites pour le milieu nautique. **Pour répondre à des exigences de performance, de durabilité, de procédés**

à grande échelle et de coûts pour les entreprises du domaine, l'élaboration de stratifiés recyclables à partir de résines thermoplastiques infusibles et de renforts issus du recyclage de composites à fibres longues, est appropriée. L'utilisation de bio-composites permet de mieux maîtriser les propriétés mécaniques et thermiques et s'adapte à la filière de déconstruction associée.

Contacts (C2MA) : M. Salgues, marie.salgues@mines-ales.fr,
D. Perrin, didier.perrin@mines-ales.fr
et P. Ienny, patrick.ienny@mines-ales.fr



▲ *Éprouvettes en test en environnement contrôlé à Ifremer à Palavas-les-Flots (gauche) et un exemple de résultats (droite).* © Marie Salgues/C2MA

Eaux de ballast : la gestion des espèces invasives

Les espèces aquatiques envahissantes constituent une menace majeure pour les écosystèmes et génèrent des impacts économiques importants. La navigation en est le principal vecteur via les eaux de ballast. Les navires ponctionnent d'importants volumes d'eau pour assurer leur stabilité en haute mer et se délestent une fois à destination afin de naviguer en eaux moins profondes. Le nombre d'espèces introduites a considérablement augmenté ces vingt dernières années avec le volume des échanges et du trafic. Afin d'enrayer cette tendance, **un traité international ratifié par 52 pays représentant un peu plus de 35 % du tonnage mondial est entré en vigueur en septembre 2017. Par cette convention, les pays s'engagent à ce que, progressivement, tous les navires adoptent des normes de traitement des eaux de ballast afin d'enrayer de nouvelles introductions.** Les recherches du CEE-M portent sur les mécanismes favorisant une coopération internationale pour la gestion des invasions biologiques. La convention internationale pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments

des navires (BWV) ayant été signée en 2004, il aura donc fallu 14 années de négociations afin qu'un nombre suffisant de pays ratifient la convention et la rendent exécutoire. De plus, beaucoup de pays restent non signataires et, de par la nature même des espèces envahissantes, la défection d'un sous-ensemble de pays menace fortement l'efficacité de l'action collective. L'enjeu de nos recherches est de mieux comprendre les dispositifs permettant une coopération large. Pour ce faire, nous analysons la structure coalitionnelle de l'accord ratifié, afin de mieux comprendre l'impact de la définition de l'accord sur le niveau de coopération. **Nos recherches s'intéressent en particulier à l'analyse de l'efficacité de la clause de ratification adoptée et à son impact sur le niveau de coopération, ainsi qu'aux systèmes d'incitations et/ou de sanctions qui peuvent être mis en œuvre afin d'élargir l'accord à l'accession de nouveaux pays.**

Contact (CEE-M) : P. Courtois, pierre.courtois@inra.fr

Les passagers invisibles

La Méditerranée concentre 30 % du trafic maritime mondial dont 25 % du trafic mondial d'hydrocarbures. Près de 10 milliards de tonnes d'eaux de ballast sont transférées chaque année au niveau international, et la même quantité au niveau du transport domestique, dont 22 millions le long des seules côtes françaises métropolitaines. On estime que **7 à 10 000 espèces sont transportées dans les eaux de ballast chaque jour. De nombreuses espèces aquatiques nuisibles et pathogènes ont ainsi été introduites et ont pu se répandre dans de nouveaux milieux, avec des conséquences environnementales, sociales et économiques importantes.**

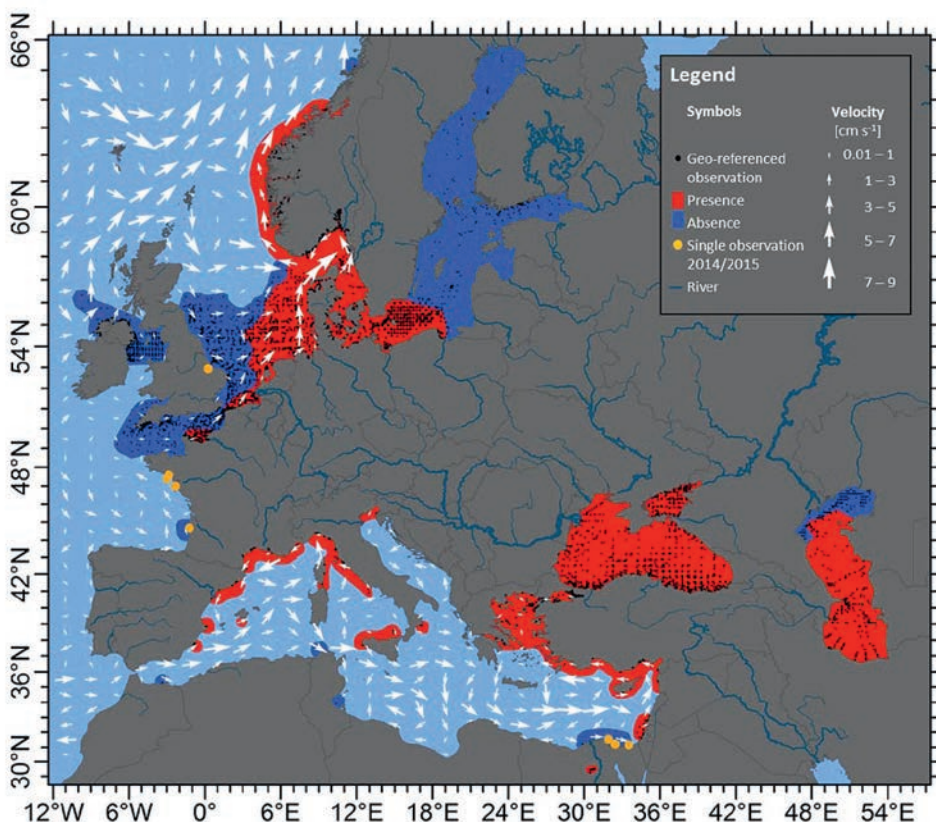
Une équipe de MARBEC travaille sur la capacité du cténaire *Mnemiopsis leidyi*, originaire de la côte Est du continent américain et introduit par les eaux de ballast, à se développer dans des écosystèmes méditerranéens. *M. leidyi* est observé dans la lagune de Bages-Sigean (Aude) ou celle de l'Or (Hérault), mais pas dans la lagune de Thau (Hérault) où un programme de surveillance sur le long terme a été initié (soutenu par l'OSU OREME). Hermaphrodite, capable d'autofécondation, cet organisme peut se reproduire très jeune (13 jours après éclosion) et chaque individu peut libérer un millier d'œufs. Il prolifère donc dans la plupart des lieux où il a été introduit. Une étude récente menée en collaboration avec un groupe de chercheurs européens a synthétisé la dynamique d'invasion de cette espèce dans le bassin méditerranéen (cf. ci-contre). Introduit en 1982 en mer Noire, on le retrouve au début des années 1990 en mer Égée, en mer de Marmara et sur l'ensemble des côtes turques, à la fin des années 1990 en mer Caspienne et, depuis 2005, dans la lagune de Berre, en Corse et en mer Adriatique. En 2009, il est aperçu aux Baléares et sur l'ensemble des côtes israéliennes puis en Égypte en 2015. L'entrée en vigueur de la convention BWB (cf. texte précédent) devrait permettre de limiter son expansion dans les aires géographiques qui ne sont pas encore atteintes.

Contact (MARBEC) :

D. Bonnet, delphine.bonnet@umontpellier.fr



▲ Le cténaire *Mnemiopsis leidyi*. © Patrice Got/MARBEC

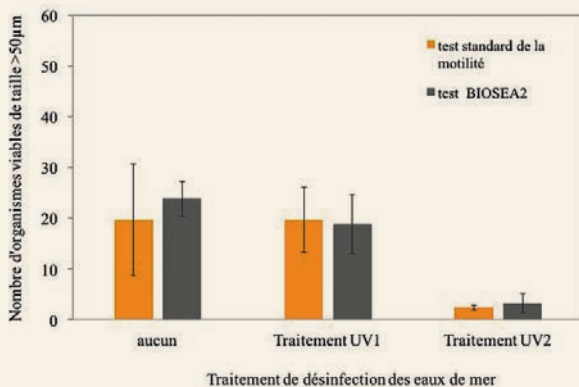


▲ Distribution du cténaire dans le bassin méditerranéen (de 1990 à novembre 2016). D'après Jaspers C. et al., 2018. Global Ecology and Biogeography. 1-14.

LA SURVEILLANCE DES EAUX DE BALLAST PAR DES OUTILS DE DIAGNOSTIC EN TEMPS RÉEL

Le LBBM de l'OOB, spécialisé en écologie microbienne et dans le développement d'outils de diagnostic environnemental, s'est associé avec BIO-UV Group, société spécialisée dans le traitement de désinfection des eaux, pour élaborer de nouveaux instruments offrant un contrôle rapide du zooplancton et du phytoplancton dans les eaux de ballast. Financé par l'Europe (Fonds européen de développement régional, FEDER) et la Région Occitanie, le projet BIOSEA2 a permis de développer, entre autres, deux prototypes simples, robustes et à faible consommation d'énergie pour une utilisation à bord des navires. Ils permettent un dénombrement en quelques minutes du plancton total et la détection des organismes viables aux seuils fixés par la Convention BWM, ainsi que le contrôle de l'efficacité de la désinfection. Ces outils ont été validés sur plusieurs modèles biologiques et sur différentes communautés naturelles marines et ont été comparés aux analyses de référence. L'automatisation des prototypes sera la prochaine étape pour fournir des outils innovants de diagnostic pour la surveillance biologique des eaux de ballast à bord des navires.

Contacts (LBBM) : J. Baudart, baudart@obs-banyuls.fr et P. Lebaron, lebaron@obs-banyuls.fr



▲ Effet de différents traitements de désinfection sur l'abondance du zooplancton viable mesurée par le test de la motilité (test standard) et le test développé dans BIOSEA2. © J. Baudart.

► *Système de désinfection des eaux de ballast de la société BIO-UV combinant filtration mécanique et traitement UV-C.*
Source : www.ballast-water-treatment.com



Écoconception des ouvrages marins : comment réconcilier aménagements et écosystèmes ?

Les aménagements humains, de plus en plus nombreux, augmentent l'artificialisation des milieux côtiers et les pressions anthropiques sur le milieu naturel. L'université Paul-Valéry-Montpellier (UPVM, CEFE) s'intéresse depuis longtemps aux problématiques des aménagements littoraux sous les angles environnemental et sociétal. Par ailleurs, IMT Mines Alès développe une recherche et des filières d'enseignement d'excellence dans le domaine des matériaux de construction et des ouvrages maritimes. Depuis 2008, ces deux laboratoires travaillent de concert sur le sujet des aménagements maritimes éco-conçus qui associent les exigences de tenue mécanique des structures et de durabilité des matériaux et l'atteinte d'objectifs environnementaux ambitieux pour minimiser les impacts et maximiser les gains écologiques.

Dans la perspective d'un développement durable des aménagements, les réponses techniques sont élaborées en suivant une approche systémique. Dès les premiers pas du design, la conception intègre les sciences et techniques de l'ingénieur comme outil d'aménagement des territoires et d'organisation des activités économiques qui minimisent les pressions anthropiques sur l'environnement. **La méthodologie de travail est axée sur la restauration d'écosystèmes**

dégradés ou la création de nouveaux écosystèmes durables ayant une valeur pour l'homme et la biosphère. Afin de mettre au point les solutions techniques et économiques les plus adaptées, il convient de lier théorie et connaissances empiriques en écologie, hydraulique, génie civil et techniques de mise en œuvre. En parallèle, il est fait appel à toutes les

disciplines qui se consacrent à la compréhension de la relation hommes-milieu naturel. La pluridisciplinarité de l'approche permet d'extraire le meilleur de chaque discipline pour trouver le bon compromis technique, économique, sociétal et environnemental en réponse au cahier des charges de l'aménagement projeté.

Contacts : J.C. Souche (C2MA), jean-claude.souche@mines-ales.fr et S. Pioch (CEFE), sylvain.pioch@univ-montp3.fr

Plus d'informations : exemples d'écoconception maritime : www.icriforum.org/sites/default/files/OVERVIEW%20of%20eco-mooring-light_0.pdf

▼ *Exemple d'éco-mouillage.* © S. Pioch



Génie écologique côtier et écoconception des infrastructures littorales

Les petits fonds côtiers sont concernés par de très forts enjeux d'aménagement (20 % du littoral d'Occitanie est urbanisé), sur lesquels la loi impose le triptyque « Éviter-Réduire-Compenser ». L'ingénierie écologique n'intervient qu'en cas de réduction d'un impact, voire de sa compensation, mais toujours après que la question de l'évitement ait été traitée et si la qualité de l'eau est redevenue correcte. Certains maîtres d'ouvrages portuaires ont choisi volontairement d'intégrer une part d'écoconception dans leur projet, qu'il s'agisse de grands projets structurants ou d'une démarche environnementale de type « Port propre » pour les ports de plaisance. Aussi, des outils de génie écologique côtier et/ou d'écoconception des infrastructures littorales sont développés depuis le début des années 2010.

ECOCEAN et l'UPVD (CREM/CEFREM) ont eu un rôle pionnier dans la mise en place

et la validation scientifique de solutions de génie écologique dédiées aux nurseries dans les petits fonds côtiers. Les projets R&D NAPPEX (cf. page suivante) et GIREL 3R* ont démontré scientifiquement l'utilité d'équiper des infrastructures portuaires maritimes d'habitats dédiés aux juvéniles de poissons (solution Biohut®, des « refuges à poissons », cf. page suivante). Le programme européen SUBLIMO* a montré l'efficacité d'un procédé de capture et culture de post-larves d'animaux marines côtiers pour des opérations de repeuplement (solution BioRestore®). Ces solutions – BioRestore®, Biohut® – sont aujourd'hui validées scientifiquement et techniquement, et sont commercialisées auprès de vingt-trois ports de plaisance et deux ports de commerce. **Le passage du stade de recherche technologique fondamentale à l'industrialisation nécessite un investissement financier important pour les opérateurs privés**

et une attention particulière doit être accordée à la validation scientifique de l'intérêt écologique des outils, produits ou services, afin d'éviter le greenwashing. Ces outils doivent alors être validés techniquement et scientifiquement, en s'appuyant sur des protocoles de suivi standardisés et comparables. En effet, **il en va de la crédibilité de la filière régionale du génie écologique côtier en passe de devenir une référence européenne en la matière.**

Contacts : S. Fonbonne (ECOCEAN), sebastien.fonbonne@ecocean.fr, G. Lecaillon (ECOCEAN), gilles.lecaillon@ecocean.fr et P. Lenfant (CEFREM), lenfant@univ-perp.fr

* GIREL : Gestion des infrastructures pour la réhabilitation écologique du littoral.
SUBLIMO : Suivi de la biodiversité de post-larves ichtyques en Méditerranée occidentale (financement Life+).



▲ Relâché de poissons dans le cadre d'un projet BioRestore.
© Rémy Dubas/ECOCEAN



▲ Juvénile de sar à museau pointu sur un « Biohut ».
© Rémy Dubas/ECOCEAN



▲ « Biohut quai et Kelp », Port-Vendres. © Rémy Dubas/ECOCEAN

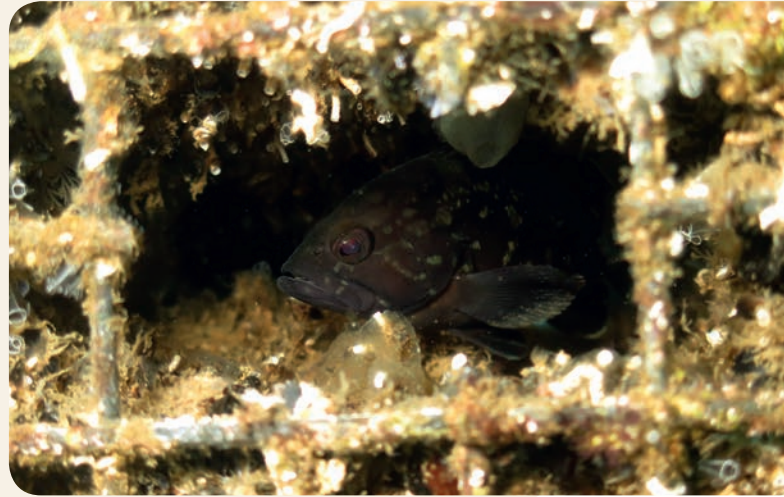
NAPPEX : NURSERIES ARTIFICIELLES POUR DES PORTS EXEMPLAIRES

La post-larve est le dernier stade larvaire pélagique du cycle de vie qui se termine, pour la majorité des espèces d'animaux marins côtiers, par une phase de colonisation de l'habitat littoral. Dans ce processus naturel, une partie de ces espèces se retrouve dans les zones abritées des ports, dont la conception inadaptée à leur survie (quais droits, sans protection face aux prédateurs) en fait de véritables pièges entraînant une surmortalité de ces jeunes recrues. Le projet NAPPEX (2013-2014) a eu pour objet le développement d'une technique de restauration écologique marine permettant de redonner des fonctions écologiques aux infrastructures portuaires. Six ports ont été équipés et suivis pendant 2 ans en Méditerranée française et un port sur la côte méditerranéenne du Maroc. Le procédé mis en œuvre, nommé « Biohut[®] », visait à restaurer le service écosystémique de nurserie en protégeant les post-larves et les jeunes recrues de la prédation pour leur permettre d'atteindre une taille dite « refuge » à partir de laquelle le taux de mortalité dû à la prédation est fortement diminué, facilitant ainsi leur recrutement dans la population adulte. Installés en sub-surface le long des quais ou sous les pontons flottants, ces modules sont composés d'une cage en acier remplie de coquilles d'huîtres (colonisée par la faune et la flore locale, offrant ainsi une nourriture adaptée aux juvéniles), entourée d'une cage vide (fournissant une protection face à la prédation). Ce procédé a fait l'objet d'un brevet en 2013 et a été validé scientifiquement au travers du projet NAPPEX mais aussi, plus récemment, par deux thèses menées avec l'UPVD et une en partenariat avec l'Université Mohamed V de Rabat. À ce jour, plus

de 2 500 unités ont été déployées sur les côtes méditerranéennes françaises et marocaines, ainsi qu'aux États-Unis, aux Pays-Bas, en Corée, au Danemark et aux Philippines ; cinq articles ont été publiés.

Contacts : S. Fonbonne (ECOCEAN), sebastien.fonbonne@ecocean.fr, G. Lecaillon (ECOCEAN), gilles.lecaillon@ecocean.fr et P. Lenfant (CEFREM), lenfant@univ-perp.fr

Plus d'informations : www.nappex.fr



▲ Juvénile de mérrou brun dans un « Biohut », Port-Vendres.
© Rémy Dubas/ECOCEAN

Aménagements maritimes et non-perte nette de biodiversité : comment sortir de l'absence de compensation des impacts négatifs ?

L'application de la séquence « Éviter, Réduire, Compenser » (ERC) sur les impacts biophysiques négatifs et les services écosystémiques anthropiques en mer, fait l'objet de dysfonctionnements graves. Cette situation s'exprime, au niveau des dossiers d'études d'impacts, par une quasi-absence de compensation biophysique (« en nature ») des effets négatifs d'aménagements, doublée d'une absence de contrôle de l'effectivité des très rares mesures compensatoires qui ont été réalisées. Aussi, sur **plus de 350 mesures ERC que nous avons analysées dans 55 études d'impacts en France (dont DOM-TOM),**

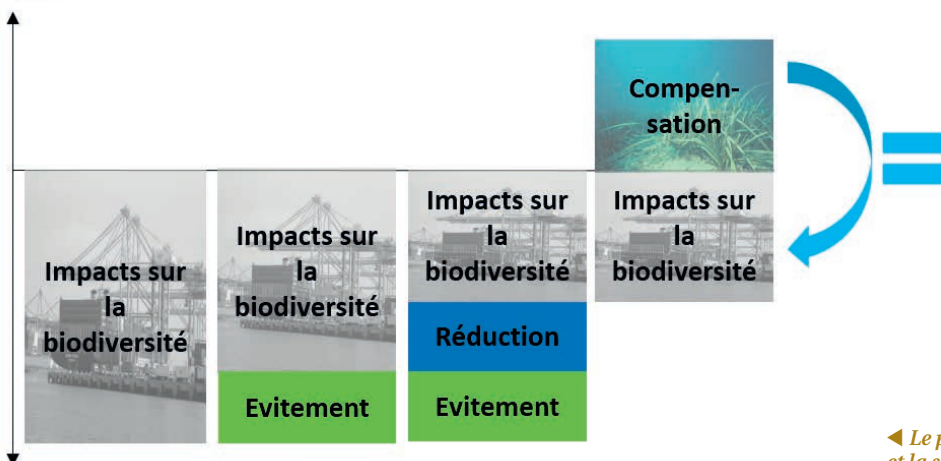
aucune mesure compensatoire n'a réellement été mise en œuvre. Pourtant, sur plus de 1 200 avis et questions du public dans le cadre de trois projets de parcs éoliens *off-shore* français, la question de la prise en compte de l'environnement est la préoccupation majeure (~70 %). Cette situation n'est pas particulière à la France. En effet, les parcs éoliens *off-shore* européens développés jusqu'en 2014, n'avaient réalisé aucune compensation biophysique (mesures compensatoires proposées dans les études d'impact réglementaires).

Dans un contexte d'aménagements croissants en

mer (croissance bleue), les pistes d'amélioration pour une meilleure application de la séquence ERC, dans un objectif de « non-perte nette » (Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, RBNP, 2016, cf. graphique), sont doubles. Il s'agit de renforcer l'étape d'évitement (cartographier les enjeux écologiques et socio-économiques) au stade de la planification des Documents stratégiques de façade, et d'améliorer l'évaluation de la compensation avec des outils méthodologiques opérationnels que nous avons développés : méthodes Merci-Cor ou Miti-Med. C'est d'ailleurs en Méditerranée, à Monaco, qu'a été testée pour la première fois, la méthode « Miti-Med » pour l'évaluation des pertes et des gains écologiques dans le cadre d'un projet d'aménagement en mer. En conclusion, il serait utile de (re)penser à une « gouvernance de la compensation en mer » en s'inspirant des retours d'expériences, notamment aux États-Unis, pour orienter le « pas de perte de nette » de biodiversité voulu par la loi RBNP de 2016 en France.

Contacts : S. Pioch (CEFE), sylvain.pioch@univ-montp3.fr, C. Jacob (CEFE), celine.jacob05@aptalumni.org et A. Bas (AMURE/CEFE), adeline.bas@gmail.com

Gain net



◀ Le principe de Non-Perte Nette (No Net Loss) et la séquence « Éviter-Réduire-Compenser »

Biotechnologies, bioingénieries marines et restauration écologique des milieux

Les symbioses microbiennes en milieu marin : une nouvelle source de médicaments ?

Une proportion significative des médicaments utilisés en clinique aujourd'hui est d'origine naturelle. Les médicaments d'origine naturelle, et ceux inspirés de produits naturels, représentent plus de la moitié des nouvelles entités chimiques approuvées depuis 1940. Cela est particulièrement vrai pour des agents anti-infectieux et anticancéreux. Entre 1981 et 2014, 79 % des antibactériens et 87 % des anticancéreux approuvés sont des produits naturels ou des mimes de produits naturels actifs. Si beaucoup de ces composés sont d'origine microbienne, des communautés microbiennes ont été peu considérées comme source possible de médicaments. Il s'agit des symbiotes d'organismes macroscopiques, plantes, insectes, mammifères et invertébrés marins notamment. Il semble que **dans ces communautés microbiennes restreintes, où la compétition est très forte, le rôle des substances actives soit d'interférer dans le développement d'autres micro-organismes compétiteurs.** Ainsi, ces

symbiotes peuvent également bénéficier à l'hôte, contrecarrant concurrents, herbivores ou prédateurs et contribuant ainsi à améliorer sa valeur adaptative. Le projet ANR-MALICA*, associant des laboratoires publics (LBBM en Occitanie et Institut des Sciences Chimiques de Rennes) à Pierre Fabre Médicaments, a eu pour objectif **d'utiliser la diversité des produits naturels provenant de bactéries isolées de lichens marins et littoraux. Des nouvelles entités chimiques ont été recherchées pour le développement de médicaments innovants, qui conjugueraient ces composés à des anticorps ciblant les cellules cancéreuses et développant ainsi des thérapies plus ciblées.** Dans le projet ANR-SECIL* (partenariat franco-suisse), les interactions microbiennes sont étudiées chez des endophytes foliaires de plantes à la recherche d'agents antibactériens originaux et innovants, cela sur deux systèmes modèles connus pour la longévité de leurs feuilles ou tiges : *Astrocaryum sciophilum*, un palmier endémique de la forêt primaire en Guyane française, et *Posidonia*

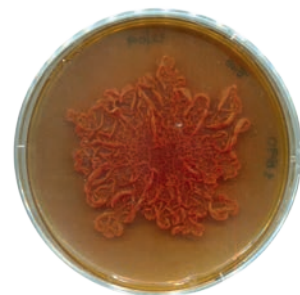
oceanica, une plante dominante des prairies marines de Méditerranée.

Contacts (LBBM) : D. Stien, didier.stien@cnsr.fr et M. Suzuki, suzuki@obs-banyuls.fr

* Plus d'informations :

Projet ANR MALICA « Les lichens marins comme source innovante de molécules anticancéreuses » : www.obs-banyuls.fr/malica

Projet ANR SECIL « Étude de champignons endophytes foliaires : exploration et valorisation de métabolites antibactériens innovants biosourcés » : <http://secil.obs-banyuls.fr>



◀ Colonie de la bactérie *Verrucosipora giffhornensis* isolée à partir du lichen marin *Lichina pygmaea*. © Sanjay Antony-Babu

Immunobiologie pour lutter contre la mortalité des huîtres en élevage

Le système immunitaire inné, première ligne de défense contre les pathogènes, repose sur des mécanismes ancestraux qui ont longtemps été considérés comme non spécifiques, dépourvus de mémoire et moins élaborés que la réponse adaptative. Cependant, au cours de la dernière décennie, **de nombreuses découvertes ont mis en évidence, chez un large éventail d'invertébrés, l'existence d'une mémoire immunitaire innée (appelée « priming immunitaire ») conduisant à une survie améliorée lors d'une seconde rencontre avec un pathogène.** Les travaux coordonnés par IHPE* ont entrepris de caractériser ce phénomène de *priming* immunitaire chez l'huître *Crassostrea gigas*. Cette espèce est actuellement victime de mortalités massives récurrentes sans traitement thérapeutique existant. Ce syndrome, d'étiologie complexe, implique différents types de pathogènes, dont un pathogène émergent, le virus de type herpès OsHV-1 μ Var. Nos résultats ont montré **qu'un traitement préalable (priming) par un analogue synthétique d'ARN double brin, appelé poly (I: C), conduisait à une protection efficace des huîtres (jusqu'à 100 %) face à une exposition**

ultérieure au virus en laboratoire mais aussi en milieu naturel, lors d'épisodes de mortalité. Cette protection s'est avérée être persistante dans le temps jusqu'à cinq mois, suggérant l'existence de mécanismes de mémoire immunitaire innée. L'étude des bases moléculaires de ce phénomène a révélé que ce *priming* reposait sur le déclenchement d'une importante réponse immunitaire antivirale limitant la réplication du virus, permettant ainsi la protection des huîtres. Cette étude apporte de nouveaux arguments sur ces nouveaux concepts de mémoire immunitaire innée mais aussi permet d'identifier

de nouvelles pistes d'application pour limiter l'apparition de mortalités des huîtres en élevage. Ces travaux soulignent l'apport essentiel de la recherche finalisée pour formuler des réponses aux grandes problématiques actuelles relatives à la santé des invertébrés marins et l'optimisation raisonnée des productions aquacoles.

Contact (IHPE) :

C. Montagnani, cmontagn@ifremer.fr

* Projet « Protection antivirale de l'huître creuse *Crassostrea gigas* » (PROVIGAS, financement « Chercheur(se) d'avenir » Région Occitanie/Pyrénées-Méditerranée). Le consortium du projet réunit l'UMR IHPE, le Comité Régional de Conchyliculture de Méditerranée (CRCM, Mèze) et le Centre d'études et de promotion des activités lagunaires et maritimes (Cepalmar).



◀ Naissains d'huître *C. gigas* et prélèvements d'hémolymphe. © C. Montagnani/Ifremer

La nurserie de coraux pour faire face au changement climatique

Les évolutions résultant du changement climatique vont engendrer une augmentation de la température de l'eau dont il s'agit d'étudier les impacts sur les espèces et les milieux. Le CRIOBE explore la possibilité de générer des coraux capables de faire face à ces défis en étudiant les modalités possibles de restauration récifale, sachant que le réensemencement de larves ou la transplantation de boutures coralliennes sur une zone endommagée ne sera vraiment efficace que si les coraux transplantés sont capables de survivre aux conditions environnementales futures. Deux hypothèses ont été testées dans le cadre du projet AQUA-CORAL*. **La sélection de géniteurs coralliens « gagnants » (des coraux qui ne blanchissent pas) permet-elle de générer des croisements via la reproduction sexuée plus résistants à la hausse de température ?** Les travaux montrent que certains croisements entre gamètes mâles et femelles augmentent la résistance des stades pélagiques générés face à l'augmentation de la température. Cependant le caractère « gagnant » ou « perdant » (coraux qui blanchissent) des colonies génitrices ne permet pas d'expliquer les résultats observés, et nous cherchons à comprendre aujourd'hui pourquoi certains croisements sont plus efficaces que d'autres. La deuxième hypothèse est que la plasticité développementale peut jouer un rôle dans la capacité des jeunes stades à s'acclimater aux températures plus élevées.

Les résultats dévoilent **qu'une exposition de courte durée des embryons à de fortes températures permet d'augmenter leur résistance ultérieure.** Bien qu'encourageants, ces résultats doivent être testés à plus long terme pour identifier si cette résistance est maintenue au cours du développement des organismes. La sélection et l'acclimatation des coraux aux perturbations environnementales du XXI^e siècle sont deux pistes encourageantes qu'il convient de continuer à explorer dans le futur pour aider les coraux à faire face aux modifications environnementales de la planète.

Contact (CRIOBE) :

L. Hédouin, laetitia.hedouin@criobe.pf

* Plus d'informations sur le projet AQUA-CORAL (financé par le ministère de l'Outre-Mer) : www.criobe.pf/recherche/aqua-coral/



▲ Exemple de pépinière corallienne. Certaines boutures de coraux montrent des signes de blanchissement alors que d'autres non. © Laetitia Hédouin

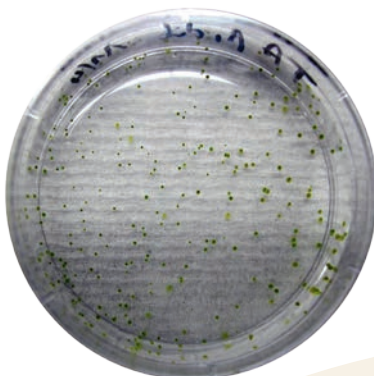
Production de composés à haute valeur ajoutée chez les microalgues

Les microalgues du phytoplancton marin sont une source de molécules bioactives d'intérêt en biotechnologie, pour les domaines de la nutraceutique, de la cosmétique ou de la pharmaceutique. **Parmi les composés d'intérêt chez les microalgues, les caroténoïdes sont de puissants antioxydants ayant des activités anti-inflammatoires, antiprolifératives ou encore cardio-protectrices.** LOMIC travaille sur les picoalgues eucaryotes appartenant à la classe des *Mamiellophyceae* et, en particulier, les genres *Ostreococcus*, *Bathycoccus* et *Micromonas*. Des outils de sélection génétique et de culture en conditions contrôlées, développés dans un premier temps chez *O. tauri*, ont été étendus par la suite à d'autres espèces de *Mamiellophyceae*. Dans le cadre du projet européen EMBRIC (*European Marine Biological Research Infrastructure Cluster*), LOMIC contribue à (1) identifier des nouveaux métabolites ayant des activités antiprolifératives ou antioxydantes, (2) optimiser

la production de caroténoïdes par des approches écophysiological sur des souches issues de niches écologiques contrastées du point de vue de la lumière, de la température ou de la salinité, (3) optimiser la production de caroténoïdes des voies alpha ou bêta par ingénierie génétique de la lycopène cyclase. Les résultats obtenus ont vocation à être valorisés en partenariat industriel.

Contact (LOMIC) : F.-Y. Bouget, francois-yves.bouget@obs-banyuls.fr

Plus d'informations : www.mdpi.com/1660-3397/16/3/76/pdf



◀ Colonies de la microalga *Ostreococcus tauri* sur boîte de Petri.

© François-Yves Bouget/SU-CNRS/LOMIC/Banyuls-sur-Mer

L'ingénierie marine du futur sera bio-inspirée.

Vers la durabilité de l'algoculture : productions microalgales par recyclage des eaux polluées et des fumées industrielles

L'utilisation de la biomasse microalgale est annoncée comme une des solutions innovantes pour améliorer la résilience des villes et territoires méditerranéens face aux crises alimentaire, environnementale et énergétique (rapport de l'Institut de Prospective Économique du Monde Méditerranéen, IPAMED). En effet, **la polyvalence des applications ouvre la perspective, d'ici une décennie, d'une nouvelle bioindustrie déployée en Méditerranée et la création de nouvelles filières alimentaires. L'utilisation de la bioressource algale pour sa conversion en produits chimiques (chimie verte), en matériaux et en énergie, représente un des défis majeurs de cette décennie pour une « croissance bleue ».** Le développement et la mise en œuvre de procédés de culture microalgale permettant une production stable et économiquement viable reste un verrou important du développement industriel de la

filiale algale. Les projets collaboratifs VASCO2 (ADEME)* et PHYCOVER (ANR)* ont pour objectif d'étudier la faisabilité d'une production algale en bassins ouverts à partir d'une communauté diversifiée qui utiliserait des eaux usées urbaines non traitées et/ou des fumées industrielles comme sources alternatives d'azote, de phosphore et de CO₂. MARBEC caractérise l'efficacité de bioremédiation et la capacité de résilience des assemblages de microalgues et des bactéries associées, vis-à-vis des fluctuations climatiques et de la variabilité des facteurs chimiques (nature des nutriments, contaminants) et biologiques (prédateurs, compétiteurs/facilitateurs). Les études réalisées se focalisent sur le rôle et l'importance des interactions entre les microorganismes en démontrant l'intérêt de certaines associations, notamment entre les microalgues et les bactéries, pour gagner en résilience et en productivité. Des assemblages microbiens optimisés, artificiellement créés

ou dirigés par les conditions de culture, sont proposés et testés à l'échelle du laboratoire puis à l'échelle de pilote.



▲ Bassin ouvert de culture d'algues utilisé pour les expérimentations sur la remédiation de fumée d'usines (Plateforme Ifremer Palavas). © Éric Fouilland

Contact (MARBEC) : É. Fouilland, eric.fouilland@cnrs.fr

* Plus d'informations :

- Projet VASCO2 (Valorisation biologique des fumées industrielles pour une chimie verte) : www.marseille-port.fr/fr/Page/19618

- Projet PHYCOVER (Durabilité des productions microalgales par recyclage du phosphore et de l'azote des eaux résiduaires : vers la station d'épuration du futur) : www6.inra.fr/phycover

Restauration des lagunes méditerranéennes par réduction des apports nutritifs urbains

Situées à l'interface entre terre et mer, les lagunes sont des écosystèmes emblématiques en Occitanie, couvrant 40 000 hectares du littoral. Du fait de leur forte productivité et de leur diversité biologique, elles sont le support de nombreux services écosystémiques (conchyliculture, pêche, tourisme, thermalisme, nurserie...). Depuis les années 1960, les pressions humaines importantes et croissantes sur le littoral ont conduit à la dégradation des lagunes méditerranéennes. En particulier, l'eutrophisation (cf. page suivante) a fortement dégradé ces écosystèmes et perturbé les activités traditionnelles, avec notamment des maïgnes (« mauvaises eaux » en occitan) engendrant des mortalités de coquillages. Au début des années 2000, suite à une mobilisation régionale, d'importants efforts d'observation et de gestion ont été mis en place sur les

lagunes. Des travaux ciblés sur les systèmes d'assainissement ont ainsi été réalisés pour réduire les apports des bassins versants. La réponse des lagunes aux mesures de gestion est étudiée grâce aux réseaux d'observation de leur état vis-à-vis de l'eutrophisation. Les suivis ont montré que **les travaux d'assainissement ont permis une diminution de plus de 70 % des apports nutritifs aux étangs palavasiens. Ceci a mené à une nette diminution de la production phytoplanctonique et à la réapparition des macroalgues et des herbiers, habitat pour de nombreuses espèces de la faune aquatique. Dans la lagune de Thau, siège de 90 % de la production ostréicole régionale, les efforts entrepris depuis plus de 30 ans sur le système d'assainissement ont permis une amélioration de la qualité écologique,**

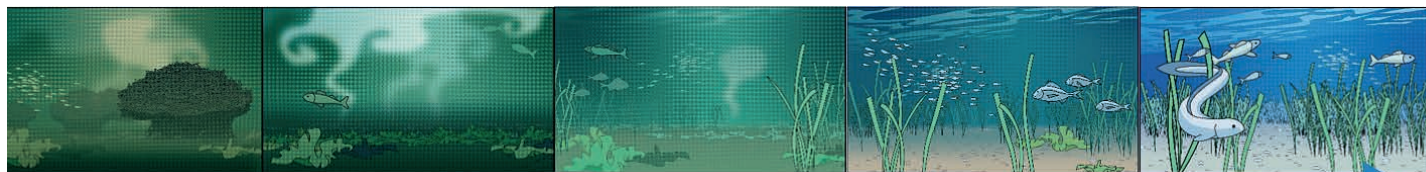
réduisant la fréquence des maïgnes. L'ensemble des études menées sur les lagunes occitanes apporte des éléments sur les délais de restauration de ces écosystèmes. Elles montrent aujourd'hui l'importance de concilier le bon état écologique et la préservation des services écosystémiques, notamment l'utilisation durable des ressources naturelles.

Contacts (MARBEC) :

B. Bec, beatrice.bec@umontpellier.fr
et V. Derolez, valerie.derolez@ifremer.fr

Plus d'informations :

www.umr-marbec.fr/fr/poles/observatoires/dce-lag_581
<http://rsl.cepralmar.com/telecharger.html>



RESTAURATION DES LAGUNES

▲ Évolution de l'état écologique des lagunes en phase de restauration. © Réseau de Suivi Lagunaire

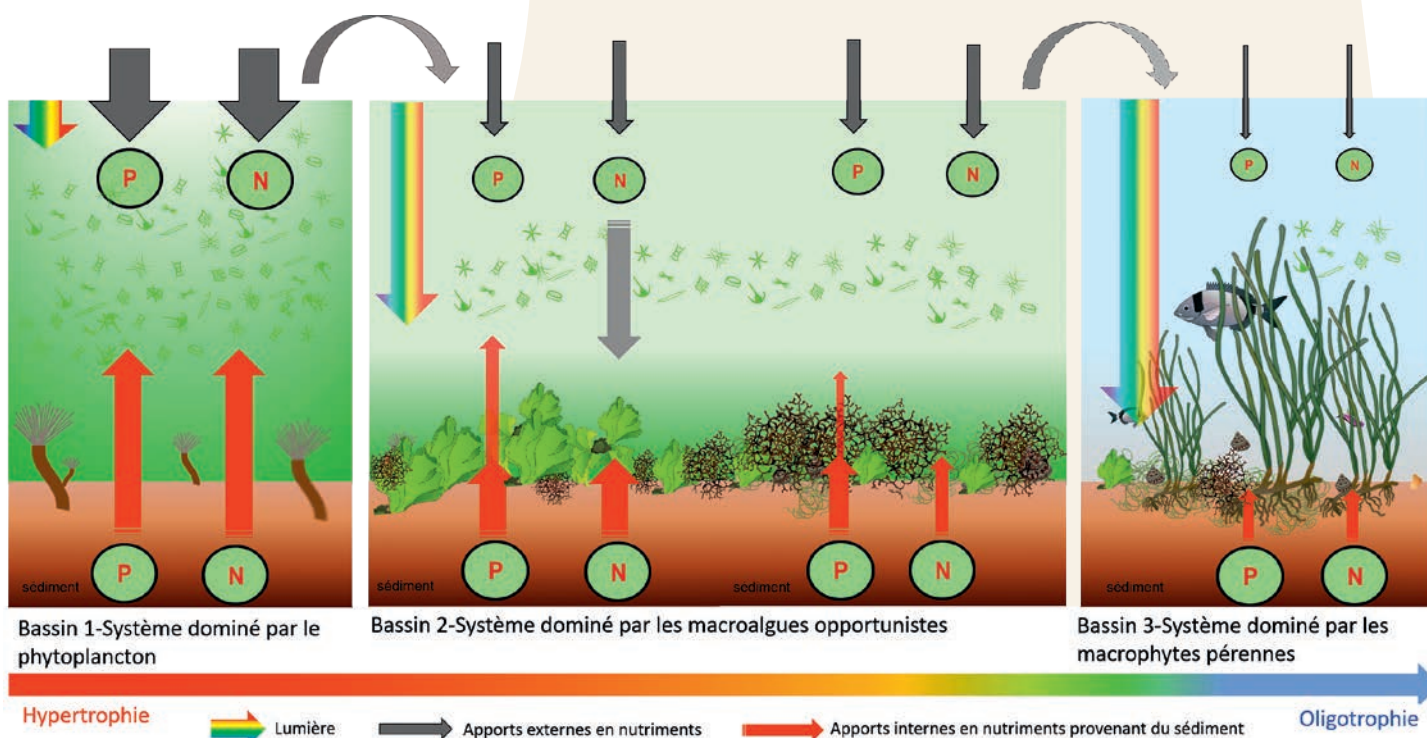
EUTROPHISATION ET RÉ-OLIGOTROPHISATION DES LAGUNES CÔTIÈRES

L'intensité des apports en éléments nutritifs (en particulier l'azote et le phosphore) dans les lagunes côtières a un grand impact sur leur écologie et notamment sur leurs communautés végétales et les réseaux trophiques qui en découlent. La dégradation des lagunes depuis les années 1960 était principalement due à un accroissement de ces apports induisant un processus connu sous le terme d'eutrophisation. Le remplacement des communautés végétales lors de l'eutrophisation est bien connu et suit la séquence suivante : « prairies de plantes à fleurs (zostères) → macroalgues opportunistes (comme la laitue de mer) → phytoplancton ». La politique publique visant à restaurer les lagunes côtières par la réduction des apports (*cf.* article précédent) pose donc la question de la réversibilité du phénomène d'eutrophisation, appelé aussi « ré-oligotrophisation ». Des recherches au sein de MARBEC visent à mieux caractériser les processus écologiques en jeu. Ainsi, lors de la phase d'eutrophisation, les sédiments ont tendance à stocker l'azote et le phosphore. Ces éléments nutritifs sont restitués lors de la phase de ré-oligotrophisation, induisant ainsi un effet retardataire sur la reconquête du bon état écologique.

Cependant, le phytoplancton réagit très vite lors d'une réduction des apports en éléments nutritifs. Une diminution de sa biomasse et des changements de son assemblage d'espèces ont été observés, avec l'apparition des espèces utilisant la matière organique. La séquence de remplacement des communautés végétales paraît en effet réversible. Les changements ne sont néanmoins pas graduels mais soumis à des phénomènes non-linéaires décrits par la théorie écologique des états stables et bassins d'attraction. Cette théorie postule que les différents états de l'écosystème avec leurs communautés associées sont stabilisés par des rétroactions écologiques jusqu'à un certain seuil de forçage environnemental ; un basculement vers un autre état de l'écosystème est induit seulement lorsque ce seuil est dépassé.

Contact (MARBEC) : R. de Wit, rutger.de-wit@umontpellier.fr

Plus d'informations : www.umr-marbec.fr/fr/recherche/systemes-littoraux-d-usages-multiples,012.html



▲ *La succession des communautés végétales dans les lagunes côtières lors d'un processus d'oligotrophisation. D'après Le Fur I., 2018. Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires : successions écologiques. Thèse doctorale de l'Université de Montpellier, 214 pp.*

Une réduction drastique des apports des bassins versants pourrait restaurer les lagunes dégradées.

Gestion des risques côtiers et adaptation au changement climatique

L'atténuation des vagues par les herbiers de posidonies, un service écosystémique contre l'érosion côtière

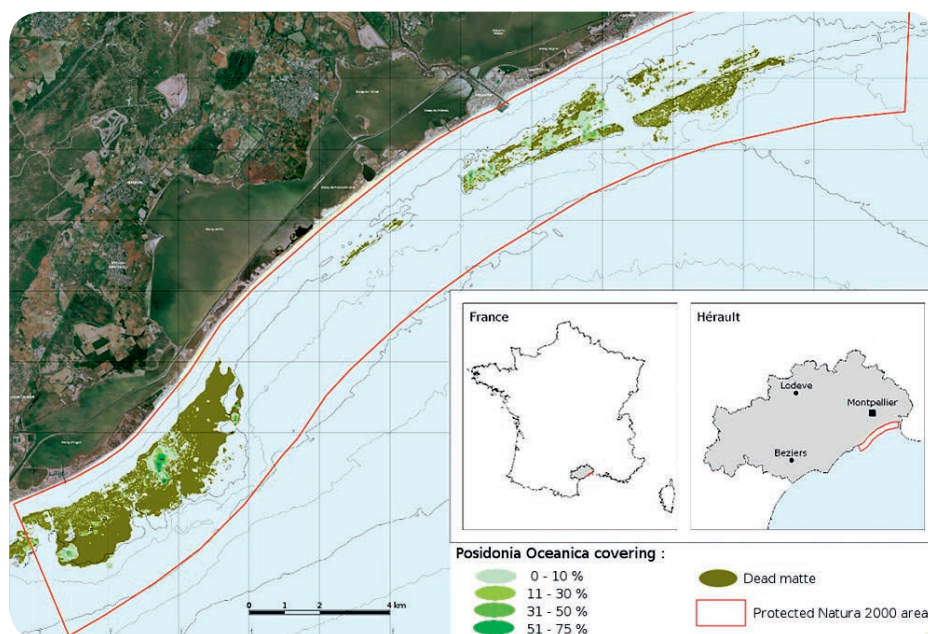
Les herbiers marins protègent comme des zones tampons d'absorption des vagues de tempête. Ils induisent une dissipation d'énergie et réduisent ainsi les contraintes de cisaillement sur les fonds. Ils forment aussi la base de nombreux réseaux trophiques marins, les plaçant ainsi parmi les écosystèmes les plus productifs. Pourtant, leur superficie diminue à un rythme alarmant. En effet, la posidonie (*Posidonia oceanica*), espèce marine endémique de la mer Méditerranée, a perdu entre 10 et 30 % de son étendue géographique totale depuis le début du 20^e siècle. Dans le golfe d'Aigues-Mortes (Méditerranée nord-occidentale), les superficies d'herbiers de posidonies ont diminué de moitié par endroit entre 2000 et 2010 alors que la région souffre d'érosion côtière sévère induite par des tempêtes épisodiques subies au cours des 50 dernières années.

La capacité des herbiers de posidonies à atténuer les vagues a été étudiée dans le golfe d'Aigues-Mortes par une approche de modélisation numérique à haute résolution rendue possible par une cartographie précise*. Le modèle numérique de propagation des vagues (*WaveWatch3*) a été configuré pour une grille de calcul sur le golfe d'Aigues-Mortes et pour un épisode de tempête réel (janvier 2008). Il s'avère que la zone du plateau des Aresquiers est la zone de plus forte atténuation due à la présence d'un herbier relativement dense. Dans la zone de Carnon/Palavas, le rôle des posidonies est, quant à lui, relativement limité du

fait du morcellement et de la faible densité des herbiers. Les bandes de réfraction, très présentes sur le plateau des Aresquiers, provoquent de fortes variabilités des hauteurs de vagues incidentes à la côte. **Cette approche par modélisation démontre le rôle important des herbiers de posidonies comme service écosystémique d'atténuation des vagues et in fine de lutte contre l'érosion côtière.**

Contacts : Y. Leredde (GM),
yann.leredde@umontpellier.fr, P. Masaleix (LA),
patrick.masaleix@aero.obs-mip.fr
et S. Thorin (Créocéan), montpellier@creocean.fr

* Collaboration entre GM et LA et le bureau d'étude Créocéan.



▲ Couverture spatiale des herbiers de posidonies dans le golfe d'Aigues-Mortes.
© Cartographie : Andromède Océanologie

La vulnérabilité de la Méditerranée est aggravée par l'artificialisation et l'urbanisation du littoral.

Les politiques de relocalisation face à la montée du niveau de la mer : perceptions et évaluation des dommages évités

Face à la montée du niveau de la mer, de nouvelles logiques de relocalisation des biens et des activités les plus exposés sont prônées. Il s'agit de favoriser le maintien des plages comme protection par rapport aux tempêtes et comme actifs récréatifs facteurs d'attractivité. Le BRGM et le CEE-M ont évalué, à l'échelle de la région Occitanie, les dommages potentiels à l'horizon 2100, si le niveau de la mer augmente d'un mètre, selon quatre scénarios d'adaptation (Déni, Laissez-faire, Protection par des digues, Relocalisation des biens en première ligne). L'évaluation a porté sur l'habitat, les entreprises, l'agriculture, la salinisation des aquifères côtiers ainsi que les services écosystémiques des plages, des zones humides et des lagunes. Au total, **l'adaptation anticipée par une politique de relocalisation des biens et des activités permettrait d'éviter 31,2 milliards € de dommages sur la période 2010-2100, soit 69 000 € par habitant de la zone d'étude en 2010 ou 135 millions €/km de littoral***.

Malgré ces coûts évités très importants, les résultats comparatifs des analyses coût-avantage sont défavorables à la relocalisation par rapport aux digues, du fait des coûts d'indemnisation des biens

à relocaliser alors que les bénéfiques à moyen et long termes sont minimisés par le processus d'actualisation. Une recherche menée par le CEE-M et l'EID à l'échelle d'une commune méditerranéenne de référence** a produit une valeur actualisée nette positive pour la relocalisation que si l'on intègre les retombées économiques du maintien de l'attractivité touristique ainsi que les gains environnementaux du maintien des plages et des herbiers avec des modes d'indemnisation innovants (achat de la nue-propriété ou avec location temporaire). L'analyse des perceptions permet par ailleurs de comprendre les ressorts des contraintes à l'acceptabilité des relocalisations. Des enquêtes témoignent du rôle de la perception du risque, avec des biais d'optimisme ou de *statu quo* pour les résidents exposés du fait de leur attachement aux aménités de la proximité de la mer. **La complexité des déterminants sociaux et psychologiques est étudiée à travers des indicateurs de résistance et de capacité d'adaptation qui intègrent l'attachement au lieu, la mobilité résidentielle, la perception du risque, la confiance dans les institutions de gestion et la conscience du besoin d'anticiper.** On note aussi l'importance des émotions et des ressentis.

Contacts : H. Rey-Valette (CEE-M), helene.rey-valette@umontpellier.fr, C. Hérivaux (BRGM), c.herivaux@brgm.fr, C. Bazart (CEE-M), cecile.bazart@umontpellier.fr et D. Boulet (EID), dboulet@eid-med.org

* Projet MISEEVA (Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes).

** Projets SOLTER (Quelles solidarités territoriales et quelles stratégies pour la résilience du littoral à la submersion marine) et Alternative (Alternatives Littoral Vulnérable – Élévation du niveau marin).



▲ Palavas-les-Flots. © DREAL

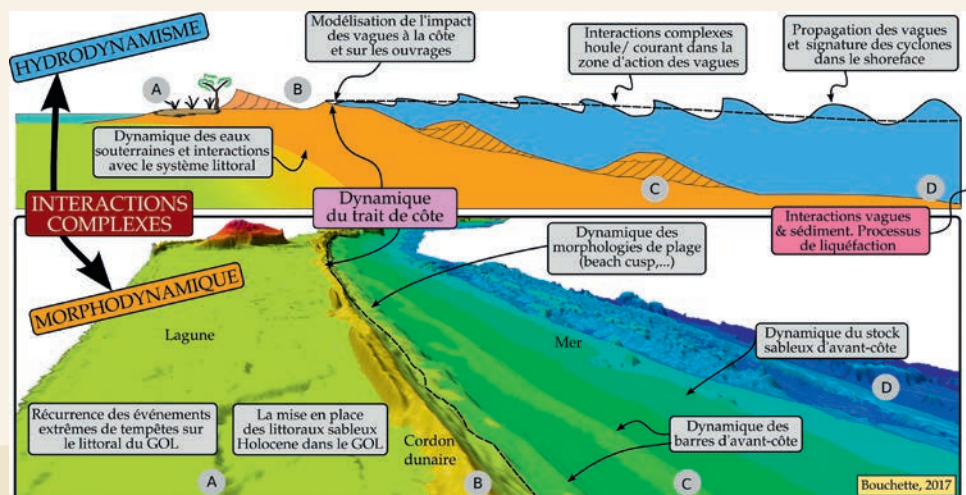
GLADYS : LE RÉSEAU DES SPÉCIALISTES DE L'HYDRO-MORPHODYNAMISME LITTORAL ET SES APPLICATIONS

Lors de sa création en 2006, GLADYS était un plateau technique GEPETO* de la région Languedoc-Roussillon dédié à la gestion d'un parc d'équipements spécialisé sur la mesure en zone littorale. En quelques années, GLADYS s'est transformé en réseau collaboratif regroupant la quasi-totalité des chercheurs de la façade méditerranéenne française spécialisés en hydro-morphodynamisme littoral abiotique et ses applications. Ce terme fait consensus pour désigner les interactions complexes entre les mouvements de la masse d'eau, le transport sédimentaire, la réponse morphologique du système aux deux familles précédentes de processus, ainsi que les mécanismes de rétroaction de la morphologie sur l'hydrodynamisme. Considérés du point de vue de la physique, des géosciences, des sciences de l'environnement ou du risque littoral, de la gestion du littoral ou de l'ingénierie côtière et portuaire, ces couplages complexes sont au cœur de la plupart des grandes questions de la recherche académique actuelle sur l'environnement littoral. GLADYS travaille sur ces questions de façon interdisciplinaire, en s'appuyant sur des approches par la mesure *in situ* (activité historique), l'expérimentation en canal et en bassin à houle, la modélisation numérique, la géophysique et des travaux de développement conceptuels (mathématiques et physique-mathématiques).

Les travaux de GLADYS nourrissent le développement d'applications en matière de protection douce du littoral (*Shore Soft Engineering*), de quantification du risque littoral, de prévision des événements extrêmes, de ressource en eau en zone littorale, d'exploitation des énergies renouvelables en zone littorale et de développement de solutions innovantes pour l'habitat, le transport et l'aménagement en zone littorale. L'étude de la dynamique du trait de côte des plages sableuses à toutes les échelles de temps et d'espace est l'activité la plus emblématique de GLADYS, qui disposera bientôt d'un Institut des plages GLADYS implanté au Grau du Roi.

Contact (GM) : F. Bouchette, contact@gladys-littoral.org
Plus d'informations : www.gladys-littoral.org

* GEPETO : Grand équipement pour l'évolution technologique et l'ouverture scientifique.



▲ **Les processus hydro-morphodynamiques dans la zone littorale.** On distingue traditionnellement ce qui a trait à l'hydrodynamisme (en haut) – les vagues et la circulation – et à la morphodynamisme (en bas) – le transport sédimentaire et les transformations du paysage. Si on s'appuie sur ces processus, on peut définir le littoral comme la succession de quatre domaines principaux : (A) la zone d'arrière dune, humide avec les éventuelles lagunes, (B) la zone du cordon dunaire, de la plage émergée et du jet de rive, (C) la zone de déferlement et (D) la zone de transformation des vagues jusqu'à la profondeur de fermeture des vagues qui est la limite de mobilité significative du sédiment pendant les événements forts.

La compréhension et la protection douce du littoral au service de la gestion des risques côtiers en Occitanie

Le littoral méditerranéen de l'Occitanie est constitué en grande partie par des côtes basses sableuses. Soumis aux aléas érosion et submersion marine, il reste pourtant attractif de façon croissante depuis les années 1960. La politique d'aménagement du littoral menée par le gouvernement de l'époque a permis une croissance démographique et économique au détriment bien souvent de la préservation de l'environnement en place (photo 1) : piétinement, prélèvement, voire arasement pur et simple. C'est au début des années 1980 qu'a émergé la volonté de préserver et de restaurer les cordons dunaires dont l'importance n'a été perçue que tardivement. Entre autres, ils constituent une défense naturelle contre les submersions marines. **Face à cette problématique, le pôle littoral de l'EID Méditerranée réalise des actions de réflexion, de conception et d'expérimentation dans le domaine de la protection et de la réhabilitation du milieu dunaire.** Plusieurs outils ont été développés et sont utilisés par cette unité pour réaliser un diagnostic puis le suivi d'un site :

- les bases de données recensant les propriétés dynamiques et morphologiques de chaque cordon sableux et celles identifiant les ouvrages de protection (type, date d'installation, état, etc.) ;
- les outils de mesures topographiques et bathymétriques (cane GPS, sondeur, drone, etc.) (photo 2).

S'en suivent des préconisations de gestion et/ou la conception d'ouvrages de génie écologique destinés aux collectivités. Ces aménagements respectent la dynamique naturelle du site. Il peut s'agir de ganivelles qui, suivant leur implantation, ont un rôle de piégeage ou de mise en défens contre le piétinement (schéma 3). D'autres ouvrages dits innovants sont conçus et testés pour répondre aux particularités des sites : pieux anti-ensablement ou casse-pattes, escaliers amovibles, escaliers avec contremarche en bois flottés comme ceux posés à Vias (Hérault) en 2017 qui permettent de canaliser l'accès tout en recyclant les bois flottés broyés incorporés aux marches (photo 4).

Contacts (EID Méditerranée) :

D. Boulet et H. Heuteux, littoral@eid-med.org

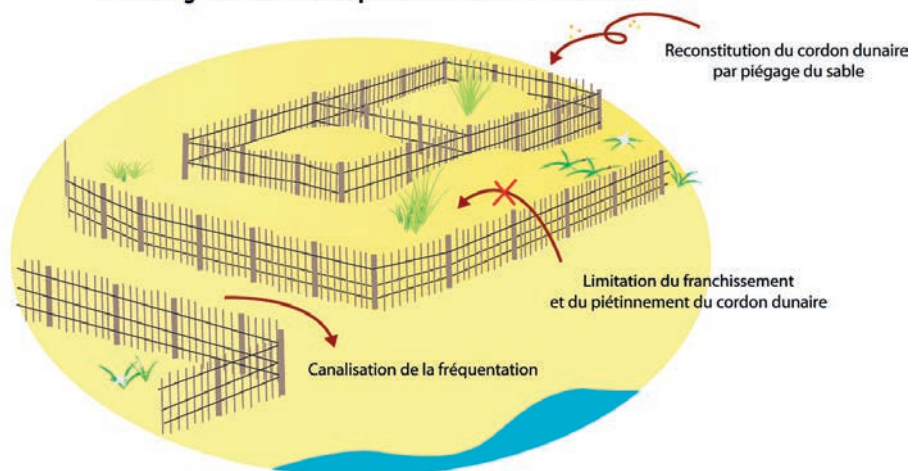


▲ 1. La Grande Motte, station littorale construite lors de la mission Racine. © EID Méditerranée



▲ 2. Suivi topographique réalisé sur le site des Orpellières à Sérignan (34). © EID Méditerranée

Rôle des ganivelles dans la protection du cordon dunaire



© EID Méditerranée, 2016

▲ 3. Rôle des ganivelles dans la protection du cordon dunaire. © EID Méditerranée

▲ 4. Réalisation d'un escalier transdunaire. Des broyats de bois flottés comblent les marches. © EID Méditerranée/2017



Aires marines protégées et stratégies de bioconservation

Les aires marines protégées (AMP), entre logiques patrimoniales, stratégies d'accaparement et gestion des pêches

Les AMP^{1*} se sont récemment imposées comme l'une des formes majeures d'occupation des océans. Cet engouement du monde de la conservation de la biodiversité pour les océans s'inscrit dans le cadre d'une véritable « course à la mer », qui voit États et monde industriel tenter de consolider leur emprise sur ces espaces et leurs ressources. Ces nouvelles dynamiques s'ajoutent aux usages plus anciens des océans, notamment la pêche, ce qui accroît considérablement la pression halieutique et, en réaction, mène à une remobilisation de pratiques « traditionnelles ». Dans ce contexte de « maritimisation » des enjeux économiques, politiques et environnementaux, les AMP, en tant qu'enclaves de biodiversité visant la conservation d'un patrimoine global, sont traversées de vives tensions liées à la confrontation de logiques territoriales potentiellement concurrentes et enchevêtrées. La création d'enclaves de biodiversité obéit à des fins de conservation de la nature, mais peut également oblitérer les revendications d'usages des populations vivant de, ou liées à, la mer. Les AMP contribuent ainsi aux logiques d'accaparement des espaces et des ressources maritimes qu'elles entendent pourtant combattre face aux stratégies extractives (pêcheries thonières, ressources minérales profondes, etc.).

Tant en termes d'efficacité que de gestion, la mise en place des AMP pose des questions quant à leur superficie (grandes zones de protection océaniques contre petites aires localisées, aires en réseau fondées sur un principe de connectivité écologique), leur nature (formes « traditionnelles » ou « hybrides » contre conservation environnementaliste fondée sur des bases scientifiques), leur localisation (zones côtières et/ou zones hauturières, protection des eaux internationales) et leur insertion dans des espaces périphériques non protégés et dédiés à d'autres usages (enjeux de planification spatiale marine).

Ces différentes tensions et la manière dont elles sont résolues par les politiques publiques, entre autres de conservation, expliquent la diversité des formes de mise en protection de la biodiversité marine. Elles irriguent les controverses sur l'efficacité écologique et les fonctions non écologiques de ces dispositifs, et ce, selon des modalités différentes en fonction des caractéristiques historiques, géographiques, biophysiques et politiques des mers et océans concernés. **La problématique méditerranéenne, petite mer quasi-fermée, traversée par des lignes de fracture géopolitiques majeures et environnée de concentrations humaines et industrielles**

denses, est à cet égard très particulière. Cette spécificité s'exprime dans la fragmentation et le caractère étroitement intriqué des enjeux marins (pêche, pollution, transports, environnement) et des dispositifs de conservation : un grand nombre de petites AMP (couvrant 7 % de la surface marine), dispersées et parfois organisées en réseaux. La localisation de ces AMP, situées à 90 % dans les eaux côtières des pays de l'Union européenne, reflète également clairement l'asymétrie politique et économique Nord-Sud structurant la configuration méditerranéenne.

Contacts (GRED) : M. Dégremont, marlene.degremont@gmail.com, É. Fache, elodie.fache@ird.fr, P.-Y. Le Meur, pierre-yves.lemeur@ird.fr et E. Rodary, estienne.rodary@ird.fr

* Selon l'UICN : « Tout espace intertidal ou infra-tidal ainsi que des eaux sous-jacentes, sa flore, sa faune et ses ressources historiques et culturelles que la loi ou d'autres moyens efficaces ont mis en réserve pour protéger en tout ou en partie le milieu ainsi délimité ». Ce sont ainsi plutôt des volumes d'eau que des surfaces...



▲ Panache d'un ver marin. © Thomas Changeux / IRD

L'emplacement des AMP répond à des contraintes politiques et économiques locales plutôt qu'à une stratégie régionale de conservation.

L'impact du réseau d'AMP en Méditerranée sur la conservation et l'exploitation des ressources marines vivantes : exemple du mérou brun

Alors que la surface de la Méditerranée ne représente que 0,82 % de la surface totale des mers et des océans, elle offre un habitat pour 4 à 18 % des espèces marines connues, avec un taux d'endémisme de 8,8 %. Pour palier à la surexploitation de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés dans ce « hotspot » de biodiversité, environ 200 AMP de statut national, couvrant 1,6 % de la surface, ont été créées sur les côtes méditerranéennes*. Cependant, leurs emplacements répondent plus à des contraintes ou des opportunités politiques et économiques locales qu'à une réelle stratégie régionale de conservation de la biodiversité. Ainsi, le degré de connectivité de ce réseau d'AMP méditerranéennes, c'est-à-dire sa capacité à échanger des individus, et sa capacité à disperser des individus vers les zones pêchées, est très mal connu. Pour apporter des arguments quantitatifs, permettant de mieux planifier l'emplacement des futures AMP, nous avons développé un modèle biophysique permettant de simuler la dispersion larvaire de poissons depuis les AMP.

Nous avons démontré que **le réseau d'AMP est faiblement connecté, menaçant potentiellement la préservation d'espèces emblématiques et fortement pêchées comme le mérou brun (*Epinephelus marginatus*)**. Les distances entre les AMP sont de 1 032 km en moyenne, alors que la distance de dispersion des larves de mérou brun n'est que de 120 km, ce qui laisse de nombreuses populations locales totalement isolées. De plus, la distribution des AMP reste très hétérogène en Méditerranée, avec une faible densité dans le sud-est, laissant ainsi **près de 20 % du plateau continental sans aucun apport larvaire issu des AMP**. **Le changement climatique devrait accentuer cette faible connectivité car la distance de dispersion des larves subira une réduction de 10 % au cours du prochain siècle, soit 9 km en moyenne**, car une hausse des températures (attendue à +2,8°C) augmentera les taux métaboliques des larves qui auront une croissance plus rapide et une dispersion réduite. **Cet impact du changement climatique sur l'efficacité du réseau d'AMP méditerranéen, couplé à une intensification des efforts de pêche, souligne l'urgence d'assurer la connectivité entre les AMP, et entre les AMP et les zones pêchées.**

Contacts : D. Mouillot (MARBEC), david.mouillot@umontpellier.fr;
M. Andrello (MARBEC), marco.andrello@ird.fr
et S. Manel (CEFE), stephanie.manel@cefe.cnrs.fr

Plus d'informations :
<https://twitter.com/reservebenefit?lang=fr>
<https://reefish.umontpellier.fr/index.php?article8/biodiversa-reservebenefit>
www.fishbase.org/summary/Epinephelus-marginatus.html

* <http://medpan.org/fr/les-aires-marines-protgees>



▲ Mérou brun sur la côte rocheuse méditerranéenne. © David Diaz

Rôle des AMP : connectivité des populations de gorgonaires du golfe du Lion

Les AMP ont le plus souvent été choisies sur la base d'habitats auxquels des espèces remarquables supposées clés de voûte pour la biodiversité, emblématiques ou en danger sont inféodées. Un facteur particulièrement absent de la réflexion sur l'implantation des AMP concerne les conséquences de migrations chez la plupart des espèces marines, y compris chez les espèces fixées au stade adulte dont la dispersion larvaire permet la colonisation de sites distants. Cette phase dispersive peut avoir deux effets antagonistes sur la persistance des espèces, à savoir une diminution par des taux de rétention trop faibles pour assurer le renouvellement des générations à l'échelle locale et une augmentation par la distribution de l'espèce sur plusieurs sites, accroissant sa résilience aux perturbations locales et à la fragmentation de l'habitat. Des AMP isolées peuvent alors s'avérer inefficaces pour la conservation d'espèces dont le cycle de vie présente une phase dispersive. Ainsi, dans le golfe du Lion, les gestionnaires d'AMP accordent une attention particulière aux gorgonaires. En effet, les gorgonaires sont des espèces fixées parmi les plus remarquables des communautés de substrats durs subtidales et jouent un rôle écologique essentiel « d'espèce parapluie » fournissant un habitat pour l'épifaune de petite taille et un refuge pour de nombreux poissons. Le LECOB a mené des travaux sur la connectivité des populations des gorgonaires dans le golfe du Lion en couplant des simulations numériques de la dispersion larvaire et des observations du flux génique dans le cadre d'un projet LITEAU IV*. Ces travaux mettent en évidence **la pertinence d'une gestion en réseau des AMP du centre à l'ouest du golfe du Lion** qui sont connectées par des flux larvaires favorisant par exemple la résilience régionale de la gorgone blanche *Eunicella singularis* face à des perturbations locales récurrentes.**

Contacts (LECOB) : K. Guizien, katell.guizien@obs-banyuls.fr
et L. Bramanti, lorenzo.bramanti@obs-banyuls.fr

* Projet RocConnect « Connectivité des populations de l'habitat rocheux fragmenté du golfe du Lion » : www.liteau.net/index.php/projet/liteau-iv-2011-apr/roc-connect-connectivite-des-habitats-rocheux-fragmentes-du-golfe-du-lion

** AMP Agathoise, Réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls, Parc naturel marin du golfe du Lion, Parc marin du Cap Creus.

▼ Paysage de l'habitat de la gorgone blanche *Eunicella singularis* dans la Réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls sur la Côte Vermeille. © Katell Guizien





Élaboration de stratégies pour la conservation du Grand dauphin en Méditerranée française

La conservation des cétacés est un enjeu important du maintien de la biodiversité marine, mais difficile en raison de leur grande mobilité. Différents cadres juridiques de protection existent aujourd'hui : aux niveaux local grâce aux AMP, national à travers le Plan d'Action pour le Milieu marin (arrêté du 01/07/2017) et européen notamment à travers la Directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin ». La conservation des cétacés nécessite l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies à large échelle intégrant les différents objectifs et contraintes des cadres juridiques en place dans l'aire de présence des populations. Le littoral méditerranéen français compte plus d'une soixantaine d'AMP. **Ce réseau peut fournir un outil pertinent pour la conservation des cétacés, en particulier du Grand dauphin (*Tursiops truncatus*), seule espèce côtière de cétacés nécessitant la mise en place de Zones spéciales de conservation en Méditerranée.**

L'objectif de cette recherche, en collaboration avec le Groupement d'intérêt scientifique pour les mammifères marins de Méditerranée (GIS3M*) et l'Agence française pour la biodiversité, est d'étudier le potentiel



▲ **Grand dauphin (*Tursiops truncatus*).** © *Hélène Labach*

et la pertinence du réseau d'AMP pour la conservation du Grand dauphin en Méditerranée française et de proposer des stratégies de conservation valorisant le réseau. Un premier axe vise à identifier des unités de gestion et de définir les enjeux de conservation de la population. Un deuxième axe a pour objectif d'évaluer l'efficacité du réseau d'AMP pour la gestion des unités de gestion, ainsi que les outils et moyens existants ou potentiels. Un troisième axe vise à intégrer le contexte socio-économique de façon dynamique à travers une

approche de gestion adaptative. L'intégration de ces différents axes permettra de proposer des stratégies de gestion intégrée pour chaque AMP, pour le réseau et à l'échelle de la façade en associant les différents acteurs.

Contacts :

H. Labach (GIS3M/CEFE), hlgis3m@gmail.com,
V. Lauret (CEFE), valentin.lauret@cefe.cnrs.fr
et O. Gimenez (CEFE), olivier.gimenez@cefe.cnrs.fr

* Plus d'informations : www.gis3m.org

UN RÉSEAU D'AMP POUR UNE PÊCHE DURABLE EN MÉDITERRANÉE NORD-OCCIDENTALE

L'objectif général du programme européen SafeNet* est d'identifier des réseaux cohérents d'AMP et d'autres modes de gestion spatiale des pêches afin d'aider à atteindre le rendement maximal durable des pêches et maximiser les bénéfices socio-économiques à long terme pour les pêcheurs en Méditerranée nord-occidentale. Pour cela, chercheurs et ONG en partenariat utilisent une approche écosystémique à la gestion de la pêche et co-construisent des solutions avec les parties prenantes. Les résultats du projet seront donc essentiels pour atteindre :

- le bon état écologique en Méditerranée nord-occidentale (objectif principal de la Directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » de la Commission européenne) ;
- la durabilité environnementale, économique et sociale de la pêche (telle que dictée par la Politique commune de la pêche de la Commission européenne).

La collecte et l'intégration des données de pêche, écologiques et socio-économiques, ainsi que l'implication des acteurs (pêcheurs, gestionnaires et personnel des AMP, ONG, représentants des pêches et autorités) permettront le partage des connaissances traditionnelles de l'écosystème marin et de leurs suggestions de gestion. L'intégration de ces informations à travers des modèles écosystémiques permettra de (1) évaluer les bénéfices actuels des AMP et d'autres modes de gestion des pêches (par exemple la gestion spécifique à la flottille, les quotas spécifiques aux espèces, etc.) et (2) simuler les effets des configurations alternatives potentielles des réseaux d'AMP. Le projet identifiera donc les scénarios de gestion spatiale les plus appropriés et performants pour garantir la conservation de la biodiversité et la durabilité environnementale, sociale et économique de la pêche et fournira des lignes directrices pour une gestion durable des pêches en Méditerranée nord-occidentale.

Contact (CRIOBE) : J. Claudet, joachim.claudet@cnrs.fr

* Plus d'informations sur le projet SafeNet (*Sustainable fisheries in EU Mediterranean waters through a network of MPAs*) :

www.criobe.pf/recherche/safenet



▲ **Enquête auprès des pêcheurs du Parc marin du golfe du Lion.** © *Giulia Prato*



▲ **Enquête auprès du marché des pêcheurs à Cannes.** © *Rita Sahyoun*

Co-construction d'indicateurs de gouvernance des AMP. Quand scientifiques et gestionnaires de l'environnement collaborent

Deux approches peuvent être suivies par des gestionnaires et des scientifiques pour co-construire des indicateurs de gouvernance des AMP. C'est l'un des résultats du projet PAMPA (financé par le programme LITEAU de 2008 à 2011)* qui a concerné trois AMP méditerranéennes : le Parc marin de la Côte Bleue et les réserves naturelles des Bouches de Bonifacio et de Cerbère-Banyuls.

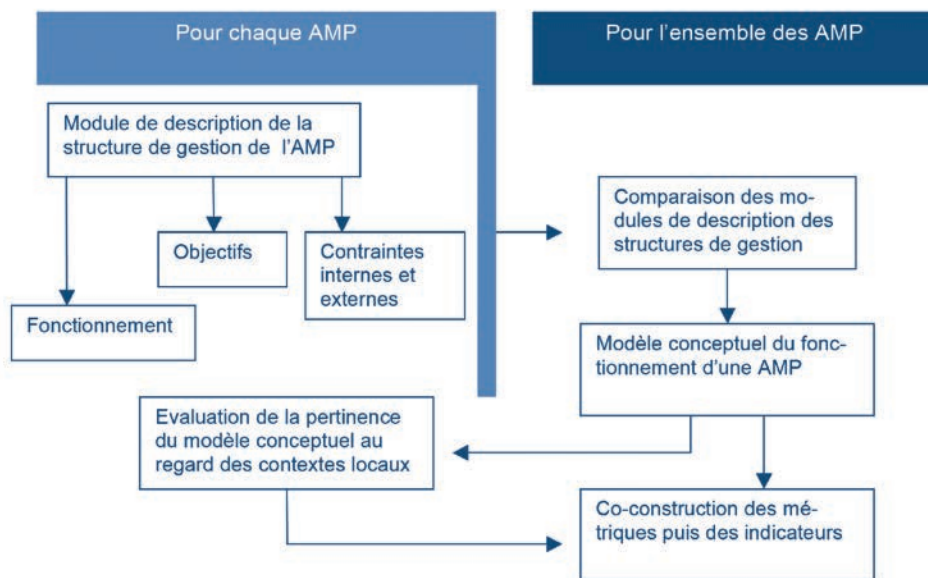
La première approche – par l'exploration collective de la gouvernance – s'applique quand cette notion est mal appréhendée par ses futurs utilisateurs. Elle se structure en trois étapes principales :

- la description du fonctionnement de la structure de gestion de chaque AMP, des objectifs qui lui sont assignés et des contraintes internes ou externes qui pèsent sur son fonctionnement ;
- la construction d'un modèle conceptuel du fonctionnement de l'AMP considérée ;
- la co-construction des métriques et des indicateurs (cf. fig. 1).

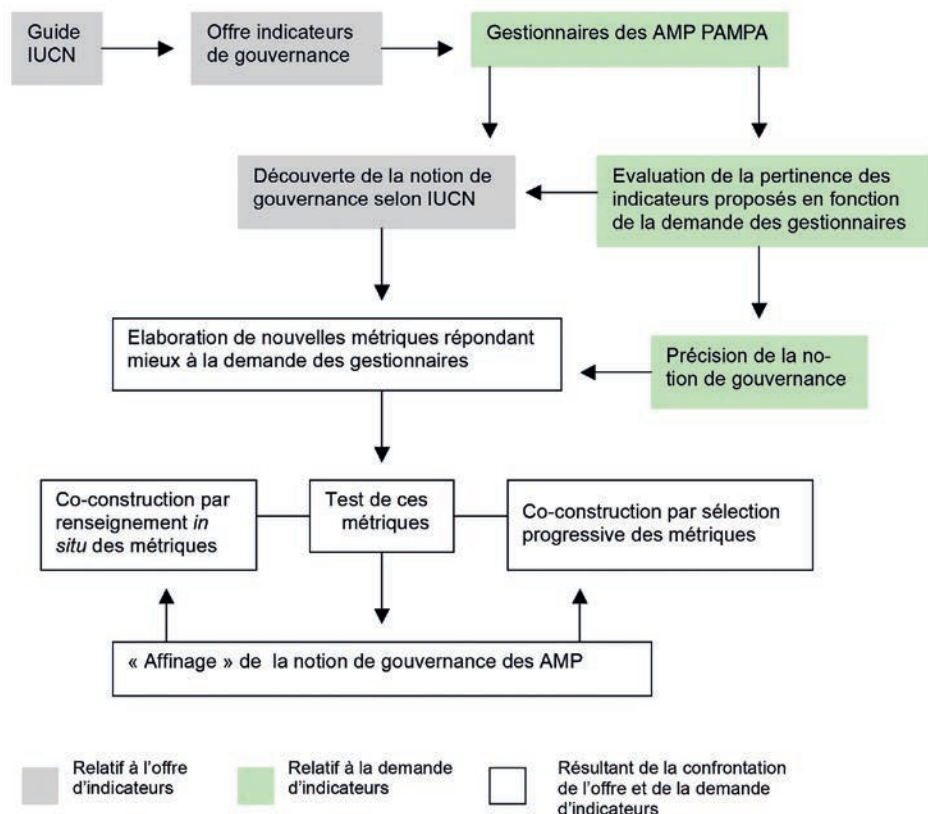
La seconde approche repose sur la confrontation d'une offre – des indicateurs de gouvernance des AMP proposés par l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) – et d'une demande des gestionnaires d'AMP participant au projet PAMPA. En évaluant la pertinence des indicateurs qui leur sont proposés, puis en construisant de nouveaux indicateurs qu'ils jugent mieux correspondre à leur quotidien, les gestionnaires précisent la notion de gouvernance (cf. fig. 2). Au total 66 métriques ont été renseignées et discutées. Afin de réduire ce nombre, il a été demandé à chaque gestionnaire participant au projet PAMPA de retenir un jeu de 10 métriques prioritaires. **Ce processus de sélection progressive a permis de retenir 19 métriques, qui ont été intégrées à un tableau de bord d'indicateurs commun à toutes les AMP.**

Contact (ESPACE-DEV) :
G. David, gilbert.david@ird.fr

* Projet PAMPA - Indicateurs de la performance d'AMP pour la gestion des écosystèmes côtiers, des ressources et de leurs usages



▲ Fig. 1. Processus de co-construction des indicateurs de gouvernance par l'exploration collective de la notion de gouvernance. © G. David



▲ Fig. 2. Processus de co-construction des indicateurs de gouvernance par la confrontation d'une offre et d'une demande. © G. David

Énergies marines

Les énergies marines en Méditerranée, enjeux et perspectives

La France a été lente à concevoir et mettre en œuvre des projets d'énergies marines renouvelables (EMR) alors que l'éolien en mer et l'hydrolien sont déjà opérationnels à l'étranger. La France dispose pourtant d'un fort potentiel de développement pour les EMR, compte tenu des atouts naturels de ses nombreuses côtes métropolitaines et Outre-mer*.

Dès la fin du siècle dernier, de nombreuses études montrent la nécessité de passer d'une économie fondée sur le pétrole, abondant et bon marché, vers une économie durable fondée sur des énergies renouvelables. Depuis, deux éléments ont renforcé cette idée :

- la démonstration scientifique que le réchauffement global de l'atmosphère terrestre est dû en majorité aux activités humaines et que l'effet de serre s'accélère ;
- les technologies d'énergie renouvelable, notamment en mer, constituent une voie crédible pour la transition vers une économie décarbonée et sans résidus polluants.

Même si les États et les organisations internationales fixent assez vite des objectifs ambitieux (comme atteindre 20 % de l'énergie totale consommée via l'exploitation d'énergies renouvelables en 2020), l'inertie du système énergétique national, voire mondial, le maintien à bas prix du gaz et du pétrole et l'action de lobbys divers, freinent le développement des énergies renouvelables. Cela est renforcé dans le domaine marin par le manque de technologies matures, hormis l'éolien, par les surcoûts liés à l'éloignement au large et les contraintes naturelles, et par les multiples recours déposés par les riverains contre de tels projets. Cependant, dès les années 2000, plusieurs acteurs (entreprises, bureaux d'études, instituts de recherche, universités) investissent des moyens croissants dans ce secteur, avec l'appui des États et, surtout, des collectivités territoriales intéressées par ces

sources d'énergie décentralisées. De nombreux prototypes sont testés avec des technologies diverses et originales (plus de 100 aujourd'hui). C'est en 2010 que la France lance un premier appel d'offres pour l'éolien marin à hauteur de 3 GW, qui sera suivi d'une série d'autres. Le lancement de quatre projets de fermes pilotes d'éoliennes flottantes en 2015 (trois en Méditerranée dont deux en Occitanie) marque une nouvelle étape.

En Méditerranée française, l'éolien en mer apparaît comme la première EMR d'importance, en particulier sur support flottant, car, en dehors des zones très côtières, les profondeurs d'eau sont élevées (50 à 100 m). Le golfe du Lion constitue une zone d'excellence car les vents sont fréquents, forts et soutenus, ce qui permet aux éoliennes en mer de produire de l'électricité 50 % du temps, soit deux fois plus longtemps que l'éolien terrestre. L'Occitanie, dont l'ambition est d'être « à énergie positive d'ici 2050 », est motivée pour accueillir des parcs éoliens flottants. Des aménagements importants sont en cours, dont l'extension de Port-la-Nouvelle. Par ailleurs, les ingénieries françaises, très innovantes en matière de flotteurs et d'ancrages, exportent leur savoir-faire dans le monde entier (80 % du chiffre d'affaires français du secteur en 2017). D'autres sites méditerranéens apparaissent adaptés à l'exploitation de l'éolien : la côte sud de l'Italie, la mer Égée pour la Grèce et la côte ouest de Turquie. Dans le monde, une quarantaine de projets sont à l'étude, certains sont en cours de réalisation, notamment au Portugal, mais aussi en mer du Nord, en Corée du Sud, aux États-Unis d'Amérique, etc.

L'État français, sous l'autorité de la Direction Inter Régionale de la Mer Méditerranée, a conduit une concertation dans le cadre de la Planification spatiale marine pour les futures zones dans lesquelles les fermes commerciales

d'éoliennes flottantes, pourraient être implantées, notamment au regard des autres activités des zones concernées (pêche...) et des impacts potentiels sur la faune sauvage. **Cette concertation a abouti à l'identification de quatre macro-zones, d'une superficie globale de 3 300 km² dans le golfe du Lion.** Les futurs parcs commerciaux issus des appels d'offres y seront localisés. La filière éolienne propose de développer 4-6 parcs de 500 MW, à partir de 2025, dans celles-ci. Les parcs éoliens engendrent de nouveaux écosystèmes liés à la présence de lignes d'ancrage, de flotteurs, etc., qui créent de nouveaux habitats et sont exposés à une forte colonisation biologique. Aussi, le réseau de transport d'électricité pourrait héberger des observatoires permanents sur les écosystèmes (mesures de paramètres physiques et biologiques), en particulier ceux liés à la présence des éoliennes.

Les autres formes d'énergie marine sont à plus long terme ou bien adaptées à des sites spécifiques. Ainsi, la thalassothermie représente une forme d'énergie intéressante pour la Méditerranée en récupérant l'énergie calorifique en mer pour alimenter l'habitat côtier en chaleur et en froid. Cette technologie, testée avec succès en Polynésie, reste encore peu répandue sauf à Monaco et à Marseille. Elle se diffusera sans doute dans le cadre de nouveaux aménagements urbains. Le pôle de compétitivité dédié, le Pôle Mer Méditerranée, a inscrit dans son programme les énergies marines comme l'un de ses six domaines d'actions stratégiques.

Contacts : P. Marin (Pôle Mer Méditerranée), marin@polemermediterranee.com,
G. Herrouin (Pôle Mer Méditerranée), herrouin@polemermediterranee.com
et D. Lacroix (Ifremer), denis.lacroix@ifremer.fr

* Cf. Paillard M., D. Lacroix et V. Lamblin (coord.), 2009. Énergies renouvelables marines : étude prospective à l'horizon 2030. Éditions QUAE. 336 p. Versions en français et en anglais.

L'éolien flottant est l'énergie marine potentielle par excellence en Méditerranée
mais il reste à le mettre en œuvre et à le développer à l'échelle des attentes.

É

valuer le potentiel de nos énergies marines

Les travaux de l'équipe LEMON (*Littoral, Environment: Models and Numerics*), installée à l'antenne de Montpellier du centre Sophia Antipolis-Méditerranée de l'Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique), permettent d'évaluer le potentiel de production en énergies marines à différentes échelles. Il s'agit d'une part de concevoir des modèles à haute résolution pour la zone littorale et, d'autre part, de calculer l'interaction des courants et des hydroliennes afin d'optimiser le positionnement de ces dernières. L'un des verrous majeurs des modèles à haute résolution réside dans le couplage d'équations représentant des comportements physiques distincts. En effet, s'il est indispensable d'utiliser des modèles très précis dans la zone dans laquelle les hydroliennes seront positionnées, il est également nécessaire (pour des raisons de coûts de calcul) d'utiliser des modèles moins précis (avec une résolution moindre) lorsque l'on s'éloigne de la côte. Dès lors, il faut mettre en place des stratégies de couplage entre ces modèles hauturiers et côtiers, dont les natures physiques et mathématiques sont très différentes !

Pour comprendre l'interaction des courants côtiers avec les hydroliennes, on utilise des modèles qui prennent en compte la turbulence générée par la rotation des pales des turbines.

Les modèles développés par l'équipe LEMON et leurs collaborateurs** font appel à un mélange de techniques déterministes et aléatoires, qui permettent non seulement de quantifier les prévisions de

production, mais également d'encadrer ces prédictions par des barres d'erreurs qui sont essentielles pour garantir un minimum de production d'énergie.

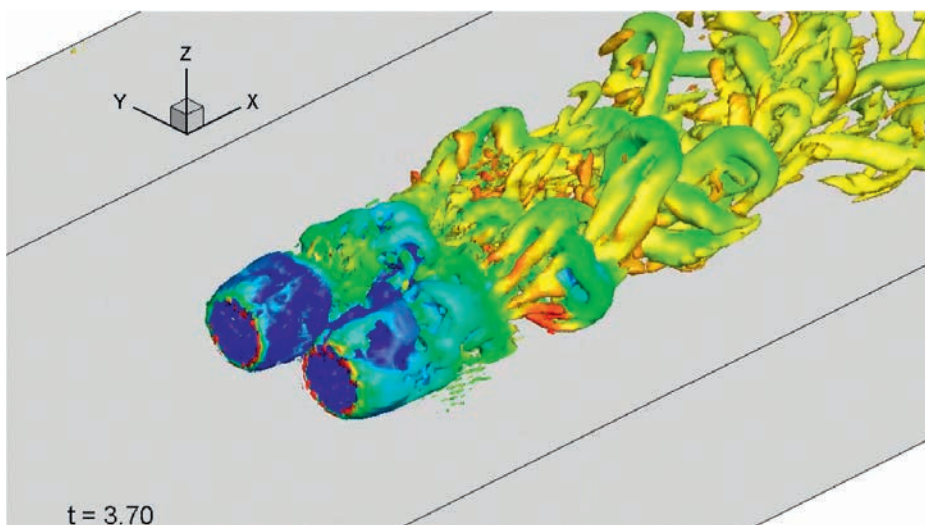
** Collaborateurs : équipe TOSCA (Simuler et calibrer des modèles stochastiques, Inria, Sophia Antipolis) et l'Université Catholique de Santiago (Chili).

Contact (équipe LEMON, Inria) : A. Rousseau, antoine.rousseau@inria.fr

* Plus d'informations : Équipe LEMON (Inria) : <http://team.inria.fr/lemon>

Meric : <http://meric.cl>

Projet SDM (Stochastic Downscaling Method) : <http://sdm.gforge.inria.fr/>



▲ Turbulence produite par la rotation des pales de deux hydroliennes.

© C. Escauriaza/PUC Santiago & MERIC

TIDEA, IDENTIFICATION DES ZONES PROPICES AU DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE

NOVELTIS a mis en place un service innovant baptisé TideA (*Tidal Energy Assessment*). Il s'agit du premier outil au monde à fournir de la donnée marémotrice sur les côtes mondiales. TideA est donc une nouvelle plateforme destinée aux acteurs des énergies marines renouvelables afin d'identifier les zones propices au développement et à l'installation de dispositifs exploitant l'énergie hydrolienne. Le service TideA est un véritable outil de décision pour identifier les sites les plus propices au développement de l'énergie hydrolienne et également pour caractériser en détail la ressource des différents sites d'intérêt à travers la fourniture d'indicateurs pertinents calculés par NOVELTIS et validés à l'aide des produits (données *in situ*, données altimétriques) fournis par le *Copernicus Marine Environment*

Monitoring Service (CMEMS*). TideA est un outil international qui cartographie l'ensemble des régions côtières mondiales et qui offre des données jusqu'à 100 mètres de profondeur. Pour chaque site sélectionné, le service fournit des informations sur les vitesses maximales de courant, le potentiel énergétique de la zone et des indicateurs d'occurrence de seuils de vitesse.

Contact (NOVELTIS) : R. Bru, richard.bru@noveltis.fr

Plus d'informations : www.tidea.io/tidal_energy

* www.marine.copernicus.eu

EolMed, projet pilote d'éoliennes flottantes en Méditerranée

EolMed* est un projet éolien offshore flottant d'une puissance de 24,6 MW situé sur le littoral languedocien, au large de Gruissan (Aude), à plus de 18 km des côtes. Il consiste en un projet pilote qui porte une innovation technologique unique en Europe, se caractérisant par l'installation d'éoliennes en pleine mer qui ont la particularité d'être montées sur des structures flottantes en béton. Ces machines permettront de produire de l'électricité grâce à l'énergie cinétique du vent, ressource naturelle régulière et très abondante en pleine mer (mise en service prévue en 2021). EolMed est issu d'un consortium composé de Quadran Énergies Marines, qui assure le développement, l'exploitation et la maintenance des installations, d'IDEOL et de Bouygues TP qui assurent l'ingénierie, la construction et la mise en place des installations ainsi que de Senvion qui fournit les turbines d'une puissance de 6,15MW. Par ailleurs, dès le début du projet, Quadran Énergies Marines a mobilisé entreprises et laboratoires de recherche présents en Occitanie. De nombreuses pistes d'actions et de réflexions ont suivi ces rapprochements notamment sur les co-usages qui pourraient être faits au sein des zones de concessions et sur la digitalisation de la concertation menée dans le cadre de ce projet avec les riverains, pêcheurs

et tous ceux concernés par l'installation du parc. Le programme de recherche **E-Débat** vise à créer de nouveaux outils numériques à destination du grand public afin que celui-ci puisse interagir avec les grands projets, appréhender les principaux enjeux concernant l'installation d'éoliennes et participer à la concertation au travers d'un site internet. Aussi, une plateforme numérique mise en ligne en septembre 2017, permet d'horodater l'ensemble des échanges et de suivre les évolutions du projet qui ont tenu compte des avis exprimés. E-Débat est un programme de recherche collaboratif (cofinancement Région Occitanie et FEDER/ Fonds européen de développement régional) qui rassemble des scientifiques (UMPV au travers du CEFE) et des acteurs privés (entreprise Intactile Design et Quadran Énergies Marines).

Contact (Quadran Énergies Marines) :
L. Tokarski, l.tokarski@quadran-marines.com

Plus d'informations : www.eolmed.fr
Plateforme E-Débat : <https://eolmed.edebat.fr/>

* EolMed est l'un des quatre projets retenus dans le cadre de l'Appel d'Offres « Fermes pilotes éoliennes flottantes » lancé par l'ADEME en 2015.



▲ Représentation (image de synthèse) d'une éolienne flottante sur une plateforme semi-submersible. © Quadran Énergies Marines

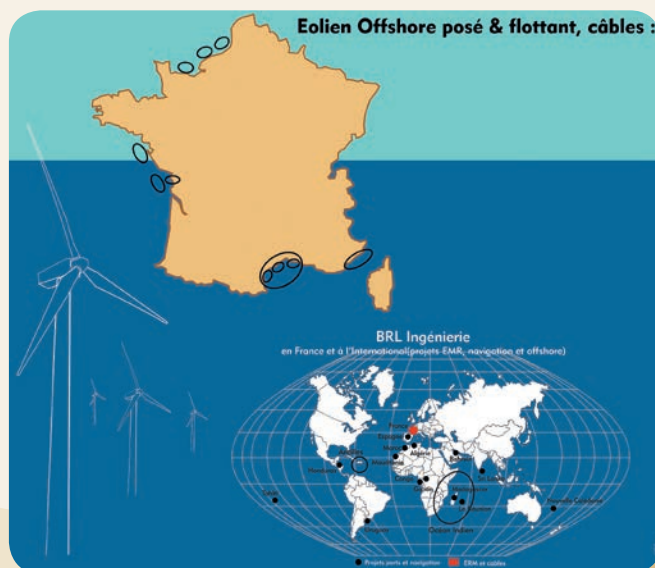
BRLI EN APPUI DU PROJET « ÉOLIENNES FLOTTANTES DU GOLFE DU LION »

Membre du Parlement de la Mer de la Région Occitanie (cf. p. 128), le Groupe BRL est spécialisé dans les domaines de l'eau, de l'environnement et de l'aménagement. Sa filiale BRL Ingénierie (BRLI), société de conseil en France et à l'International, membre du pôle de compétitivité Mer Méditerranée, s'implique, depuis les années 2000, dans le développement des énergies marines renouvelables. En Occitanie, BRLI accompagne le projet des « Éoliennes flottantes du golfe du Lion » porté par ENGIE Green, EDP Renewables, le Groupe « Caisse des Dépôts » et RTE (Réseau de transport d'électricité). Ses experts ont réalisé, dans un délai réduit (14 mois), en lien étroit avec les principaux acteurs du territoire (pêcheurs, Parc naturel marin du golfe du Lion, services de l'État, etc.), les études environnementales et réglementaires du projet, comprenant notamment des campagnes sous-marines, des observations par bateau et avion, et des enquêtes sociales. Cette ferme pilote, installée au large de Leucate et de Barcarès, prévoit le déploiement de quatre éoliennes marines de 6 MW chacune, sur des flotteurs en acier, amarrés à 80 m de profondeur. En Méditerranée, BRLI a également accompagné le projet « Provence Grand Large », au large du golfe de Fos, sur la zone de Faraman (trois éoliennes d'une puissance de 8 MW chacune).

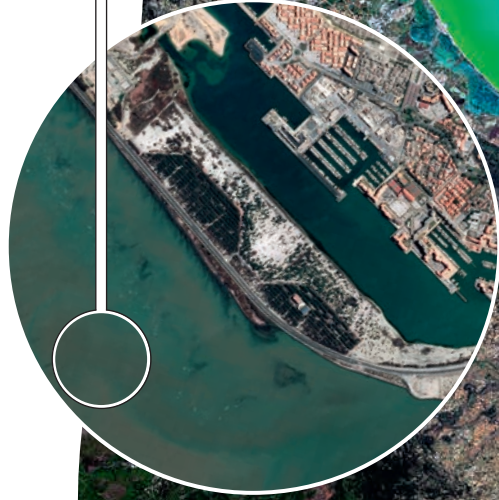
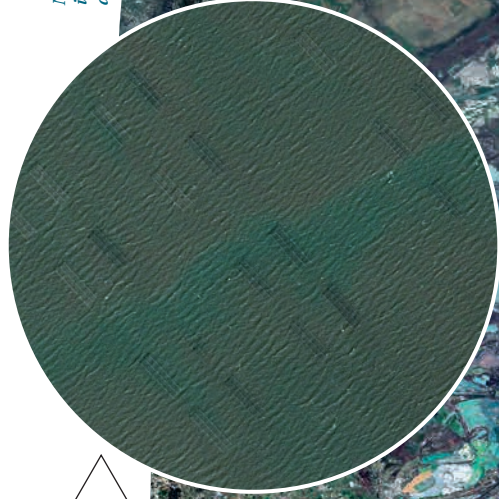
Ces deux projets sont caractérisés par de très forts enjeux environnementaux (zones Natura 2000, réserves naturelles) ainsi que par la présence d'usages socio-économiques importants (zones portuaires, tourisme littoral, pêche professionnelle et de loisir, etc.). Face à ces enjeux complexes, BRLI, qui possède de nombreuses références dans la Manche et sur l'Atlantique (parcs offshore de

Fécamp, Dieppe-Le Tréport, Yeu-Noirmoutier, Courseulles-sur-Mer, etc.) apporte l'ensemble de son expertise en matière d'études d'impact environnemental de projets littoraux, maritimes ou portuaires pour accompagner l'émergence de ces projets ambitieux.

Contact (BRL Ingénierie) : N. Fraysse, dc.brli@brl.fr



▲ © BRU/GL



En utilisant pas moins de trois capteurs embarqués sur des vecteurs différents, cet exemple illustre la puissance de l'observation de l'environnement assistée par satellite dans les trois dimensions, spectrale, spatiale et temporelle :

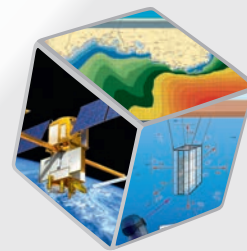
- La concentration marine en chlorophylle-a de surface (indicateur de production primaire) est calculée à partir des données hyperspectrales du satellite américain NOAA20 ; le calcul a été fait aussi dans les étangs de Thau et de Berre pour caractériser la densité en matière en suspension ou le développement d'algues entraînant la « malalgie » ; la zone émergée résulte d'un traitement des données multispectrales des satellites SPOT6/7 pour cartographier l'urbain, les cultures, les forêts...
- Le capteur de NOAA20 a une résolution spatiale de 750m suffisante en général pour caractériser les phénomènes océanographiques qu'il observe à chaque passage d'une fauchée de 3000 km ; SPOT6/7, satellites privés (Groupe Airbus), offrent des images de 60km*60km avec une résolution comprise entre 6m et 1,50m ; enfin les satellites Pléiades, des agences spatiales française, suédoise, belge, espagnole et autrichienne, sur une trace au sol de 20km améliorent encore la résolution jusqu'à 50cm ; les infrastructures portuaires et les tables à huitres deviennent alors observables.
- Les données NOAA sont journalières et disponibles en temps quasi réel (ici celles du 15 août 2018) ; celles de SPOT6/7 sont issues de la mosaïque de la couverture nationale de 2015 réalisée annuellement par GEOSUD ; l'image Pléiade est de 2014.

Cet exemple illustre aussi comment les techniques de big data peuvent entrer en jeu pour donner du sens à toutes les relations existantes entre ces données.

Traitements réalisés par Eric Bappel et Michel Petit.



La force de l'observation pérenne, la synergie de l'intégration numérique



20 septembre 2042. En pleine mer comme à terre, le temps est exécrable : c'est le troisième épisode cévenole de la saison, plus intense encore que les précédents. « Le troisième, déjà », se dit le capitaine de pêche du *Lo Lugran*, alors qu'il entrerait dans la voie maritime sécurisée. « De plus en plus de monde sur la VM9... », pensa-t-il en jetant un œil sur les écrans de contrôle, reflet d'un trafic qui n'avait cessé de s'intensifier depuis 20 ans, avec la mise en place des navires de nouvelle génération pour le transport des marchandises et des voyageurs, sans compter ceux de la surveillance internationale hauturière et littorale. Pendant tout l'été, les overboats de sa compagnie avaient fait un excellent travail en conduisant, dans la limite des quotas autorisés, les bancs de poissons pélagiques dans les cages de pêches réglementaires qu'il devait transborder avant le passage à la Criée Numérique Permanente. Ces unités-robots autonomes recevaient la position réelle ou hautement probable des bancs, calculée par un algorithme élaboré de type deep learning, à partir des diverses données environnementales d'observation directe in situ ou de télédétection aérospatiale. Lorsqu'elles avaient agrégé suffisamment de poissons, ces unités emmenaient lentement les bancs vers les cages selon une route calculée par leur système-bord pour optimiser la dépense énergétique et respecter les conditions de vie euphoriques des poissons. Les quotas étaient estimés chaque semaine par les modèles de dynamique de population qui avaient été complètement révolutionnés depuis l'intégration des données d'ADN environnemental captées par de nombreux gliders et overboats.

Même si la visibilité est vraiment limitée et la mer bien formée, le capitaine, tout en mesurant combien son métier avait changé depuis ses débuts, n'est pas vraiment inquiet : conformément aux accords gouvernementaux, tous les bateaux sont désormais interconnectés, s'échangent en temps réel leurs paramètres de déplacement comme d'état et disposent chacun d'un système autonome d'analyse de situation de l'environnement anthropique et océano-météo. Ce système, bijou des toutes dernières technologies numériques, est le véritable pilote du *Lo Lugran* en garantissant toute collision impossible. Qui aurait pu alors imaginer une cyber-attaque sans précédent des systèmes et ses conséquences ?

Chacun peut terminer, avec optimisme ou pessimisme, ce récit futuriste... Néanmoins, ce qui reste tout à fait factuel, c'est qu'actuellement, nous sommes bel et bien au cœur d'une évolution profonde des connaissances, des outils d'investigation qui y sont liés, des modèles descriptifs comme prédictifs et donc des métiers, ceci quelque soit le domaine abordé. La cause première et majeure de cette évolution est synchrone avec l'apparition du nouveau paradigme mathématique, le *big data*. Ce paradigme lui-même – le quatrième, selon T. Hey, dans l'histoire des sciences – ne peut être efficient sans la mise au point d'algorithmes mathématiques, en particulier la statistique bayésienne (*machine learning*...) mais aussi la topologie, les probabilités (chaîne de Markov...), l'algèbre linéaire (calcul des valeurs singulières...), l'analyse (décomposition par ondelettes...). Ces algorithmes doivent « par eux-mêmes » trouver des liens dans une masse énorme de données. C'est à l'expert d'évaluer leur pertinence mais sans pour autant se fonder sur une théorie, ce qui est la nouveauté d'une telle démarche.

Pour converger, dans un délai raisonnable, vers des solutions aux problèmes posés, le support informatique nécessaire à cette manipulation de données – e.g. de type *MapReduce* – passe par le calcul parallèle sur plusieurs ordinateurs (d'une dizaine à plus de 100 000) en attendant l'ordinateur quantique, actuellement en phase prototype. En bref, **c'est donc bien l'arrivée synchrone de cette technologie croisée intelligence algorithmique / calculateur quantique qui est la clé de cette révolution numérique, impactant évidemment les**

sciences de la mer : océanologie, météorologie, halieutique, écologie marine, géomorphologie côtière, géographie physique et humaine... Cette transition entre modèles classiques et *big data* ouvre des perspectives sans précédent et amorce une probable série de « sauts » en science, technologie, innovation et aussi en termes de métier. Ce contexte, encore une fois tout à fait factuel, est connu et, au-delà des sempiternelles logorrhées entre surestimation et déshumanisation de la nouveauté, la prise de conscience sur l'absolue nécessité d'anticiper ce processus évolutif est de plus en plus forte chez les décideurs : gagneront ceux qui sauront l'anticiper et le maîtriser en science, enseignement, imagination /création (applications) et innovation.

Qui dit *big data* dit données. L'étape initiale est donc bien la structuration des données et, dans le domaine qui nous intéresse, il s'agit de données d'environnement physique, chimique et biologique mais aussi d'activités anthropiques. Comme les pages qui suivent le montrent, la région Occitanie comporte déjà des structures, de réputation internationale, de traitement et d'archivage et de diffusion de données (1) historiques comme acquises en flux continu et (2) *in situ via* les observatoires (OSU et OSH) ou télédétections, notamment par les satellites d'observation de la Terre (CNES, GEOSUD...). Ces satellites portent les outils (capteurs) les plus puissants pour observer de vastes zones maritimes avec la meilleure résolution spatiale, temporelle et spectrale, et alimenter les modèles de calcul des courants, de la température de l'eau, de sa salinité, de la houle, du vent, de la teneur en phytoplancton mais aussi en polluant, d'érosion côtière et, d'une façon générale, de la détection de changement entre deux dates. À Toulouse, depuis plus de 25 ans, la filière océanographie spatiale est particulièrement dynamique et concentre des laboratoires de recherches, des leaders industriels de l'aérospatial, incitant les opérateurs nationaux et internationaux (CNES, ESA, NASA, JAXA, CNSA, ASI) à développer, de la conception à l'opérationnel, de très nombreux systèmes spatiaux d'observation de la Terre (SMOS, SWOT, CFOSAT, AEOLUS, PLEIADE, COSMOSKYMED...). De façon complémentaire, les structures de recherche en Languedoc-Roussillon disposent à la fois de jeux de données de terrain et de l'expertise indispensables à la validation des capteurs aérospatiaux, en particulier pour la Méditerranée et son littoral.

L'un des enjeux majeurs est maintenant de structurer l'accès aux bases de données et les échanges entre acteurs publics et privés. L'une des réponses pourra être l'initiative Occitanie Data en cours de constitution. Un premier défi corollaire est l'adaptation de l'enseignement à la demande urgente en nouveaux métiers : à titre d'exemple, celui de *data-analyst*, capable de comprendre et les systèmes informatiques et les algorithmes intelligents qu'il doit régler pour faire dialoguer les données, tout en ayant une vraie expertise du domaine où il évolue. En 2013 déjà, aux États-Unis, le déficit probable à l'horizon 2020 de ce type de métier était estimé à plus de deux millions d'emplois, dont un pourcentage conséquent pour notre domaine d'intérêt...

Autre défi corollaire, côté entreprises, c'est la prise de risques dans le dépôt de brevets : comment ne pas s'étonner que **47 % des brevets mondiaux associés à des séquences génétiques d'origine marine soient détenus par un seul groupe privé allemand***...

Dans ce chapitre, au travers d'exemples concrets, les équipes de recherche publiques et privées ont simplement tenté d'éclairer les atouts de la région Occitanie dans cette nouvelle-donne en cours.

Michel Petit (Agropolis International)

* BASF : Badische Anilin- & Soda-Fabrik

Observatoires et données in situ

Les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) : des missions spécifiques

Les OSU ont été créés par décret en 1985. Statutairement, un représentant de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU) du CNRS et un de la Région dans laquelle se situe l'OSU siègent au conseil. La plupart des OSU sont aussi des écoles internes de leurs universités de rattachement. Tous les OSU ont pour missions d'effectuer des activités de recherche au plus haut niveau, de contribuer à la formation ainsi qu'à la diffusion des connaissances et de développer des activités

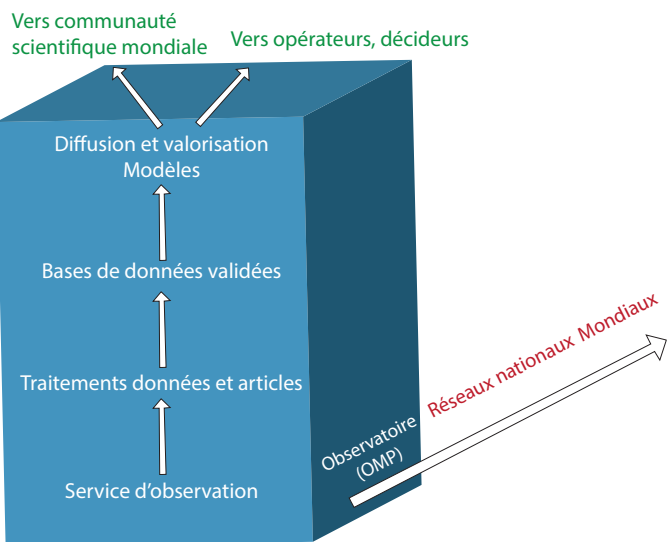
de coopération internationale. Chaque OSU a des responsabilités précises concernant l'acquisition, l'archivage et le stockage de données d'observation, l'élaboration d'outils et de modèles théoriques et la diffusion de ces résultats aux communautés nationale et internationale. Ces « services d'observation » couvrent les domaines de l'astronomie, la géophysique et, plus récemment, les surfaces continentales et l'océanographie/aérodologie, afin de mieux connaître la planète Terre et l'Univers.

200 personnes réparties au sein d'une unité mixte de service (UMS) et de six UMR*. Si le centre de gravité géographique se situe dans la métropole toulousaine, l'OMP est aussi présent en région (Tarbes, Lannemezan, Auch et Foix) sans oublier l'implantation emblématique au Pic du Midi de Bigorre. L'OMP contribue à 58 services d'observation labellisés INSU, dont 32 en tant que coordonnateur. Ces services couvrent toutes les disciplines de l'INSU. Par ailleurs, l'OMP est de plus en plus impliqué dans plusieurs « zones ateliers » labélisées par l'Institut Écologie et Environnement (InEE) du CNRS, complétant sa couverture thématique dans le domaine de l'environnement et son implantation géographique en Occitanie. Les services d'observation dont l'OMP a la responsabilité sont souvent la déclinaison locale d'initiatives nationales, voire internationales. Dans ce cadre, l'observatoire assure la collecte des données, leur validation scientifique, leur valorisation ainsi que leur mise à disposition auprès de la communauté scientifique mais aussi des opérateurs et des décideurs (cf. schéma).

Créé en 1985, l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) est un des premiers OSU. Depuis, sous les tutelles de l'Université de Toulouse III, du CNRS, du CNES, de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et de Météo-France, l'OMP connaît une croissance régulière, avec aujourd'hui près de

Contacts : M. Toplis (OMP), michael.toplis@irap.omp.eu, C. Jeandel (LEGOS), catherine.jeandel@legos.obs-mip.fr et G. Boulet (CESBIO), gilles.boulet@ird.fr

* Dont les UMR CESBIO, GET, LA et LEGOS.



▲ Fonctionnement d'un service d'observation labellisé.
© C. Jeandel et M. Toplis

LE SNO DYNALIT : UN RÉSEAU D'OBSERVATION SUR L'ÉVOLUTION DU LITTORAL

Les acteurs nationaux de la recherche sont fédérés autour de grands programmes de suivi comme le Service national d'observation « Dynamique du littoral et du trait de côte » du CNRS (SNO DYNALIT). Au niveau de la région Occitanie, ces tâches d'observation sont réalisées par l'OSU OMP et par l'OSU OREME (cf. p. 88) et son système d'observation « Littoral Trait de côte » (SO LTC) regroupant les équipes de recherche dédiées à la dynamique littorale de plusieurs structures de recherche affiliées aux universités de Toulouse, Perpignan, Montpellier, Aix-Marseille, Toulon et Grenoble.

Le SNO DYNALIT a pour but de constituer une base de données hydromorphologiques sur le long terme de 30 sites ateliers représentatifs des environnements littoraux français (côtes sableuses, falaises et estuaires). La méthodologie consiste à réaliser de façon pérenne des mesures de l'évolution du trait de côte en mettant en œuvre des techniques modernes et en harmonisant les stratégies d'acquisition de données entre les laboratoires des trois façades maritimes françaises (plus de 120 personnes). Plus concrètement, le SNO DYNALIT combine ses observations avec des données de forçages météo-océanographiques. La dynamique des plages sableuses, par exemple, est suivie deux fois par an avec un levé topographique de la plage et du trait de côte avant et après chaque période hivernale afin de déterminer l'impact de

ces périodes énergétiques sur les évolutions du rivage au fil des années.

Contacts : R. Certain (CEFREM), certain@univ-perp.fr et R. Almar (LEGOS), rafaal.almar@ird.fr

Plus d'informations : www.dynalit.fr

► Suivi de l'érosion de la plage par photogrammétrie (stéréo drone). © Rafaël Almar



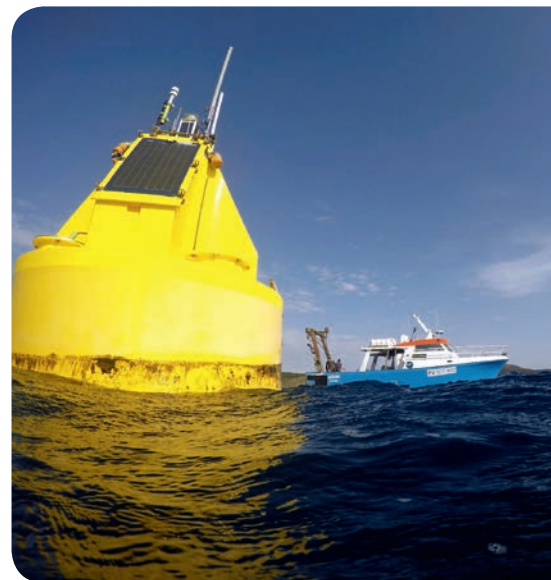
L'Observatoire Océanologique de Banyuls (OOB) : une longue tradition de recherche, de formation et d'observation

L'OOB, créé en 1882, regroupe quatre laboratoires de recherche et plusieurs services et plateformes scientifiques ouverts à la communauté scientifique. Les chercheurs y mènent des études intégrées dans les domaines de l'océanographie, des biotechnologies ainsi que de l'écologie et de la biologie marine, essentiellement sur la Méditerranée nord-occidentale. Depuis sa création, l'Observatoire épie, ausculte et enregistre sans relâche l'environnement continental (massif des Albères) et surtout marin (golfe du Lion) par l'intermédiaire du BOSS (*Banyuls Observation Sea Service*) responsable de cette mission. **Les séries de données, acquises à une fréquence hebdomadaire depuis plus de 20 ans, constituent l'une des bases les plus longues et les plus complètes disponibles en Méditerranée, dont l'originalité repose sur le fait d'échantillonner un gradient côte-large unique en sortie du golfe du Lion sous influence des apports continentaux et de la circulation générale** (cf. schéma). Dans le

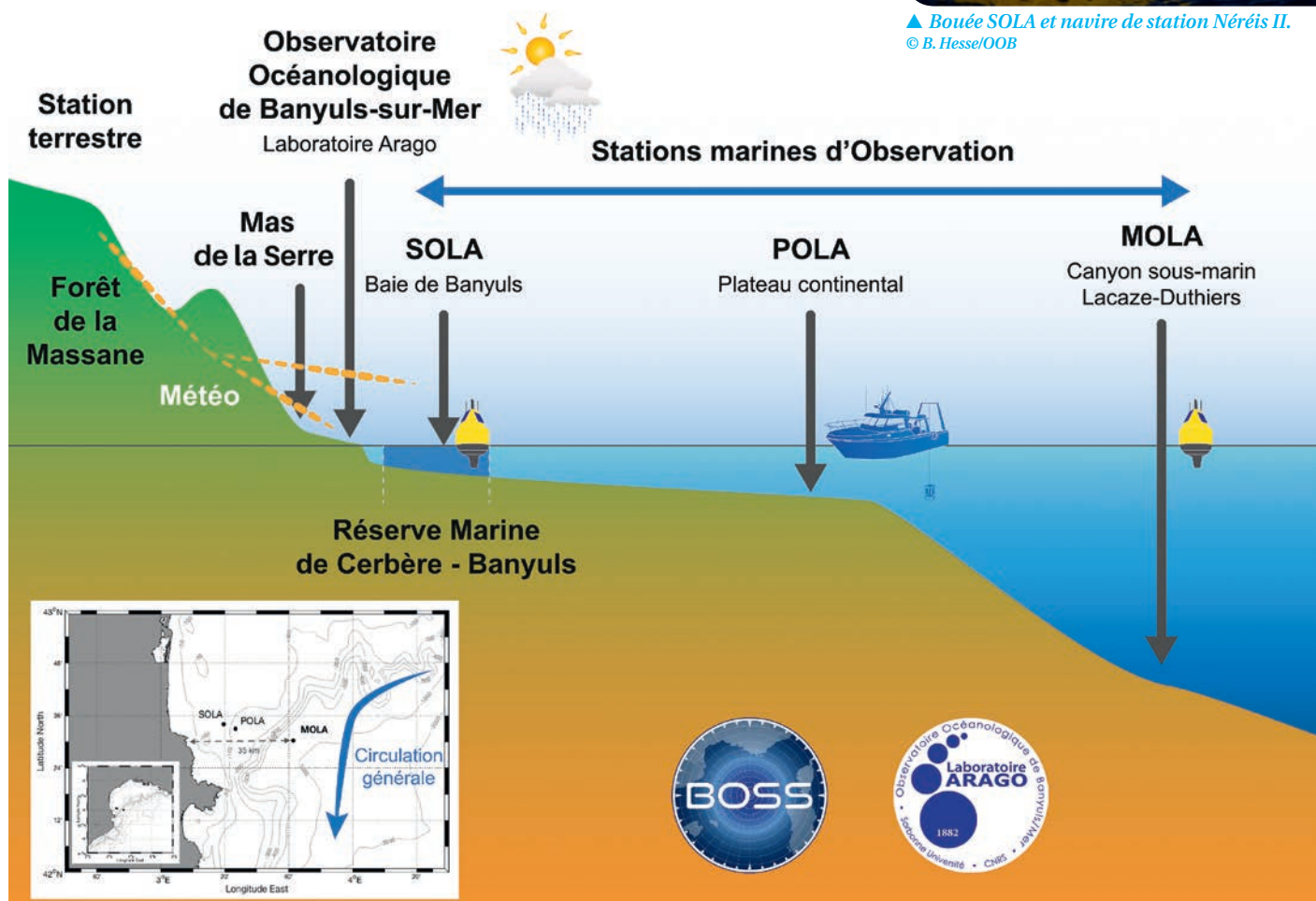
contexte d'impact du changement climatique et pour répondre aux nouvelles exigences scientifiques, le BOSS développe et déploie depuis près de 10 ans des bouées multi-instrumentées de mesure à haute fréquence. L'offre de service à la mer va prochainement s'enrichir d'une plateforme sous-marine câblée pour le développement technologique dans le cadre du projet REMIMED (cf. page suivante). L'observation terrestre n'est pas en reste avec un suivi météo depuis 1960, un observatoire de 50 000 arbres initié en 1998 et des suivis à long terme d'indicateurs (oiseaux, libellules, amphibiens, plantes...). L'OOB intervient aussi dans la formation des étudiants de Sorbonne Université et d'autres universités partenaires en France et en Europe. Enfin, via Biodiversarium, qui comprend un jardin méditerranéen, un aquarium public et un laboratoire pédagogique, l'OOB est largement ouvert au grand public qui peut découvrir la biodiversité exceptionnelle du site ainsi que les recherches qui y sont menées (cf. p. 118).

Contacts : P. Conan (LOMIC), pascal.conan@obs-banyuls.fr, R. Vuillemin, (Service BOSS et Moyens à la Mer/OOB), renaud.vuillemin@obs-banyuls.fr et V. Laudet, (OOB/BIOM), directeur@obs-banyuls.fr

Plus d'informations :
BOSS : <http://sooob.obs-banyuls.fr/fr/index.html>
<https://twitter.com/banyulsbaybuoy>



▲ Bouée SOLA et navire de station Néréis II.
© B. Hesse/OOB



▲ Les sites d'observation du laboratoire Arago depuis le continent et la forêt de la Massane jusqu'aux stations instrumentées du golfe du Lion. La carte en encart indique la position géographique des stations suivies en mer : SOLA (Site d'Observation du Laboratoire Arago), POLA (Plateau Observatoire Laboratoire Arago) et MOLA (Microbial Observatory Laboratoire Arago). © P. Conan & V. Domien

LA PLATEFORME D'OBSERVATION SOUS-MARINE REMIMED POUR UNE OFFRE UNIQUE DE SERVICES SUR LE LITTORAL MÉDITERRANÉEN

Le projet REMIMED (Réseau marin instrumenté en Méditerranée) prévoit de développer un site pilote d'observation câblé sous-marin en baie de Banyuls sur des fonds de 20 à 27 m sur le site SOLA, point d'observation historique de l'OOB (cf. page précédente). L'infrastructure sera idéalement située dans le Parc naturel marin du golfe du Lion et à proximité de la Réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls. La plateforme technologique proposée comprendra le réseau sous-marin câblé à construire, les bouées multi-instrumentées de l'OOB déjà développées et les moyens à la mer disponibles sur la station pour une offre de services complète et unique sur le littoral méditerranéen. Outre son intérêt pour l'observation et la surveillance opérationnelle de la côte, cette infrastructure facile d'accès sera également une plateforme à la disposition des scientifiques, de l'enseignement, des industriels désireux de fiabiliser leurs développements instrumentaux par des essais *in situ* mais aussi des collectivités pour des opérations de médiation et de communication. La plateforme REMIMED ambitionne de déployer sur son infrastructure de nouveaux capteurs innovants dotés de techniques de mesure émergentes. La plateforme se doit d'être un élément moteur du développement industriel dans le domaine de la surveillance environnementale que ce soit pour les entreprises de R&D du secteur des capteurs et systèmes de mesure mais aussi pour les entreprises de traitement de données. Il n'existe aucune plateforme comparable en Occitanie comprenant à la fois les moyens de travail et de déploiement en mer d'instruments en plus des vecteurs automatisés d'accueil. REMIMED, dans la continuité du savoir-faire de l'OOB sur l'archivage, la gestion et la mise à disposition de données, offrira à la plateforme une véritable structure de type technologie *Big Data* ouverte à une large communauté.



Contacts : R. Vuillemin (OOB), renaud.vuillemin@obs-banyuls.fr,
M. Groc (OOB), michel.groc@obs-banyuls.fr
et P. Conan (LOMIC), pascal.conan@obs-banyuls.fr

Plus d'informations : www.obs-banyuls.fr/remimed

L'OBSERVATOIRE DE RECHERCHE MÉDITERRANÉEN DE L'ENVIRONNEMENT

L'Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement (OREME) est un OSU dédié à l'étude des aléas et de la vulnérabilité des milieux méditerranéens en particulier. À travers les moyens proposés par la Station Marine de l'UM à Sète et la plateforme MEDIMEER (*MEDIterranean platform for Marine Ecosystem Experimental Research*), l'OSU OREME offre aux laboratoires régionaux, nationaux et internationaux :

- Les capacités pérennes d'observer en continu sur du long terme les variables environnementales (physico-chimiques et biologiques) des milieux marins côtiers du littoral languedocien (lagune de Thau et avant-côte sétoise), afin de mettre en relation ces différentes variables avec les changements locaux et globaux ou avec des épisodes de crise (crues, tempêtes, sécheresses, etc.). Actuellement, deux tâches d'observation de l'OSU OREME (Suivi-Thau et Communautés planctoniques de Thau, réalisées sur la lagune de Thau) ainsi que le service national d'observation en milieu littoral (SOMLIT-Sète), dont la station de mesure se situe sur le plateau continental du golfe du Lion au large de Sète, utilisent les facilités techniques et logistiques (moyen à la mer, parc instrumental et plateau analytique) de la Station marine de Sète et de la plateforme MEDIMEER.

- Un accès à une large gamme de dispositifs expérimentaux (notamment des mésocosmes* *in situ* et à terre, plateforme MEDIMEER) avec la possibilité de manipuler et de contrôler les forçages environnementaux. De tels dispositifs de grand volume, uniques en France et sur le pourtour méditerranéen, permettent d'isoler une masse d'eau de mer, représentative de l'écosystème côtier étudié, et de quantifier et qualifier, en conditions contrôlées, l'impact de forçages naturels (réchauffement climatique) et anthropiques sur le fonctionnement des écosystèmes marins côtiers (production, diversité, flux de matière, résistance, résilience, etc.).

Contact (OREME) : S. Mas, sebastien.mas@umontpellier.fr
et E. Servat, eric.servat@umontpellier.fr

* Mésocosme : dispositif expérimental dans lequel les conditions naturelles de vie d'espèces sont reproduites. Tous les paramètres environnementaux y sont contrôlés.



▲ Mésocosmes *in situ* (volume > 1m³) de la plateforme d'écologie marine expérimentale MEDIMEER. Chaque mésocosme est équipé de capteurs *in situ* pour mesurer les variables physico-chimiques et biologiques de la masse d'eau isolée. © Sébastien Mas

É

volution à long terme des communautés benthiques en relation avec des indices d'oscillation climatique

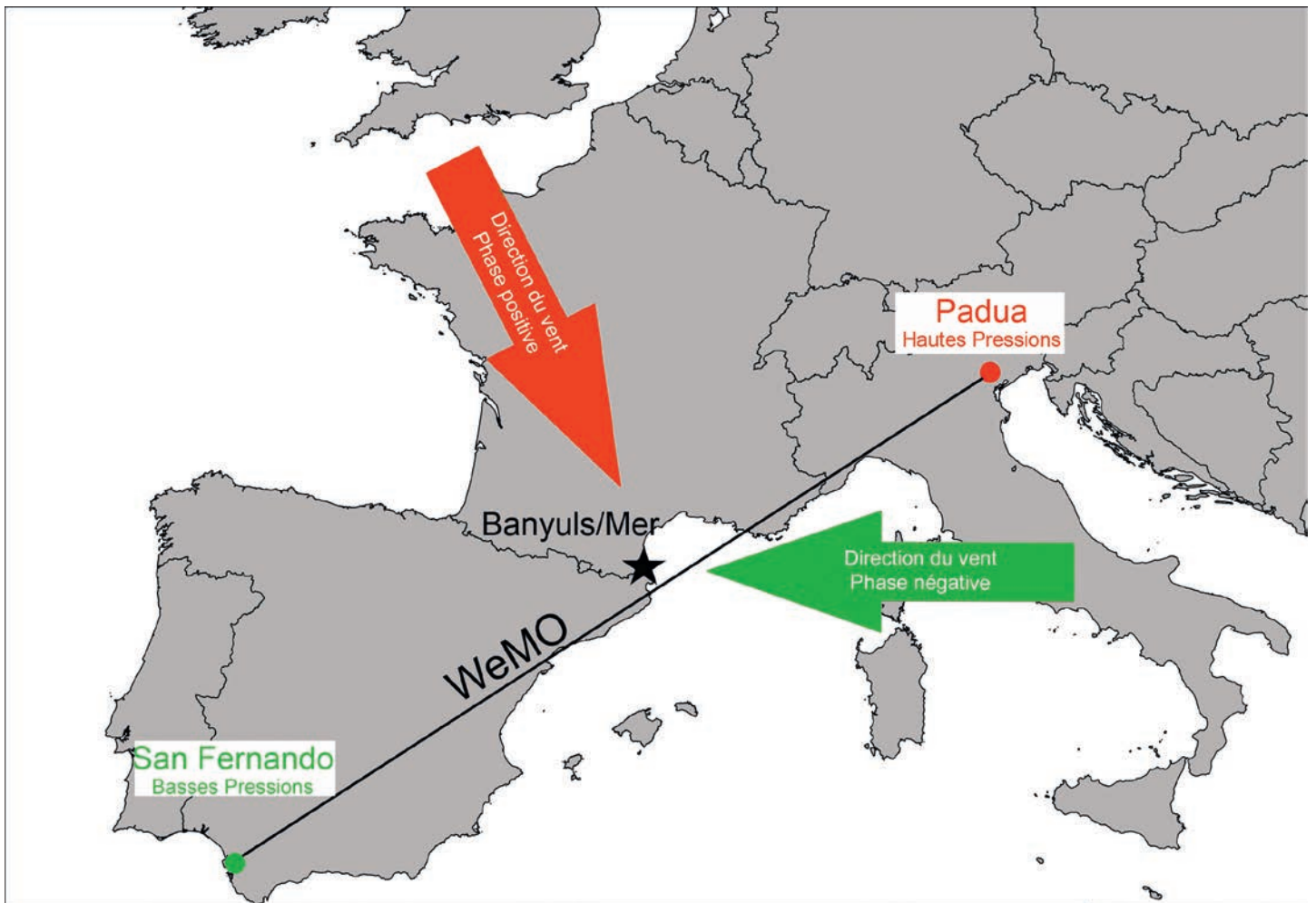
Du fait de sa mobilité réduite et des stades sensibles qu'elle traverse, la macrofaune benthique (faune de plus de 1mm étroitement associée aux sédiments) est un bon intégrateur des changements environnementaux, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Le LECOB s'intéresse à l'évolution temporelle des communautés benthiques de la baie de Banyuls-sur-Mer en échantillonnant annuellement quatre stations depuis 2004. Les relations entre la structure des communautés et les variables environnementales telles que la température de l'air, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, le débit du Rhône, les indices climatiques NAO (*North Atlantic Oscillation*) et WeMO (*Western Mediterranean Oscillation*), ont été testées.

L'indice WeMO est fonction de la différence de pression atmosphérique entre San Fernando en Espagne et Padua en Italie, et constitue un *proxy* régional particulièrement bien centré sur le golfe du Lion. Les phases positives de cet indice entraînent des vents qui viennent plutôt du Nord-Ouest (Tramontane) alors que les phases négatives ont pour conséquence des vents négatifs (en cours de publication) confirment que les communautés benthiques de la baie de Banyuls-sur-Mer subissent des changements temporels conséquents et montrent (i) que leur dynamique est mieux corrélée avec l'indice climatique WeMO qu'avec l'indice NAO et (ii) que le débit du Rhône joue également un rôle dans la structure de ces communautés. De plus, l'abondance de

certaines espèces est particulièrement bien corrélée avec l'indice WeMO. Ces résultats mettent en évidence la pertinence de la prise en compte des variations naturelles des communautés benthiques pour évaluer la qualité écologique du milieu, ceci afin de dissocier au mieux les causes naturelles et anthropiques des changements dans la structure de ces communautés.

Contacts (LECOB) :

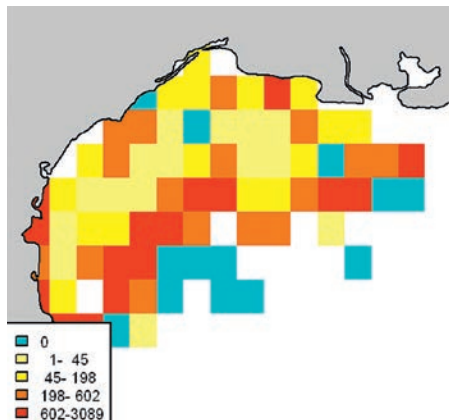
C. Labrune, labrune@obs-banyuls.fr
et P. Bonifacio, bonif@me.com



▲ Direction du vent en fonction des régimes de l'indice climatique WeMO (Oscillation de la Méditerranée occidentale). © Paulo Bonifacio. Carte modifiée d'après www.ub.edu/gc/2016/06/08/wemo/

Suivi des populations halieutiques et de mammifères marins du golfe du Lion

Les principales ressources vivantes exploitées dans le golfe du Lion sont régulièrement suivies par les scientifiques (cf. p. 51). La campagne française de chalutage MEDITS (Campagne internationale de chalutage démersal en Méditerranée) évalue les stocks de poissons et d'invertébrés des fonds marins (merlu, baudroie, rouget, poulpe, langoustine...). Cette



▲ *Cartes de distribution du Mullus barbatus (Linnaeus, 1758) dans le golfe du Lion (Médits Campaigns, 1994-2017). Pour chaque zone, un quadrillage systématique a été défini, puis la densité moyenne par km² dans chaque cellule a été calculée en utilisant les observations de toute la période. Pour la représentation cartographique, les cellules avec des densités moyennes correspondant*

aux quartiles de densité ont reçu la même couleur : Bleu : espèce jamais observée
Jaune clair : densité moyenne entre [0 et 25 %]
Jaune foncé : [25-50 %]
Orange : [50-75 %]
Rouge : [75-100 %].
D'après www.ifremer.fr/SIH-indices-campagnes

campagne, initiée en 1994, se déroule chaque année en Corse et sur l'ensemble du golfe du Lion. Les espèces collectées sont triées, pesées et dénombrées. Les mensurations sont relevées sur 84 espèces et, pour 41 d'entre elles, des paramètres biologiques clés (sexe, maturité, condition) sont collectés. **Depuis 2015, des informations sur les méduses, les macro-déchets, les contaminants et les caractéristiques hydrologiques des masses d'eau sont recueillies afin d'obtenir un panorama de l'écosystème dans lequel vivent ces organismes.**

Les petits pélagiques (sardines, anchois notamment) sont à la fois des espèces clés de l'écosystème et d'intérêt commercial pour les pêcheries. Pour évaluer les stocks et proposer des méthodes de gestion adaptées, il est donc nécessaire de bien connaître leur biologie et de disposer de données indépendantes de la pêche. Aussi, depuis 1993, la campagne PELMED (Pélagiques Méditerranée) évalue chaque année la biomasse des petits pélagiques

du golfe du Lion. Une prospection acoustique le long de neuf radiales perpendiculaires à la côte est réalisée ainsi que des pêches afin d'identifier les espèces et prélever des informations sur les autres composantes de l'écosystème pélagique, du plancton aux prédateurs supérieurs. Parallèlement, une dizaine de survols est réalisée chaque année depuis 2000 (d'août à octobre) pour estimer le nombre et la taille des bancs de thons rouges occurrents dans le golfe du Lion et un peu au large. À partir de ces données, **un indice d'abondance des jeunes thons rouges de Méditerranée est produit puis utilisé pour évaluer le stock de cette espèce.** Cette campagne enregistre aussi les observations de mammifères marins lors des vols, tels les rorquals communs, dauphins, cachalots et certains globicéphales.

Contacts (MARBEC) :

A. Jadaud, angelique.jadaud@ifremer.fr,
C. Saraux, claire.saraux@ifremer.fr
et T. Rouyer, tristan.rouyer@ifremer.fr

aux quartiles de densité ont reçu la même couleur :

Bleu : espèce jamais observée
Jaune clair : densité moyenne entre [0 et 25 %]
Jaune foncé : [25-50 %]
Orange : [50-75 %]
Rouge : [75-100 %].
D'après www.ifremer.fr/SIH-indices-campagnes

Le réseau RESPIRE : suivi des dynamiques spatio-temporelles de la colonisation larvaire sur la côte méditerranéenne française

Depuis mars 2015, le réseau de surveillance RESPIRE (réseau portuaire de suivi du recrutement), financé et mis en œuvre par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, Ecocean et l'UPVD (CREM/CEFREM)*, suit l'évolution spatio-temporelle de la colonisation larvaire de poissons sur les côtes méditerranéennes françaises. Les comptages s'effectuent trois fois par an sur des unités d'observation standardisées (Biohut, cf. p. 69) dans 21 ports de plaisance. Une représentation qualitative et quantitative d'éléments biologiques rend possible la comparaison entre sites et/ou entre années. Une base de données de référence, accessible à tous (MEDTRIX*), met à disposition des connaissances sur cette étape cruciale du cycle de vie des jeunes poissons afin d'évaluer *in fine*, l'intérêt d'opérations de restauration de la fonction « nurserie ». **Ces travaux ont révélé une hétérogénéité du recrutement larvaire sur la façade méditerranéenne française, avec, notamment, un décalage temporel entre les deux grandes régions Occitanie et PACA. Une grande variabilité interannuelle du recrutement est également mise en évidence ainsi que la présence d'une biodiversité remarquable au sein des ports, parfois avec des espèces rares et emblématiques comme le mérrou brun.** L'objet du programme RESPIRE est de pouvoir mieux comprendre ces phénomènes et cette variabilité.

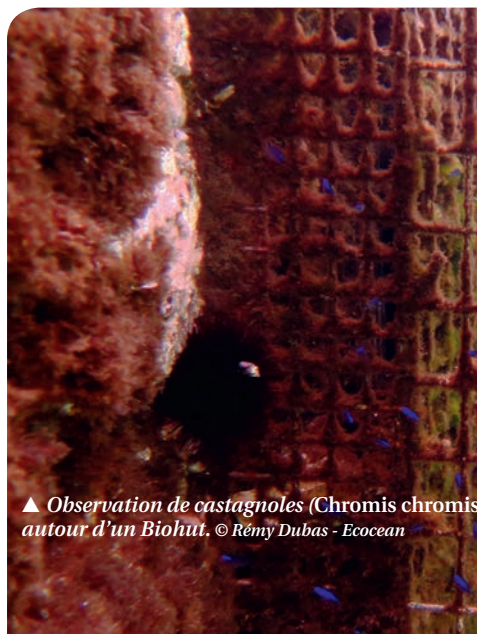
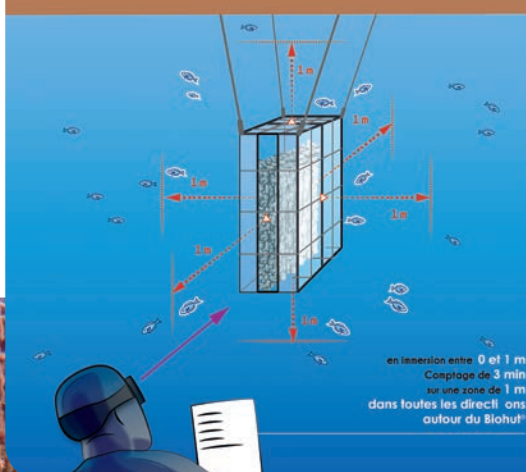
Contacts : A. Gudefin (Ecocean), anis.gudefin@ecocean.fr, A. Fontcuberta (Ecocean), amelie.fontcuberta@ecocean.fr, G. Lecaillon (Ecocean), gilles.lecaillon@ecocean.fr et P. Lenfant (CEFREM), lenfant@univ-perp.fr

Plus d'informations :

www.ecocean.fr
www.medtrix.fr

* Dans le contexte de la Directive cadre européenne « Stratégie pour le milieu marin » qui fixe les objectifs selon lesquels les États membres doivent agir en vue d'atteindre le « bon état écologique » de l'ensemble des eaux marines dont ils sont responsables, d'ici 2020.

▼ Méthode standardisée d'observation des Biohut.



▲ Observation de castagnoles (*Chromis chromis*) autour d'un Biohut. © Rémy Dubas - Ecocean



▲ Détection de la mégafaune marine profonde par l'ADN environnemental. © Pierre Lopez

Les îles isolées et les monts sous-marins comme derniers refuges pour la mégafaune marine

L'expédition océanographique (2018-2021) menée à bord du Yersin et organisée par Monaco Explorations a pour mission d'étudier la mégafaune marine (principalement les grands poissons osseux, les requins et les mammifères) qui vit près des récifs et des monts sous-marins de la zone tropicale. La mégafaune regroupe certainement les espèces marines les plus vulnérables à la pêche et aux changements globaux, avec un quart des espèces menacées d'extinction. Ce constat implique des efforts de conservation sans précédent. Pour être efficaces, ces efforts doivent être fondés sur une meilleure connaissance de la distribution géographique de ces espèces. Or les données actuelles sont principalement fondées sur la pêche et sur des observations ponctuelles. **L'ADN environnemental (ADNe), issu du matériel génétique d'organismes marins après filtration d'échantillons d'eau de mer, révèle la présence d'espèces. Le Yersin sera ainsi la première plateforme**

embarquée d'analyse en temps réel de la biodiversité avec des laboratoires et du matériel dédiés à l'analyse de l'ADNe*.

Outre ces prouesses techniques, l'expédition accèdera à des sites isolés et aux eaux profondes qui restent méconnues notamment pour leur composition en mégafaune. Aussi, nous allons tester l'hypothèse que l'océan profond (inférieur à 1 000 m de profondeur) constitue un refuge

insoupçonné pour la mégafaune et, néanmoins, mal protégé. Pour cela, **l'eau profonde sera filtrée pour y détecter la diversité de cette mégafaune. Si l'océan profond s'avère être un hotspot de biodiversité, sa protection, toujours « parent pauvre » des politiques de gestion des océans, pourrait alors devenir une priorité.**

* Collaboration MARBEC/EPHE/CEFE/SpyGen/École polytechnique fédérale de Zurich.

Contact (MARBEC) : D. Mouillot, david.mouillot@umontpellier.fr

Plus d'informations :

<http://monacoexplorations.org>

<https://monacoexplorations.org/david-mouillot-of-cnrs-introduces-his-collaboration-with-monaco-explorations/>

<https://lejournal.cnrs.fr/articles/un-tour-du-monde-pour-la-megafaune-marine>

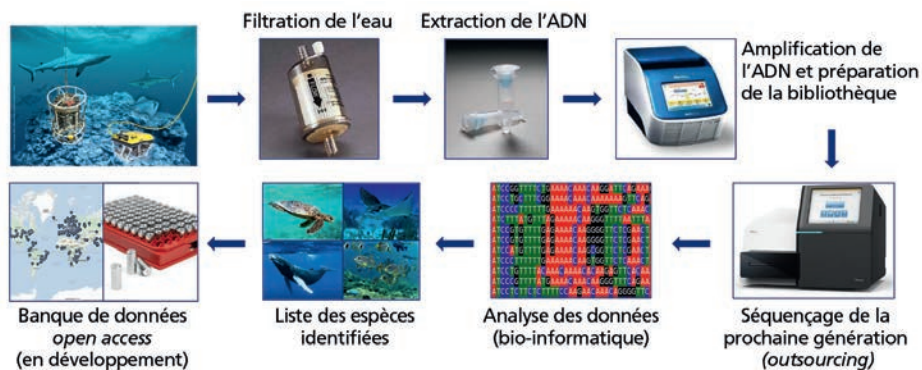
Indicateurs de l'état de santé des écosystèmes marins à partir de l'ADN environnemental

Les aires marines protégées (AMP) sont des outils de conservation et de gestion clés pour protéger les ressources marines. Cependant, nous manquons actuellement de connaissances sur l'état de santé des écosystèmes marins pour un gradient d'impact humain allant des AMP aux écosystèmes les plus exploités. En effet, de nombreuses espèces sont cachées dans les rochers ou sous le sable (petits poissons ou invertébrés) ou sont furtives (la plupart des prédateurs mobiles) donc difficiles à recenser par les méthodes classiques de pêche ou de recensement visuel. En filtrant de l'eau de mer, la récolte de l'ADN environnemental (ADNe), fragments d'ADN relâchés par les organismes dans leur environnement *via* la sécrétion de mucus ou les fèces, révèle la présence des espèces de manière standard, non-intrusive et non-destructive. À partir de cette méthode et en collaboration avec le CEFE et les sociétés SpyGen et Andromède, MARBEC formalise actuellement des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes marins fondés sur la présence des vertébrés et

invertébrés exploités par la pêche pour inférer le niveau et le type de pression sur les écosystèmes côtiers méditerranéens. Par exemple, la pêche plaisancière ne cible pas les mêmes espèces que la pêche artisanale donc la présence, ou l'absence, de ces espèces révélée par ADNe indiquera le niveau de pression d'un certain type de pêche sur la zone échantillonnée. Le niveau de référence de ces indicateurs sera obtenu sur plusieurs AMP en Méditerranée.

Contacts : D. Mouillot (MARBEC), david.mouillot@umontpellier.fr et S. Manel (CEFE), stephanie.manel@cefe.cnrs.fr

Plus d'informations :
<https://reefish.umontpellier.fr>
www.spygen.com



▲ Processus de filtration et d'analyse de l'ADN environnemental en collaboration avec la société SpyGen. © SpyGen

Utilisation des gliders pour le suivi de la dynamique côtière

La zone côtière joue le rôle de réceptacle des matières fluviatiles (sédiments, matières organiques et contaminants), en stocke une partie et relargue le reste vers le domaine profond. En Méditerranée et dans le golfe du Lion, les flux d'eau et de matières dans le continuum terre-mer se produisent essentiellement durant les événements hydro-météorologiques intenses, mais brefs, que sont les crues et les tempêtes. Les stratégies d'observation classiquement utilisées pour mesurer ces flux ne sont toutefois pas capables d'appréhender les différentes échelles spatio-temporelles nécessaires à l'étude de la dynamique côtière. En effet, les bouées et mouillages instrumentés réalisent des mesures à très haute fréquence des processus de transfert côte-large mais qui ne sont pas représentatifs à l'échelle du plateau océanique. Les images satellitaires optiques rendent seulement compte de la surface de la mer en l'absence de couverture nuageuse à de larges échelles spatiales et temporelles. Si les campagnes par bateau peuvent embarquer de nombreux instruments de mesure, elles sont limitées par les conditions météorologiques. Au regard de ces contraintes, les planeurs autonomes sous-marins – les *gliders* – s'avèrent être un complément utile à ces systèmes d'observation plus classiques. Déjà largement utilisés dans le domaine *offshore*, les *gliders* ont démontré leur capacité à observer les flux aux interfaces du domaine côtier (programmes ANR MATUGLI* récemment menés par le CEFREM). En effet, ces instruments sont dotés d'une autonomie de plusieurs mois et peuvent embarquer des capteurs hydrologiques, biogéochimiques et courantologiques ; ils sont également capables de

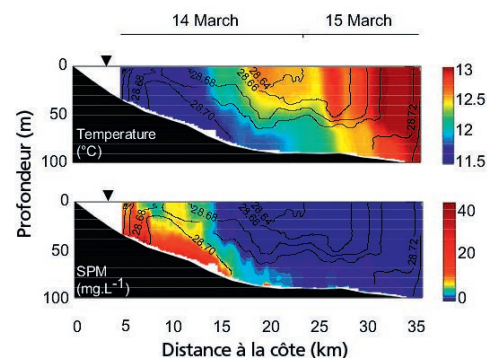
faire des mesures même lorsque les conditions en mer sont impraticables pour les navires de recherche.

Le CEFREM est pionnier à l'échelle internationale dans l'utilisation des *gliders* sur les plateaux continentaux pour observer l'impact des événements intenses sur le transfert côte-large des matières en suspension. Des développements récents ont permis notamment l'intégration de capteurs optiques et acoustiques afin de mieux caractériser ces matières en suspension en vue d'estimer leur vitesse de chute, un paramètre clé pour modéliser les flux sédimentaires à l'échelle mondiale.

► Exemple de données acquises par le glider (température et charge de matières en suspension) lors d'une tempête d'Est. D'après Bourrin et al., 2015. *Continental Shelf Research*. 109: 135-149. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.08.031>

Contact (CEFREM) :
 F. Bourrin, fbourrin@univ-perp.fr

* Programme de recherche ANR ASTRID (financement DGA/ Direction générale de l'Armement) : Mesures autonomes de la turbidité côtière à l'aide de *gliders*.



POPSTAR : une nouvelle génération de système de marquage pour le suivi des espèces marines

Comment étudier et suivre l'état physiologique des poissons grands pélagiques au cours de leurs migrations ? Les données requises pour répondre à cette question nécessitent des mesures physiologiques individuelles réalisées *in situ*. Pour cela, **il est nécessaire de développer un système de mesure des paramètres physiologiques qui soit implanté dans l'animal afin d'obtenir un suivi dans un environnement naturel sans possibilité d'action sur le dispositif durant toute la durée du marquage** (classiquement 1 an). Ces informations sont transmises à un satellite, d'où leur nom de « marque satellite ». Le projet POPSTAR* ambitionne de mettre au point une marque plus fonctionnelle et moins chère que celles déjà commercialisées et dont l'innovation la

plus marquante sera l'enregistrement *in situ* d'informations sur l'état physiologique du poisson. **Pour la première fois, on pourra évaluer son état dans son milieu naturel, par exemple en mesurant les variations spatio-temporelles de son taux de gras !**

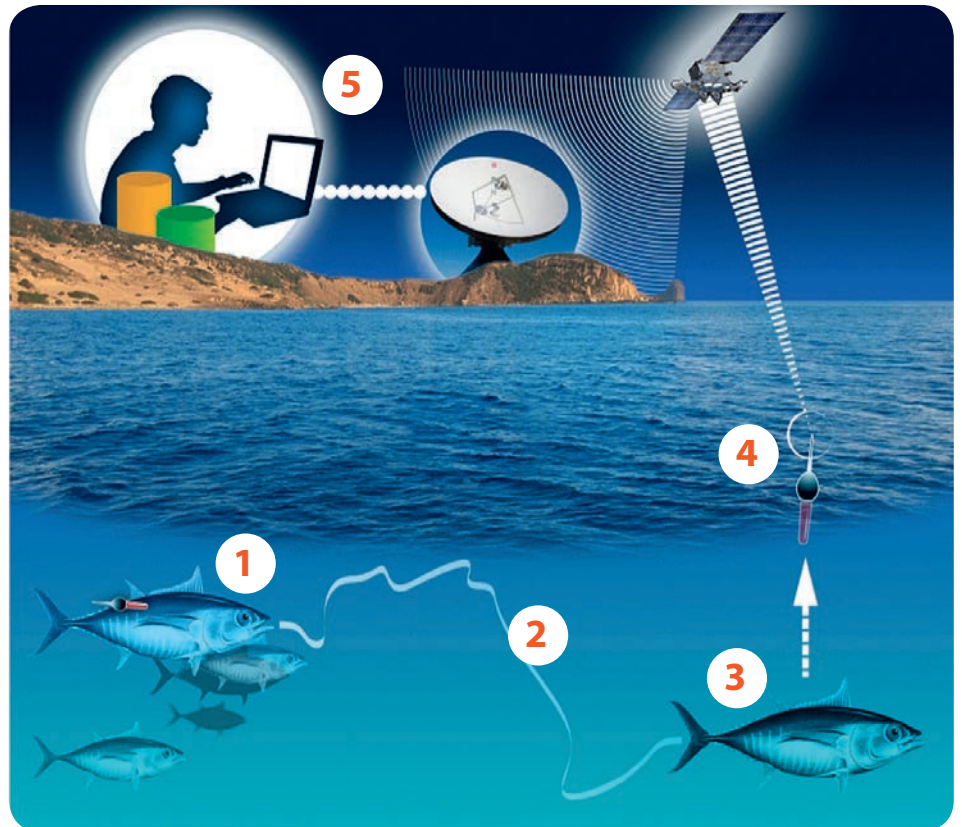
La marque doit être de taille réduite pour gêner l'animal le moins possible. Cette taille étant directement liée au poids de la batterie embarquée, le système de mesure devra être particulièrement économe en énergie. La mesure devra être la plus intégrative possible des processus biologiques intéressants pour le suivi de l'espèce. Enfin, le système devra être en mesure de compenser les perturbations de l'environnement interne (modification de l'interface vivant/électrode par exemple) et

externe (pression par exemple) bien que toutes les perturbations possibles ne soient identifiables à ce stade. Le système de mesure sera une puce électronique de quelques millimètres carrés. En parallèle du développement de ce dispositif nanoélectronique, nous avons effectué un grand nombre de campagnes de mesures (plus de 2 000 mesures) avec un prototype portable. En région Occitanie, ces mesures ont été réalisées en collaboration avec des pêcheurs professionnels, des mareyeurs et les plateformes d'aquaculture de l'Ifremer. Les premiers résultats démontrent l'efficacité de la mesure et la pertinence de l'architecture de ce système de marquage.

* POPSTAR est un des projets « Merlin » (Pour la MER, Lancement d'Initiatives Nouvelles : <http://bit.ly/2dL7elz>) lancés en 2016 par l'Ifremer, qui ambitionnent d'accélérer l'innovation scientifique dans certains champs prometteurs (financement de 3 ans minimum).

Contacts : S. Bernard (LIRMM), serge.bernard@lirmm.fr, V. Kerzérho (LIRMM), vincent.kerzerho@lirmm.fr, T. Rouyer (MARBEC), tristan.rouyer@ifremer.fr et S. Bonhommeau (Ifremer), sylvain.bonhommeau@ifremer.fr

- **Légende :**
1 - Thon libéré après marquage
2 - Enregistrement des données environnementales, physiologiques et de géolocalisation pendant 1 an
3 - La marque se détache et remonte à la surface
4 - Transmission satellitaire des données enregistrées
5 - Analyse des données collectées
© Pierre Lopez/MARBEC



ADNe, gliders, marques satellites : de nouveaux capteurs de données *in situ* pour l'étude et la surveillance de la biodiversité, des ressources et de l'environnement marin.

Place de la télémétrie des satellites d'observation

Comprendre et mesurer les impacts du changement climatique de l'échelle globale à locale

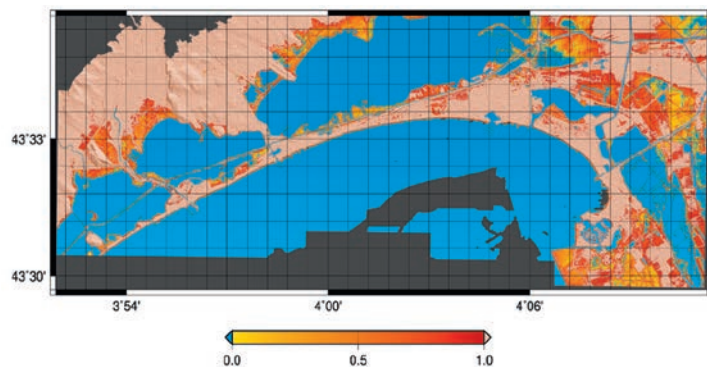
Grâce à 25 ans d'observations altimétriques depuis l'espace, les chercheurs toulousains ont mis en évidence et expliqué la hausse du niveau global des océans (~3mm/an), variable climatique essentielle à la caractérisation des effets liés au réchauffement planétaire. La fiabilité de cette estimation tient à l'énorme travail que le CNES et la recherche consacrent à la qualité des données spatiales utilisées. Ces efforts soutenus valent à nos scientifiques **une reconnaissance mondiale de leurs travaux et une sollicitation de leur expertise dans les rapports périodiques du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).**

La hausse inévitable du niveau de la mer va en s'accroissant. Conjugée à d'autres phénomènes comme la houle, le vent, les tempêtes et la pluie, elle vulnérabilise les zones littorales. À court, moyen et long termes, le littoral est donc de plus en plus exposé à des risques de submersion et d'érosion du trait de côte. Dans un but préventif, les régions exposées ont donc besoin d'un suivi spatiotemporel synthétique des phénomènes

en action. **À partir d'un important jeu de données issues de plusieurs types de satellites (altimétrie, imagerie optique tridimensionnelle Pléiades, géodésie), une procédure développée par le LEGOS fournit un indice de vulnérabilité des côtes. Appliquée et validée sur la région de Palavas-les-Flots (cf. ci-contre), cette méthode est transposable à l'ensemble du littoral national, voire mondial, sous réserve de la disponibilité des données.** La spatialisation à l'échelle globale de ce type d'exercice correspond aux ambitions du *Space Climate Observatory** qui, à l'initiative du CNES et sous sa responsabilité, propose dès maintenant **un accès à des premiers jeux de données sur certaines zones pilotes, afin de démontrer le potentiel des satellites pour anticiper l'impact du changement climatique sur nos sociétés et leurs**

habitats. Nul doute que cet effort exemplaire pourra aussi bénéficier des méthodes inductives d'apprentissage profond (*deep learning*) idéales pour exploiter la richesse statistique des séries temporelles d'observations satellitaires, dont celles issues des satellites Sentinel du programme Copernicus.

Contact (CNES) : P. Maisongrande, philippe.maisongrande@cnes.fr
*** Plus d'informations :** <http://SpaceClimateObservatory.org>



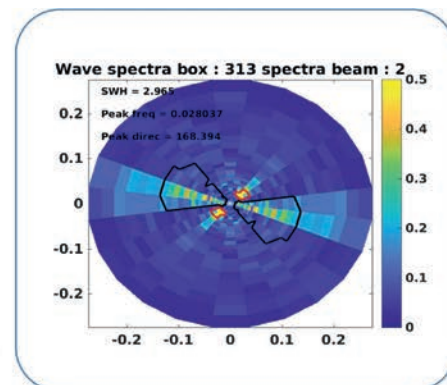
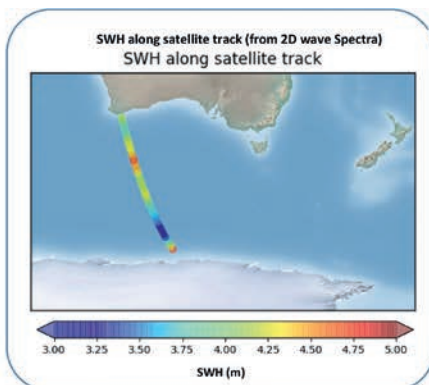
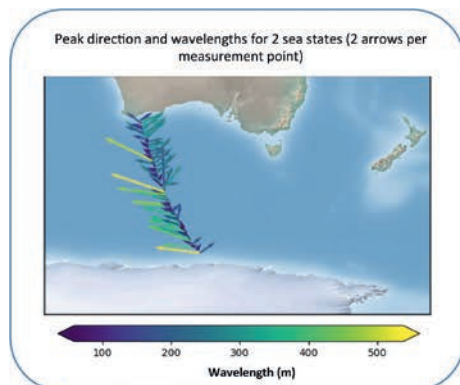
▲ Simulation des submersions provoquées par une hausse de 1 m du niveau de la mer à Palavas-les-Flots. D'après LEGOS/CLS, 2017. Étude interne. (Réf. interne CLS: Projections climatiques et vulnérabilité du littoral français, CLS-DOS-16-76.

Observation de l'état de la mer par les capteurs radar satellitaires

Peu contraints par les conditions de nébulosité, les capteurs radar (SAR imageurs, diffusiomètres, altimètres...) sont de formidables outils pour obtenir des informations sur la surface marine. Les altimètres Nadir mesurent de façon très précise (cm) la distance entre l'orbite des satellites qui les portent et la surface de la mer. De ces données « distances », des modèles performants déduisent différents paramètres océanographiques, tels que les courants à grande échelle, les marées,

la bathymétrie, avec une bonne couverture planétaire grâce à une constellation conséquente de missions opérationnelles ou en préparation (JASON*-2, JASON-3, SARAL*, Sentinel-3*). La hauteur significative des vagues peut être également déduite, apportant ainsi une première caractérisation de l'état de la mer, sans pour autant séparer les différents régimes de vagues car une seule valeur reste accessible pour chaque mesure de distance.

Les radars imageurs à synthèse d'ouverture (e.g. SAR/ENVISAT, Sentinel-1) possèdent un mode spécifique apte à restituer une information spectrale de l'état de la mer sous forme d'une mosaïque d'images de la surface des océans. À partir de ces données spectrales, sont renseignées les directions des vagues, leurs fréquences et leurs hauteurs pour les régimes dominants. De là, pour une zone d'intérêt identifiée, la discrimination et la cartographie de plusieurs régimes de vagues est possible,



▲ Premiers résultats niveau 2 de l'instrument SWIM acquis le 3/11/2018. L'instrument n'est pas encore calibré ; les mesures ne peuvent pas être encore utilisées à des fins scientifiques. Mais les produits démontrent déjà un fonctionnement nominal de l'instrument. Les traitements de niveau 1 et 2 sont définis conjointement entre le CNES et le laboratoire LATMOS (CNRS – OVSQ). © CNES

notamment lorsque deux systèmes se croisent (mers et houles croisées). Ces données sont assimilées de manière opérationnelle dans certains modèles météorologiques (e.g. MF-WAM de Météo France). Cependant les données SAR comportent des limitations dans les longueurs d'onde et directions des vagues caractérisables. Toutes ces mesures d'état de la mer doivent être complétées par les mesures de vent à la surface des océans.

Le service « Algorithmie, Traitements et Produits Radar » du CNES – un des leaders mondiaux depuis plusieurs

décennies en océanographie spatiale – contribue fortement à la préparation de nouveaux concepts pour des missions satellitaires et capteurs futurs. C'est le cas avec la mission CFOSAT* (lancement octobre 2018) dont le capteur SWIM, diffusiomètre radar omnidirectionnel de nouvelle génération, complétera les mesures de vagues outre les limitations évoquées. De plus, une première en océanographie spatiale, CFOSAT emportera un diffusiomètre à vent et un diffusiomètre à vagues dont le fonctionnement synchrone devrait déboucher sur une meilleure compréhension et modélisation de la surface des océans. Enfin, la

mesure du futur reste celle du courant de surface à petite échelle (<1 km), que les missions SKIM* et SEASTAR*, fondées toutes deux sur des concepts radar, tenteront de concrétiser.

Contact (CNES) : C. Tison, celine.tison@cnes.fr

Plus d'informations :
www.aviso.altimetry.fr/en/home.html

* CFOSAT : China France Oceanography SATellite
Sentinel : mission européenne Copernicus
JASON : mission d'altimétrie franco-américaine
SARAL : mission d'altimétrie franco-indienne
SKIM et SEASTAR : missions européennes en préparation Earth Explorer 9 et 10

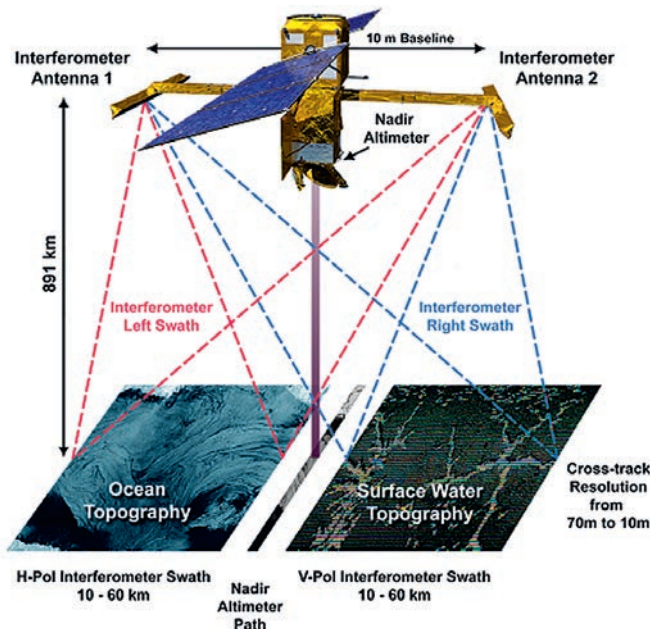
Des innovations technologiques sans précédent pour observer l'océan depuis l'espace

Thales Alenia Space (TAS) conçoit et réalise, depuis ses sites toulousain et cannois, des instruments actifs et passifs pour l'océanographie scientifique et opérationnelle. Le satellite Sentinel-3, développé par TAS pour le compte de l'Agence Spatiale Européenne, est entièrement dédié à l'observation de l'océan. Véritable concentré de technologie, Sentinel-3, grâce aux différents capteurs embarqués, permet à la fois d'observer la couleur de l'eau (capteurs OLCI*), mesurer la température de surface (capteur SLSTR*) et mesurer les hauteurs de la surface de l'eau (radar altimètre SRAL*) et en déduire les courants marins, la marée, etc. Les données de ces capteurs alimentent les modèles de prévision océanographique avec, à la clé, de nombreuses applications opérationnelles, la prévision des courants marins pour la pêche et la navigation, support à l'exploitation des plateformes *off-shore*, etc.

Le satellite SWOT*, en cours de réalisation par TAS pour le compte du CNES, fournira – et c'est une première ! – une cartographie tridimensionnelle de l'océan ainsi que des lacs et rivières avec une précision jusqu'à présent inégalée. Il viendra compléter et enrichir la famille des satellites d'altimétrie Jason précédemment développés par TAS (coopération bilatérale CNES/NASA). L'industrie spatiale n'échappe pas à la révolution digitale : les futurs altimètres, radar conçus et développés à Toulouse par TAS – leader mondial en radar altimètre –, intègrent les dernières technologies numériques qui permettront d'accéder à des mesures plus précises pour répondre à l'évolution des besoins des scientifiques, de l'océanographie opérationnelle, de la surveillance du climat et de la gestion de nos ressources en eau douce.

Contacts (TAS) : L. Phalippou, laurent.phalippou@thalesaleniaspace.com
et S. Mathieu, sandrine.mathieu@thalesaleniaspace.com

* OLCI : Ocean Land Colour Instrument
SRAL : SAR Radar Altimeter
SAR : Synthetic Aperture Processing
SLSTR : Sea and Land Surface Temperature Radiometer
SWOT : Surface Water and Ocean Topography



▲ **SWOT : une mission franco-américaine pour l'étude des surfaces d'eau océaniques et continentales.** Avec sa trace large, ce satellite couvrira tous les lacs, les rivières, réservoirs et océans de la Terre, au moins deux fois tous les 21 jours.
© CNES/Ducros David, 2015

◀ **Système de radar interférométrique en bande Ka à double fauchée.**
© CNES

A pport de l'imagerie spatiale pour la surveillance du littoral

L'imagerie spatiale est utilisée pour suivre de multiples paramètres environnementaux indispensables à une gestion intégrée des espaces côtiers. Elle fournit directement, et ce de manière indépendante, différentes variables physiques – bathymétrie (par imagerie optique multi-spectrale), mouvements du sol (par mesures interférométriques dans des séries d'images radar), trait de côte (par imagerie radar ou optique), qualité des eaux (mesures hyperspectrales), etc. Ces variables alimentent des modèles numériques et, *in fine*, offrent à l'utilisateur une surveillance opérationnelle de l'environnement à très haute résolution spatiotemporelle. Plus récemment, les techniques du *big data*

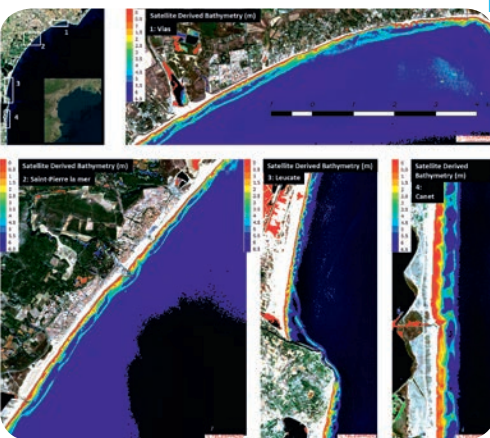
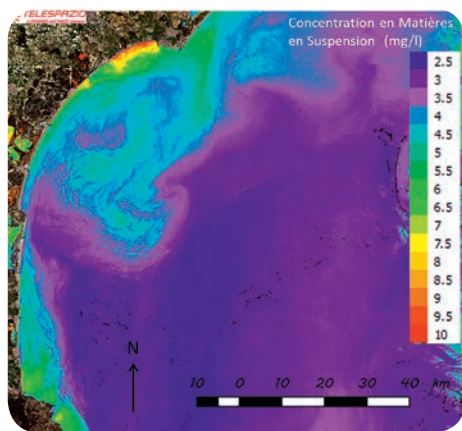
rendent possible le traitement de large séries de données et ont introduit la notion de la détection de changements, alertant ainsi l'expert ou le gestionnaire d'un évènement particulier ou de la nécessité d'actualiser des données. Grâce à l'intelligence artificielle, l'alerte peut être également ciblée en fonction des besoins spécifiques de chaque utilisateur.

À travers son initiative Earthlab, Telespazio France, filiale des sociétés Thales et Leonardo, a développé en France une expertise unique dans le traitement des données spatiales pour les applications côtières et dispose désormais de nombreuses références de premier plan (Copernicus, Suez,

Mercator, etc.). Répartie sur trois sites (Toulouse, Bordeaux et Montpellier), Telespazio France poursuit sa logique d'innovation partenariale, notamment avec plusieurs équipes de recherche publique en Occitanie (Institut de recherche technologique de Saint-Exupéry, TETIS, LIRMM). La société est notamment impliquée avec ses partenaires dans la mise en place de plateformes *big data* nécessaires à l'analyse des immenses flux de données spatiales que vont générer les nouvelles constellations d'observation de la Terre.

Contact (Telespazio France) : F Marques, francois.marques@telespazio.com

Plus d'informations : www.earthlab-galaxy.com



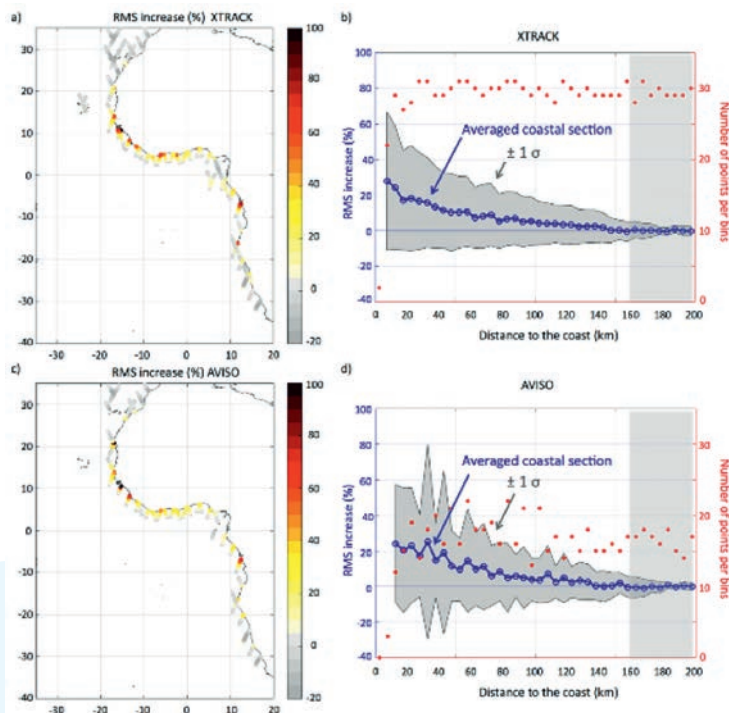
◀ Gauche. Concentration de matières en suspension à partir d'images Sentinel-2, zone Est du golfe du Lion. © Sylvain Capo/Telespazio France

◀ Droite. Extraction de la bathymétrie à partir d'images Sentinel-2, zone Est du golfe du Lion. © Sylvain Capo/Telespazio France

L'altimétrie spatiale : un nouvel outil pour observer l'océan côtier

Pour étudier et surveiller l'océan, l'altimétrie spatiale, technique qui mesure les variations de hauteur de la mer, est un outil majeur et unique. Elle fournit des estimations sur de nombreux paramètres de manière régulière et continue depuis plus de 25 ans (hauteur de la mer, courants, vagues, vent, marée...) et offre de nombreuses applications scientifiques et opérationnelles. Pourtant, l'altimétrie spatiale est encore peu utilisée en océanographie côtière. En effet, les missions spatiales altimétriques ont été conçues pour observer le large. La résolution des mesures est trop limitée (estimation de hauteur tous les 6-7 km le long de la trace du satellite avec une revisite de 10 jours au mieux) pour observer les processus dynamiques rapides de l'océan côtier. Les échos des radars altimétriques sont biaisés à proximité des terres émergées et donc plus difficiles à analyser. Enfin, les traitements et produits altimétriques standards sont inadaptés aux besoins de l'océanographie côtière.

Afin de surveiller le niveau marin côtier dans le contexte du changement climatique, des laboratoires de recherche se mobilisent depuis plus d'une décennie pour développer des algorithmes aptes à optimiser le traitement de la mesure altimétrique en région côtière, puis retraiter l'ensemble des archives d'observations. En parallèle, de nouveaux altimètres plus



▲ Étude des changements de l'amplitude des variations temporelles du niveau de la mer : distribution régionale à gauche et moyenne en fonction de la distance à la côte à droite. Quand on s'approche des côtes africaines avec un produit altimétrique opérationnel récent (AVISO, en bas) et avec un produit altimétrique de recherche développé au LEGOS (X-TRACK, en haut), on observe des variations très importantes d'un point à un autre le long de la côte. En améliorant les traitements, le nombre d'observations (points rouges) est augmenté et on accède à des informations de plus en plus fiables et de plus en plus près du trait de côte dans des régions où on ne dispose de peu, ou d'aucune, observations in-situ. La même étude est en cours sur les évolutions à long terme du niveau marin côtier. D'après Birol et al., 2017. *Advances in Space Research*. 59(4): 936-953. doi:10.1016/j.asr.2016.11.005.

performants sont développés*, fournissant plus de données à une meilleure résolution. Le CNES et le LEGOS, en pointe dans ce domaine, développent et distribuent de nouveaux produits altimétriques** fournissant des séries temporelles de hauteur de la mer et des estimations des composantes de la marée. **Les études les plus récentes montrent que ces efforts donnent aujourd'hui accès à des mesures de qualité jusqu'à 3 km des côtes contre 50 km il y a 10 ans. Ces données se révèlent précieuses, notamment pour les régions côtières**

du globe où on ne dispose d'aucune observation in-situ (cf. figure page précédente). Elles sont ainsi de plus en plus utilisées pour des applications océaniques côtières, seules ou avec d'autres types d'observations et modèles de la circulation côtière, de l'évolution à long terme du niveau de la mer, de la marée, des évolutions d'écosystèmes marins côtiers... Le retour de ces expériences est extrêmement important afin de définir le besoin des missions altimétriques de demain.

Contact (LEGOS) :

F. Birol, florence.birol@legos.obs-mip.fr

* SARAL/AltiKa en 2013, Sentinel-3A&B en 2016 et 2018, SWOT prévu en 2021.

** X-TRACK, PEACHI : www.aviso.altimetry.fr/en/data/products

GEOSUD, UN GRAND ÉQUIPEMENT POUR DÉMOCRATISER L'ACCÈS À L'IMAGERIE SATELLITAIRE

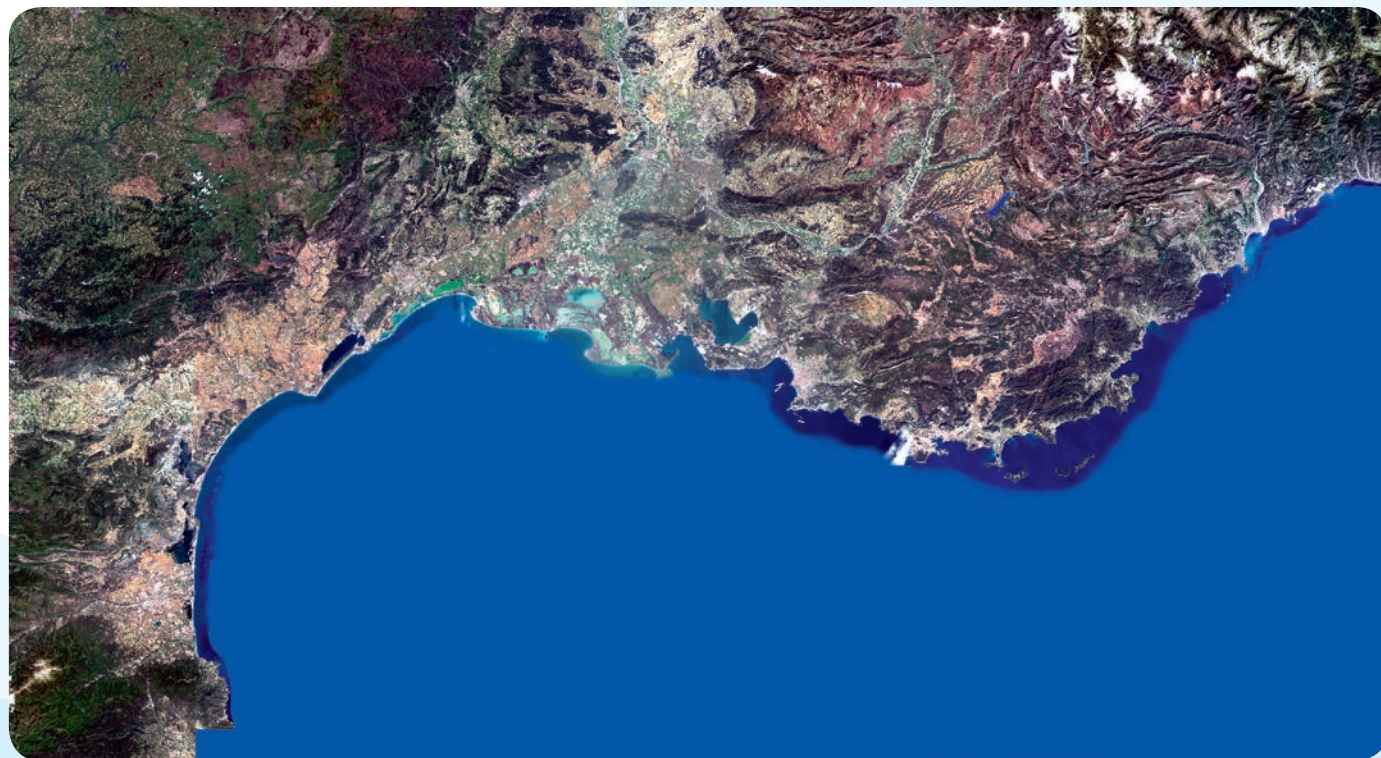
Les images satellitaires constituent, pour les chercheurs et les services publics, des données précieuses pour la surveillance des océans et la gestion des littoraux comme l'illustrent les catalogues des pôles nationaux de données Odatis et Theia, qui fédèrent respectivement les communautés scientifiques sur l'observation des océans et des surfaces continentales. Pour la gestion fine des territoires littoraux, notamment méditerranéens, les usages de l'imagerie satellitaire peinent à se développer bien que ces territoires concentrent de nombreux enjeux. Ceci s'explique par le coût élevé des images optiques à très haute résolution spatiale (<5m) et la complexité de leur exploitation. Baisser les coûts et offrir des services adaptés aux utilisateurs : c'est tout l'enjeu du projet GEOSUD*. Fondé sur une stratégie originale et quasi-unique de mutualisation et doté depuis 2014 d'une station de réception satellitaire, GEOSUD acquiert chaque année (depuis 2010) des couvertures homogènes du territoire national ainsi que des images à la demande sur le monde entier. L'archive GEOSUD, riche de plus de 11 000 images à très haute résolution, est accessible en licence à tout acteur public français (et à leurs partenaires étrangers et privés). Le projet proposera des services en ligne de traitements numériques des images sur des *clusters* haute performance installés au Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur (CINES).

De telles images ont, par exemple, été utilisées par le Syndicat Mixte du Bassin de Thau, en collaboration avec TETIS, pour l'élaboration et la mise en œuvre du SCoT**, du SAGE** et de documents Natura2000 sur le littoral méditerranéen : cartographie fine et suivi de l'occupation du sol, de l'artificialisation, des habitats naturels, des continuités écologiques, du trait de côte. Des travaux sont en cours sur la spatialisation de plusieurs services écosystémiques. Les investissements réalisés par GEOSUD sont actuellement repris dans la nouvelle infrastructure de recherche « Système Terre » qui comprend quatre pôles nationaux de données (dont Theia et Odatis) et Dinamis, un dispositif national unifié d'accès à l'imagerie satellitaire porté avec le CNES et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

Contact (GEOSUD) : P. Maurel, pierre.maurel@irstea.fr

* GEOSUD a été créé en 2011 à l'initiative des partenaires de la Maison de la Télédétection (Cirad, IRD, Irstea, AgroParisTech et, plus récemment, CNRS) sur financements Contrat de plan État-Région/ Fonds européen de développement régional (CPER/FEDER) et Programme d'Investissements d'Avenir (PIA) au titre des équipements d'excellence (EquipEx).

** SCOT : schéma de cohérence territoriale – SAGE : schéma d'aménagement et de gestion de l'eau



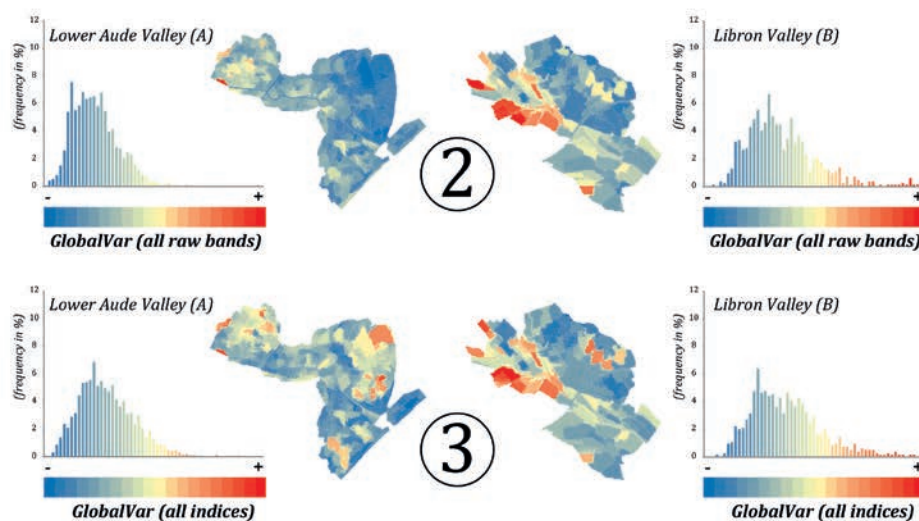
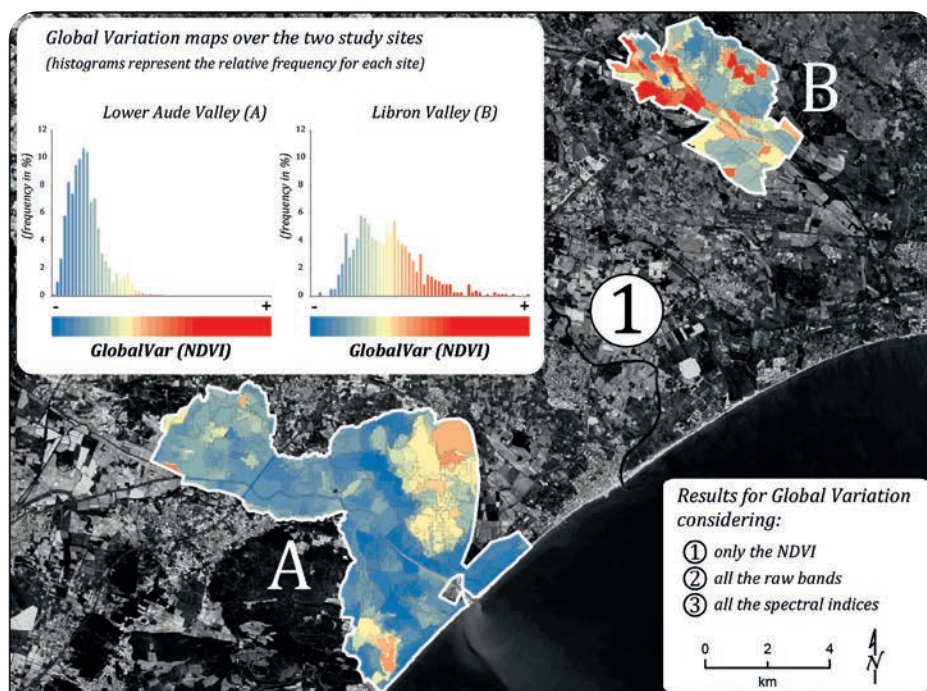
▲ Extrait de la mosaïque des images satellites SPOT 6-7 de la France métropolitaine, campagne 2016.
© Informations : Airbus DS 2016 / Production IRD, Irstea, IGN, tous droits réservés

Modélisation, simulation, prévision à l'ère du big data

Aports de la télédétection et des nouvelles approches « Big data » dans la surveillance des régions côtières

Les régions côtières méditerranéennes sont des écosystèmes sensibles, importants d'un point de vue économique (tourisme, pêche, aquaculture, loisirs). Ces régions sont pourtant surexploitées et soumises à de fortes pressions environnementales et anthropiques. Aussi, leur suivi environnemental est indispensable. Les données de télédétection constituent une importante source d'informations pour la surveillance des territoires côtiers. Les observations satellitaires répétées permettent de suivre l'évolution dans le temps d'une zone de façon systématique (p. ex. changements côtiers, croissance, modification de la couverture terrestre, surveillance des habitats naturels). Quand la répétabilité des observations satellitaires est garantie (le programme Copernicus offre des images satellitaires/optiques/radar à une fréquence inférieure à la semaine), il est possible de détecter les évolutions spatio-temporelles et d'en déduire leur dynamique, mais aussi de détecter des objets d'intérêt et de les catégoriser. En outre, la télédétection produit des informations multi-sources et multi-échelles. Différents types de capteur existent (optique, radar, multispectral, hyperspectral, LIDAR) ; chacun fournit des informations complémentaires pour décrire des phénomènes physiques. Par ailleurs, l'acquisition peut se faire à différentes échelles spatiales, depuis une très haute résolution spatiale (0,5 à 1m) à une résolution moyenne (100 m).

Alors que les données de télédétection constituent une riche source d'informations, la récente science des données (*Data Mining, Machine Learning, Deep Learning*) offre des techniques et outils pour les exploiter et fournir des produits à valeur ajoutée. Les techniques de *Data Science* facilitent l'analyse automatique et la classification de grandes quantités d'informations hétérogènes. Parmi ces techniques, celles de *Deep Learning* sont adaptées pour traiter et analyser les informations à partir d'images. Elles fournissent des outils permettant de fusionner des données à de multiples échelles spatiales et temporelles et issues de différents capteurs (optique/radar/LIDAR), afin de les exploiter intelligemment dans un processus de décision. Des connaissances utiles et précieuses sont ainsi extraites à partir de données de télédétection grâce aux techniques *Data Science*. Celles-ci constituent des outils essentiels pour la surveillance des régions côtières.



▲ Analyse des données scientifiques sur des séries chronologiques d'images satellitaires. La méthode utilisée en « Data Science » analyse automatiquement la zone d'étude puis, au vu des informations spatiales et radiométriques, détecte et met en évidence des zones géographiques qui évoluent de façon plus importante au cours du temps. D'après Guttler et al., 2017. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 130: 92-107.

Contact (TETIS) : D. Ienco, dino.ienco@irstea.fr

Simulation de processus extrêmes : quantification spatiale du risque littoral lors de tempêtes de très forte intensité

Ces travaux répondent à un besoin industriel d'aide à la modélisation physique : le chaînage de modèles numériques et statistiques. Leur dimension industrielle est consacrée à la conception et au développement d'un prototype de plateforme de modélisation avec l'utilisation systématique d'un ordinateur haute performance (HPC). Autour des problématiques liées à la gestion du risque littoral, ces travaux démontrent et illustrent l'apport d'un travail de recherche à l'interface de ces disciplines : géophysique, informatique et mathématique.

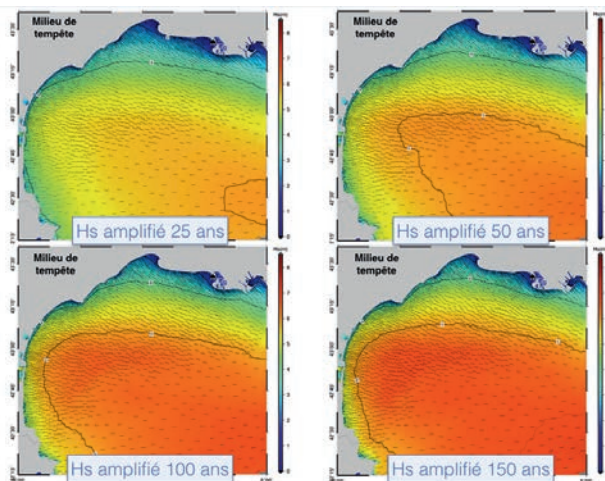
Le développement d'outils de calcul de l'hydro-morphodynamisme littoral sur ordinateur HPC étend le champ de la recherche académique à de nouvelles questions, à la fois sur les plans informatique, mathématique, océanographique et hydraulique. Le calcul massif de paramètres côtiers et littoraux en temps et en espace rend possibles la modélisation fine des processus hydro-morphodynamiques et leur étude par analyse stochastique. En zone côtière et dans le contexte méditerranéen, les vagues sont la principale source d'énergie responsable des risques et impacts. Afin d'étudier l'impact de scénarios extrêmes liés aux vagues, rares par définition, il convient de comprendre les processus physiques impliqués et d'être capable de les (re)jouer. Au cours de cette étude, a été développée une méthode semi-paramétrique ayant pour objectif de produire/simuler des champs spatio-temporels d'états de la mer extrêmes*. Cette méthode permet, d'une part, d'extraire dans les données à disposition les événements extrêmes et, d'autre part, d'en simuler de nouveaux encore plus extrêmes. Nous avons

alors accès à un nombre illimité de « scénarios catastrophes » réalistes qui peuvent être utilisés directement dans la prévision de risques : **les décideurs s'appuient sur des scénarios extrêmes simulés pour apprendre à les anticiper et accélérer leur décision en temps de crise.**

Contacts : R. Chailan (LIRMM/IMAG/GM/IBM), romain.chailan@gmail.com, F. Bouchette (GM), frederic.bouchette@umontpellier.fr, A. Laurent (LIRMM), anne.laurent@montpellier.fr et G. Toulemonde (IMAG/équipe LEMON-Inria), gwlady.s.toulemonde@umontpellier.fr

Plus d'informations :
GLADYS-littoral : www.gladys-littoral.org
Projet LEFE/INSU CERISE (Simulation de scénarii intégrant des champs extrêmes spatio-temporels avec éventuelle indépendance asymptotique pour des études d'impact en science de l'environnement) : <http://cerise.msem.univ-montp2.fr>

* Étude menée dans le cadre d'une thèse Cifre UM/IBM et encadrée par GM, IMAG et LIRMM. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01289184/> et <https://projecteuclid.org/euclid.aos/1507168834>



◀ **Scénarios extrêmes (correspondant à des niveaux de valeurs attendus tous les 25, 50, 100 ou 150 ans) de hauteurs significatives de vagues obtenus par simulation stochastique.** © R. Chailan, 2015

Analyse hyperspectrale et mesures LiDAR : détection des pollutions et bathymétrie de précision

Le littoral constitue une zone critique particulièrement sensible à l'action anthropique. L'ONERA développe des compétences spécifiques en télédétection optique pour caractériser et suivre l'évolution de l'activité humaine. Les applications de ces travaux concernent principalement deux aspects : la pollution marine et le développement de moyens sous-marins ou aéroportés pour caractériser la bathymétrie précise des petits fonds et de la colonne d'eau.

L'ONERA mène des activités de détection de polluants chimiques à la surface de l'eau. Une méthodologie d'identification et de caractérisation des différents types de polluants a été validée à partir de données aéroportées hyperspectrales (cf. fig.1). Cette méthode pourrait ainsi être

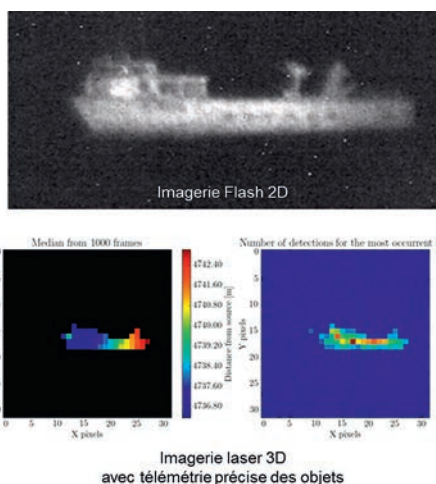
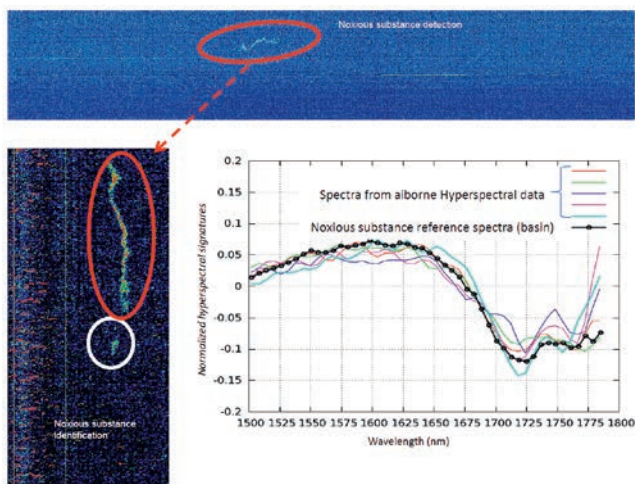
utilisée pour la détection de plastiques en mer car ils présentent tous une signature spectrale similaire (dans le domaine 1.0-2.5µm).

L'ONERA a mis au point des outils et des méthodes d'estimation des émissions d'aérosols et de gaz anthropiques sur des sites industriels qui pourraient être appliqués aux effluents émis par les bateaux. Par ailleurs, **des développements technologiques couplant imagerie laser et caméra rendent dorénavant possible la surveillance du trafic maritime sur plusieurs dizaines de km en conditions de visibilité très dégradées** (par ex. brouillard) de jour comme de nuit (cf. fig. 2).

L'ONERA dispose des compétences pour

caractériser les eaux peu profondes ou non. La détection de résurgences d'eau par mesure de différence de température de surface fournit ainsi des informations utiles à la gestion de l'eau. De plus, l'ONERA met en œuvre des méthodes pour estimer les principaux constituants de la colonne d'eau (phytoplancton, sédiments marins et matière jaune) à partir de ses moyens LiDAR immergés ou aéroportés. L'association de l'imagerie hyperspectrale et de LiDAR télémétrique ouvre la voie à une cartographie précise des fonds marins, même en présence de forte turbidité (par ex. application à l'archéologie sous-marine).

Contacts (ONERA) :
N. Rivière, nicolas.riviere@onera.fr,
P.-Y. Foucher, pierre-yes.foucher@onera.fr
et X. Briottet, xavier.briottet@onera.fr



◀ **Fig. 1. Gauche. Détection et caractérisation de polluants chimiques en mer par télédétection hyperspectrale aéroportée.** © ONERA

◀ **Fig. 2. Droite. Détection de nuit et en condition de visibilité dégradée d'un bateau à plusieurs km de portée.** © ONERA

Le défi de la modélisation écosystémique

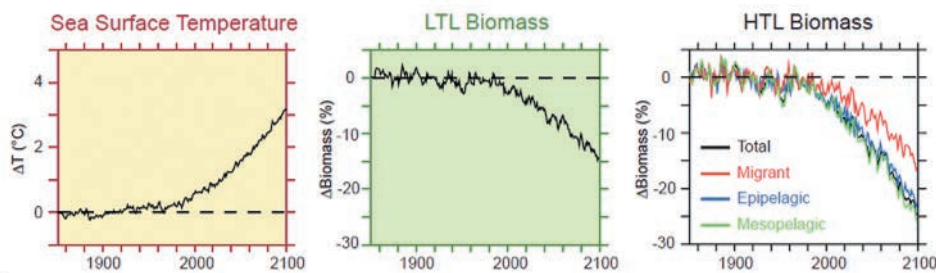
Soumis au changement climatique, à la pêche et à de multiples autres perturbations (pollutions, acidification, eutrophisation, destruction des habitats), les écosystèmes marins changent rapidement. D'une grande complexité, répondant de manière non-linéaire aux modifications de l'environnement et aux pressions anthropiques, leur évolution est difficile à prévoir. Les modèles mathématiques aident à mieux comprendre les écosystèmes et à anticiper leurs changements en fonction de scénarios d'évolution du climat et de différentes stratégies de gouvernance des activités humaines. Ces modèles, développés pour représenter, étudier et prédire les écosystèmes marins, ont beaucoup évolué ces dernières années. En effet, les populations exploitées par la pêche étaient auparavant représentées isolément, sans considérer l'influence de l'environnement sur leur dynamique ni les multiples interactions qu'elles

connaissent avec les autres composantes des écosystèmes. Les modèles écosystémiques intègrent aujourd'hui un nombre grandissant de composantes et de processus.

En particulier, les modèles écosystémiques « end-to-end » considèrent explicitement les interactions entre les systèmes physiques (température, courants), biogéochimiques (éléments nutritifs, production primaire), biologiques (individus, populations, communautés), écologiques (réseaux trophiques du plancton aux prédateurs supérieurs), halieutiques (flottes de pêche) et économiques (marchés du poisson). Les interactions entre ces multiples éléments des écosystèmes sont responsables de dynamiques non-linéaires qui peuvent conduire à des évolutions inattendues. Il est donc nécessaire de les représenter et de les lier aux

composantes du « Système Terre » qui les contraignent, comme le climat ou l'économie globale. La formulation mathématique, l'implémentation informatique, l'estimation des paramètres et l'évaluation de tels modèles sont conceptuellement et techniquement difficiles. Elles requièrent des observations synoptiques (malheureusement souvent inexistantes ou inadaptées) des différents systèmes socio-économiques, écologiques, biologiques, géochimiques et physiques considérés. Elles nécessitent également l'accès aux calculateurs à haute performance aptes à réaliser des simulations d'écosystèmes, à haute résolution spatiale, sur de vastes étendues géographiques, et de projeter leur évolution dans le futur jusqu'à la fin de notre siècle et au-delà.

Contacts (MARBEC) :
O. Maury, olivier.maury@ird.fr
et Y. Shin, yunne.shin@ird.fr



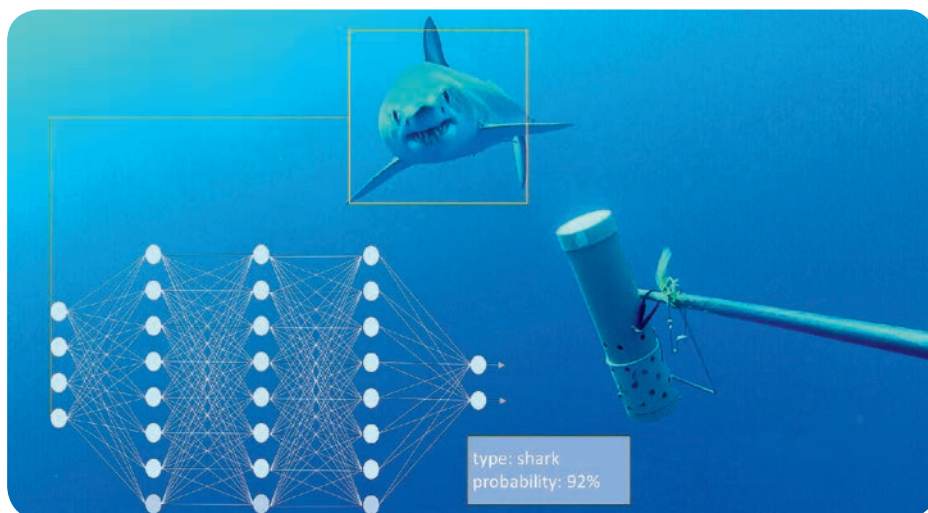
◀ *Simulation de l'évolution des écosystèmes marins planétaires jusqu'en 2100. À gauche : température moyenne de la surface de l'océan. Au milieu : production primaire moyenne. À droite : biomasse des trois principales communautés halieutiques de l'océan pélagique.*
D'après Lefort et al., 2015. Global Change Biology. 21: 154-164.

Les réseaux neuronaux profonds pour la reconnaissance automatique des requins

L'observation *in situ* de la biodiversité marine est cruciale pour la mise en place de politiques visant à enrayer son érosion. Pour cela, les chercheurs utilisent un système d'observation constitué de caméras appâtées. Cependant, le traitement manuel de milliers d'heures de vidéo représente un effort considérable, ce qui limite l'utilisation de cet outil à grande échelle. **Pour analyser cette grande quantité d'images rapidement et à faibles coûts, les chercheurs de l'UMR ENTROPIE ont développé un système innovant de reconnaissance automatique des poissons reposant sur les réseaux neuronaux profonds. Il s'agit d'algorithmes d'intelligence artificielle « auto-apprenants » c.-à-d. capables d'apprendre d'eux-mêmes à résoudre une tâche à partir d'un ensemble d'exemples et qui exploitent les principes de fonctionnement des réseaux de neurones biologiques.**

Nouvelle-Calédonie. Les résultats obtenus sur les requins sont très encourageants et les chercheurs étendent aujourd'hui cette approche novatrice aux autres espèces de poissons, notamment en Méditerranée dans le cadre des explorations de Monaco*.

Contacts (ENTROPIE) :
L. Mathon, laetitia.mathon@gmail.com,
C. Iovan, corina.iovan@ird.fr
et L. Vigliola, laurent.vigliola@ird.fr
Plus d'informations :
Projet PRISTINE : <http://pristine.ird.nc>
Projet APEX : <http://apex.ird.nc>
Explorations de Monaco :
<http://monacoexplorations.org>



▲ *Réseau de neurones profonds appliqué à la reconnaissance automatique de requins. Le réseau reçoit en entrée une image et l'analyse pour fournir en sortie la probabilité de présence d'un requin dans l'image. Le réseau est constitué de couches de neurones qui analysent l'image successivement. Les connexions entre les neurones sont modifiées itérativement durant l'apprentissage afin de spécialiser le réseau pour la reconnaissance de requins.*
Requin : capture d'écran d'une vidéo acquise par une caméra appâtée dans le cadre du projet PRISTINE.
© Laurent Vigliola/IRD/UMR ENTROPIE

Les vidéos sous-marines pour l'identification et la localisation automatique des poissons

Comment mesurer la biodiversité sous-marine ? Comment observer, identifier et localiser cette biodiversité ? Pour répondre à ces questions, LIRMM et MARBEC* développent des méthodes d'analyse automatique d'images et de vidéos afin de traiter les importants volumes de données générés. Ces travaux ont trois objectifs :

- 1- développer des algorithmes de type « *Deep learning* » pour la reconnaissance automatique de poissons à partir de photos et de vidéos ;
- 2 - appliquer ces avancées à un cas d'étude : évaluer la biodiversité des récifs coralliens de l'océan Indien (Mayotte et Madagascar) et le bénéfice des mesures mises en œuvre pour leur protection ;
- 3 - mettre à la disposition du grand public une application de reconnaissance automatisée de poissons.

Nous développons actuellement **des algorithmes de détection et de reconnaissance automatique des espèces de poissons dans des vidéos HD fondés sur des méthodes de *Deep learning***. Les premiers travaux portant sur un modèle d'étude entraîné sur 20 espèces de l'océan Indien permettent d'obtenir **un taux de succès de 94 % de reconnaissance**. À moyen terme, nous mettrons en place un serveur web offrant au grand public la possibilité d'envoyer des photographies sous-marines dans lesquelles les poissons seront localisés et identifiés automatiquement. À long terme, **ce type d'algorithme rendra possible la surveillance à très haute fréquence temporelle sur une large couverture spatiale, et ainsi, par exemple, détecter des espèces rares ou exotiques et mesurer les effets des aires marines protégées en Méditerranée**.

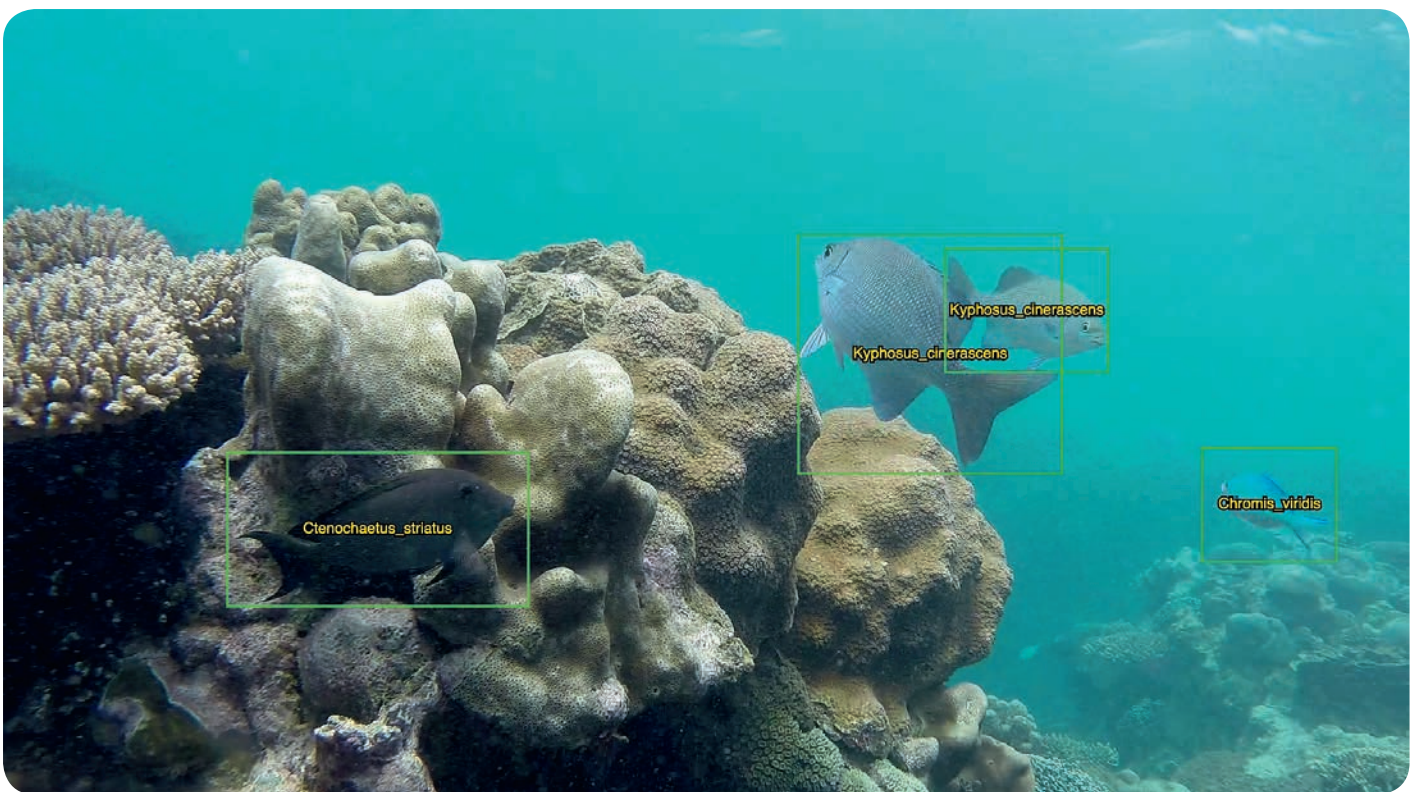
Contacts :

M. Chaumont (LIRMM), chaumont@lirmm.fr
et D. Mouillot (MARBEC),
david.mouillot@umontpellier.fr

Plus d'informations :

<https://reefish.umontpellier.fr>

* Ce projet interdisciplinaire associe des laboratoires en écologie marine (MARBEC) et en analyse d'images (LIRMM) dans le cadre d'une thèse financée par l'école doctorale GAIA (Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau) et le LabEx CeMEB (Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité) et de partenariats avec le Groupe naturaliste de l'UM et l'ONG *Wildlife Conservation Society* (WCS).



▲ Localisation et identification de poissons au sein d'une image.
© LIRMM/MARBEC, 2018

Big Data : volume de données si considérable qu'il ne peut être compris dans son ensemble ou analysé par l'esprit humain, voire par les moyens de calcul classiques.

Nouveaux services numériques au bénéfice de la collectivité et plateformes de surveillance littorale et maritime

L'océan digital au service de la science et de la croissance bleue

Mercator Océan International est un des rares opérateurs de service en information océanique au monde, capable de numériser tous les océans du globe. Situé au cœur de la région Occitanie, à Ramonville-Saint-Agne, son histoire commence il y a plus de 20 ans, avec une petite structure qui opère des systèmes numériques décrivant l'état de l'océan en 3D en temps réel, à l'échelle régionale puis globale, au sein de la nouvelle filière « Océano » à Toulouse. En 2010, Mercator Océan devient une structure d'intérêt général puis, en mai 2015, signe un accord de délégation avec la Commission européenne pour mettre en place et opérer le *Copernicus Marine Service* de l'Union européenne.

Copernicus est le programme spatial d'observation de la Terre de l'Union européenne et *Copernicus Marine Service* est le service dédié à la surveillance des océans du monde entier. Il offre un accès gratuit, sans équivalent dans le monde, à un catalogue d'informations et de produits experts décrivant la physique océanique et sa biogéochimie sur les mers européennes et l'océan global. Ces informations concernent la circulation océanique (grands courants, vagues, tourbillons et turbulences, niveau de la mer...), l'état thermohalin (grandes masses d'eau, température, salinité, densité), l'état biogéochimique (chlorophylle, oxygène, production primaire...) et l'état des zones englacées aux hautes latitudes (couverture et mouvements des glaces en Arctique et Antarctique). Elles constituent des atouts majeurs pour le développement de l'économie bleue

ainsi que pour les recherches sur le changement climatique ou la biodiversité marine par exemple, notamment en région Occitanie, en dynamisant les filières avales spécialisées (environnement, transport, recherche, défense...). Ces informations aident, par exemple, à la compréhension de l'environnement océanique pour la future implantation des éoliennes flottantes du golfe du Lion* ou bien le routage optimisé (économie de carburant) pour la flotte de porte-conteneurs** desservant les ports de la Méditerranée. À ce jour, Mercator Océan a plus de 16 000 abonnés à travers le monde (fin 2018).

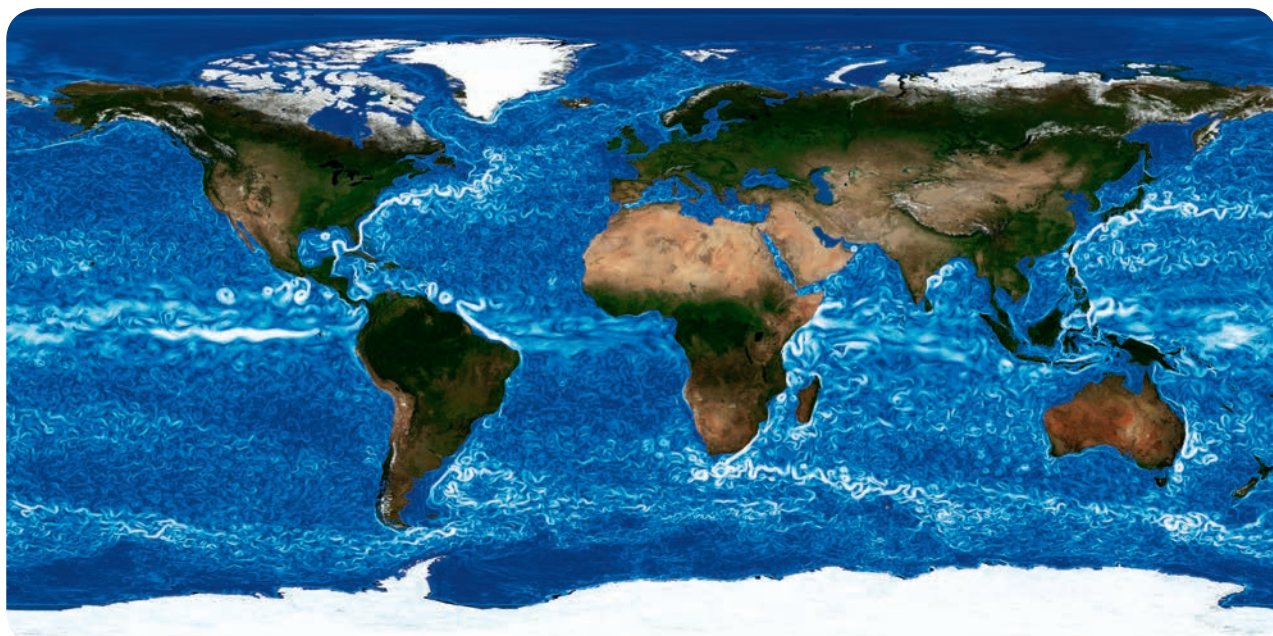
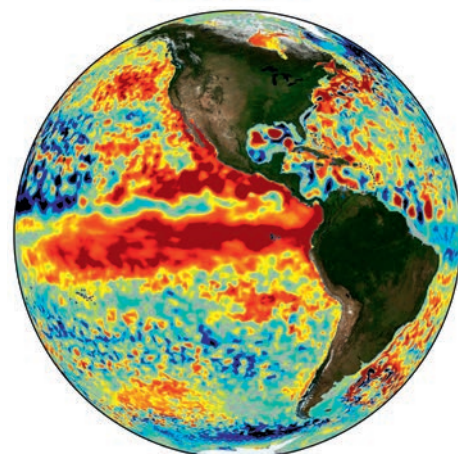
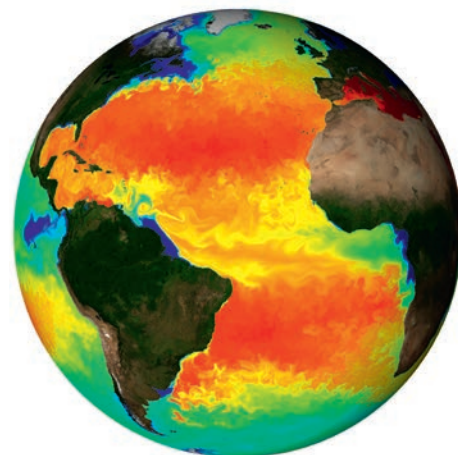
Contact (Mercator Océan International) :
L. Crosnier, laurence.crosnier@mercator-ocean.fr

Plus d'informations :
<http://marine.copernicus.eu>
*<http://marine.copernicus.eu/usecases/environmental-monitoring-offshore-wind-farm-offshore-leucate-mediterranean-sea/>
** <http://marine.copernicus.eu/usecases/ship-routing-save-fuel-reduce-co2-emissions/>

▲ *Carte de prévision de la salinité de surface pour le 29 mars 2018 issue du modèle global au 1/12°.* © EU Copernicus Marine Service/Mercator Océan

► *Carte du contenu thermique des océans calculé sur les 300 premiers mètres pour le 29 septembre 2015 (avec la signature du phénomène El Niño), issue du modèle global au 1/12°.* © Mercator Océan

▼ *Carte de prévision des courants de surface pour le 29 mars 2018, issue du modèle global au 1/12°.* © EU Copernicus Marine Service/Mercator Océan



HOMONIM : améliorer l'anticipation des submersions marines sur les côtes françaises

À Toulouse, le Shom travaille à la mise au point scientifique, technique et opérationnelle des modèles d'océan et d'état de la mer à la côte. L'objectif est de disposer d'outils numériques de prévision de l'état physique de l'océan, afin de réaliser des produits et services océanographiques à valeur ajoutée au profit des armées et des acteurs de la politique publique maritime et du littoral. Face à une demande sociétale croissante de prévention des risques naturels littoraux, les équipes ont été chargées, par la Direction générale de la prévention des risques et celle de la Sécurité civile et de la gestion des crises, d'améliorer les capacités de prévision des surcotes et des vagues à la côte, à l'origine de submersions lors de tempêtes ou d'ouragans. Ces études s'appuient aussi sur la progression régulière des performances des supercalculateurs. Depuis 2012, dans le cadre du projet HOMONIM*, de nouveaux modèles de surcotes et de vagues sont développés, de façon cohérente au regard des prérequis d'un système opérationnel de

prévision :

- la maturité académique des modèles : prise en compte des processus physiques, couplage, méthode numérique de résolution, études paramétriques, tests de non régression, etc. ;
- la disponibilité des informations « socle », telles que la bathymétrie ou la sédimentologie, à la résolution visée pour la modélisation ;
- la disponibilité d'observations temps réel (marégraphes, bouées, satellites,...) pour la validation des modèles ;
- un coût calcul de mise en œuvre compatible avec une exploitation en temps réel.

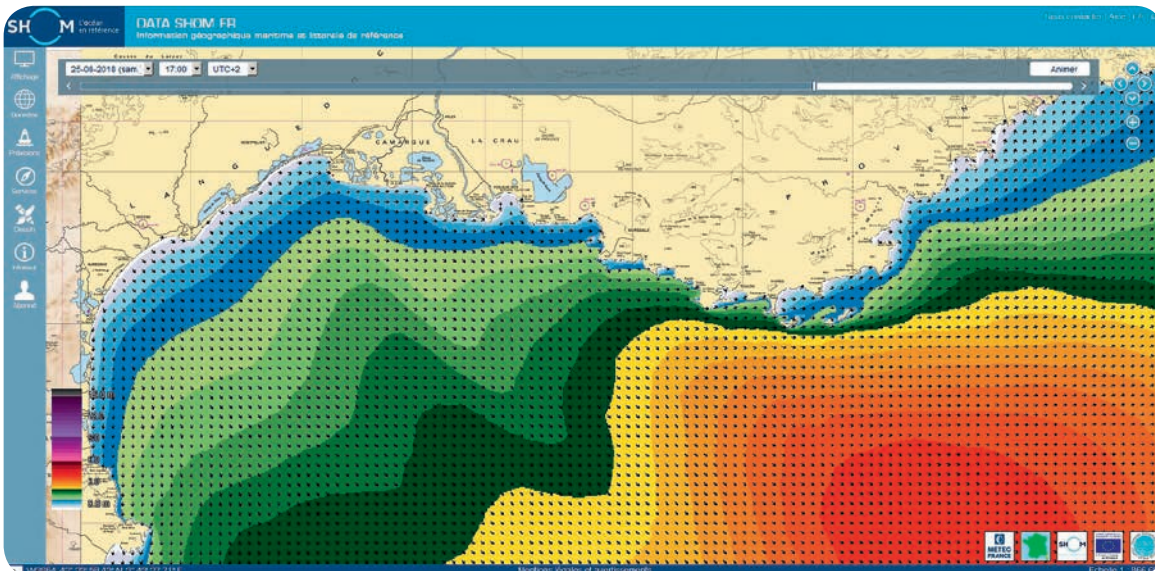
Les modèles sont évalués sur leur précision à reproduire les hauteurs d'eau, les surcotes et les caractéristiques des vagues observées lors des tempêtes passées. Chaque nouvelle configuration s'est avérée plus performante pour prévoir les niveaux d'eau atteints lors de ces événements extrêmes de référence. Les nouvelles configurations sont intégrées

régulièrement aux chaînes opérationnelles de prévision temps réel de Météo-France afin de fournir aux prévisionnistes, plusieurs fois par jour, les informations nécessaires à l'analyse du risque de submersion sur les côtes métropolitaines et outre-mer, et à la définition du niveau de la vigilance vagues-submersion. Réalisé en partenariat avec Météo-France, le projet profite des nombreuses autres coopérations que le Shom entretient en région avec l'OMP (LEGOS et LA), l'Institut de Mathématiques de Toulouse et Mercator Océan.

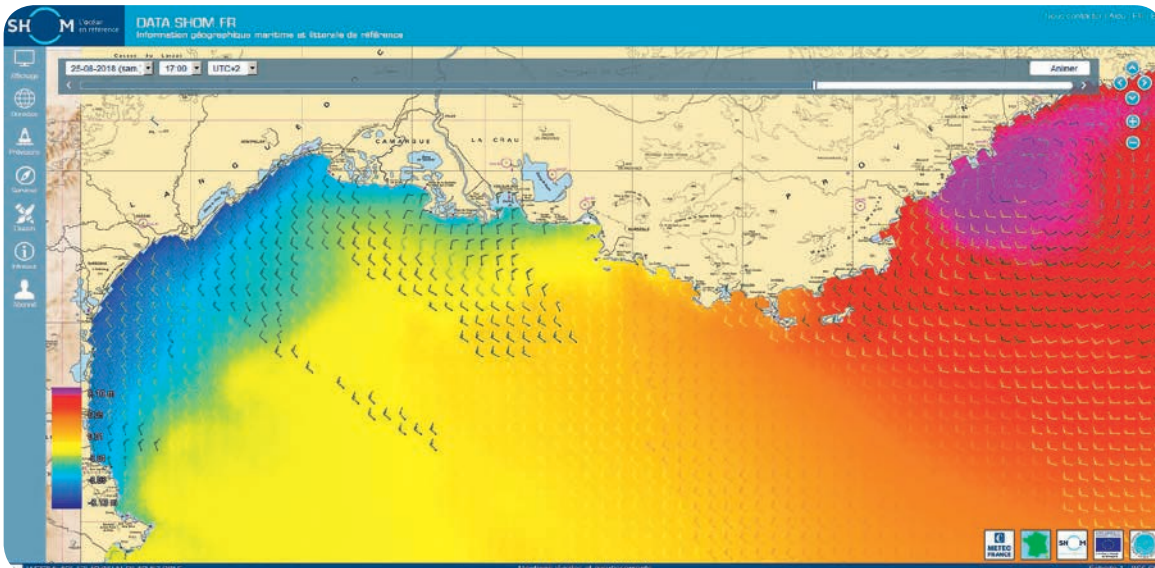
Contacts (Shom) : A. Pasquet, audrey.pasquet@shom.fr,
H. Michaud, heloise.michaud@shom.fr
et D. Jourdan, didier.jourdan@shom.fr

Plus d'informations : data.shom.fr

* Projet HOMONIM : Historique, observation, modélisation des niveaux marins.



▲ Exemple de prévision de la hauteur significative des vagues (m) du 25/08/2018 00h pour 15h GMT. La hauteur est faible le long des côtes (< 10 cm) dans le fond du golfe du Lion, favorisée par un vent et une houle dirigés vers le large. Dans le coin SE de la zone, l'état de la mer est pleinement développé sous l'effet du vent soutenu et établi (60 à 65km/h) et la hauteur des vagues atteint 4,3 m. © Shom et Météo-France (Résultats du projet Homonim)



▲ Exemple de prévision des décotations/surcotes (m) du 25/08/2018 00h pour 15h GMT. Les valeurs varient de -10 à +10 cm le long des côtes dans des conditions de vent frais en direction du large (Tramontane 40 à 45km/h) sur le golfe du Lion et une cellule faiblement dépressionnaire sur la côte provençale (1004 hPa et vents cycloniques) propice à une légère accumulation d'eau à la côte (+ 10cm). © Shom et Météo-France (Résultats du projet Homonim)

Le soutien en océanographie au profit de la Défense opéré depuis Toulouse

La cellule « Prévisions opérationnelles » (PrevOps) du Shom assure quotidiennement l'élaboration des produits océanographiques et acoustiques temps réel au profit du ministère des Armées. Les progrès scientifiques réalisés sur les forçages météorologiques utilisés et sur les techniques d'assimilation de données ainsi que la compréhension des processus physiques et leur modélisation numérique toujours plus approfondie contribuent fortement à une meilleure prévision opérationnelle de l'océan. De plus, les évolutions technologiques ont augmenté les puissances de calculs et, par là même, la fréquence de réactualisation des sorties de modèles, le nombre et l'étendue géographique des prévisions. Ainsi, la production

océanographique de la cellule PrevOps couvre aujourd'hui, depuis Toulouse, l'ensemble des bassins océaniques de la planète. En outre, afin de répondre aux exigences opérationnelles des forces armées, le centre de fusion de données du Shom (CFuD) assure ses activités sans interruption tout au long de l'année pour répondre aux différents besoins dans les plus brefs délais possibles.

La cellule PrevOps élabore **un grand nombre de produits à valeur ajoutée au profit de la Défense afin de répondre aux besoins variés des forces déployées sur les théâtres d'opérations**, (milieux amphibies, lutte sous la mer, guerre des mines, etc.). Le catalogue disponible est composé de paramètres

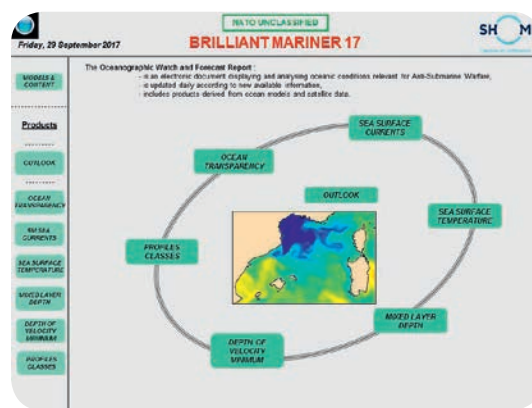
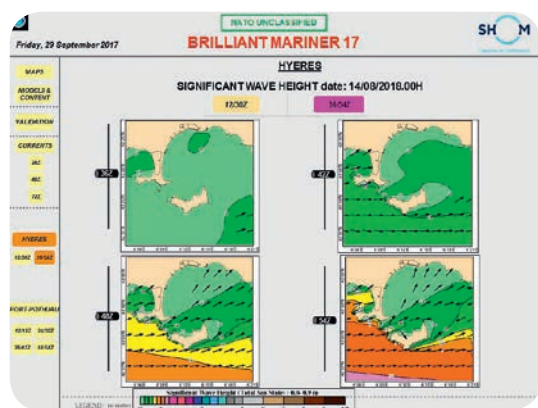
océanographiques classiques (prévision à 3 jours des températures de surface de la mer, courants marins horizontaux, etc.) ou de produits élaborés (bulletin commentant et qualifiant la situation océanographique pour la lutte sous-marine, etc.). Pour cela, le CFuD traite des données issues des systèmes de prévision haute résolution 3D régionaux développés et opérés par le Shom ainsi que des prévisions océanographiques et météorologiques globales délivrées par Mercator Océan et Météo-France.

Contacts (Shom) :

C. de Nicola, cyrille.de.nicola@shom.fr

et C. Lucion, christel.lucion@shom.fr

Plus d'informations : data.shom.fr



◀ **Bulletin océanographique et amphibie fourni pour l'exercice Brilliant Mariner 2017.** © Shom

WMCI, un service d'analyse de prévision des états de la mer pour l'optimisation des routes de navires

Comment connaître l'exactitude des prévisions des états de la mer, puis décider et planifier les opérations en mer, réduire les risques techniques, humains, matériels et environnementaux ? Pour répondre aujourd'hui à cette question, il n'existe aucune solution simple ni globale. La plupart des opérateurs maritimes utilisent les modèles de prévision des états de la mer afin d'être informés sur les hauteurs des vagues et les conditions en mer. Ils ont accès aux mesures effectuées par des centaines de capteurs (des bouées) des principaux instituts océanographiques à travers le monde ou aux mesures des satellites altimétriques. Or, à ce jour, il n'existe pas de solution en ligne qui rassemble toutes les informations sur les états de la mer et qui fournisse aussi, à toute la filière maritime, une multitude d'informations complètes concernant les hauteurs des vagues.

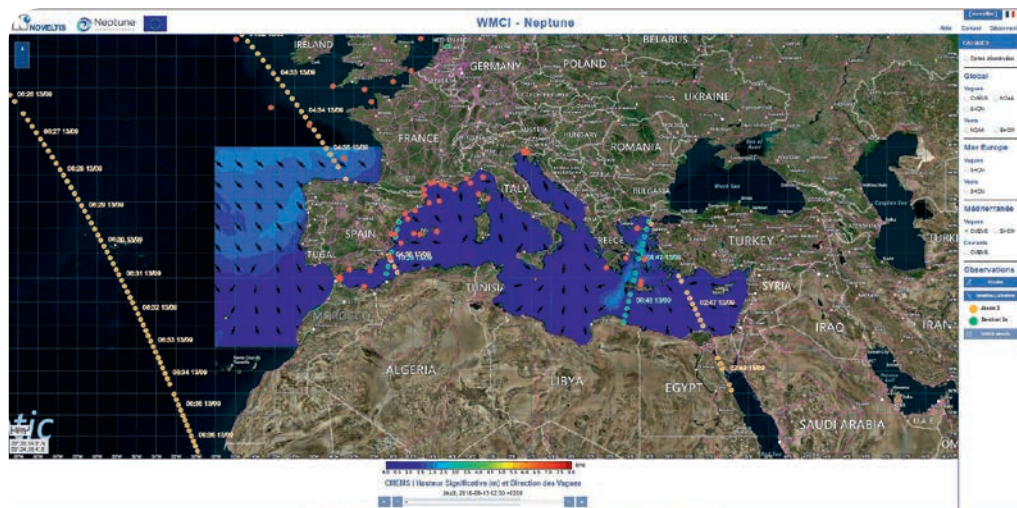
Le service WMCI (Wave Model Confidence Index) de NOVELTIS apporte une aide opérationnelle à l'ensemble des acteurs de la filière maritime pour la planification et l'optimisation de leurs activités en mer. Ce service, né des nombreux échanges et des multiples réflexions menés entre les opérateurs en mer et NOVELTIS, offre une intégration unique et expertisée de l'ensemble des données de mesure, facilitant ainsi leur exploitation

mutuelle et leur comparaison aux modèles de prévisions de vagues les plus utilisés. **Le site web WMCI* est dédié à la prévision de l'état de la mer et des risques en mer. Il permet de visualiser différents paramètres météo-océaniques issus de différents modèles de prévision pour différentes zones du globe et de les comparer aux observations in situ (bouées, ships watch reports) et aux mesures satellitaires (cf. ci-dessous).**

Contact (NOVELTIS) :

R. Bru, richard.bru@noveltis.fr

* Plus d'informations : <https://wmci.noveltis.fr>



▲ **Interface WMCI : prévision de l'état de la mer en Méditerranée. Les points rouges indiquent les positions des bouées. Les points jaunes et verts indiquent les traces satellites (Jason-3 et Sentinel-3A).** © NOVELTIS

IPS, un service de prévision de la marée en ligne

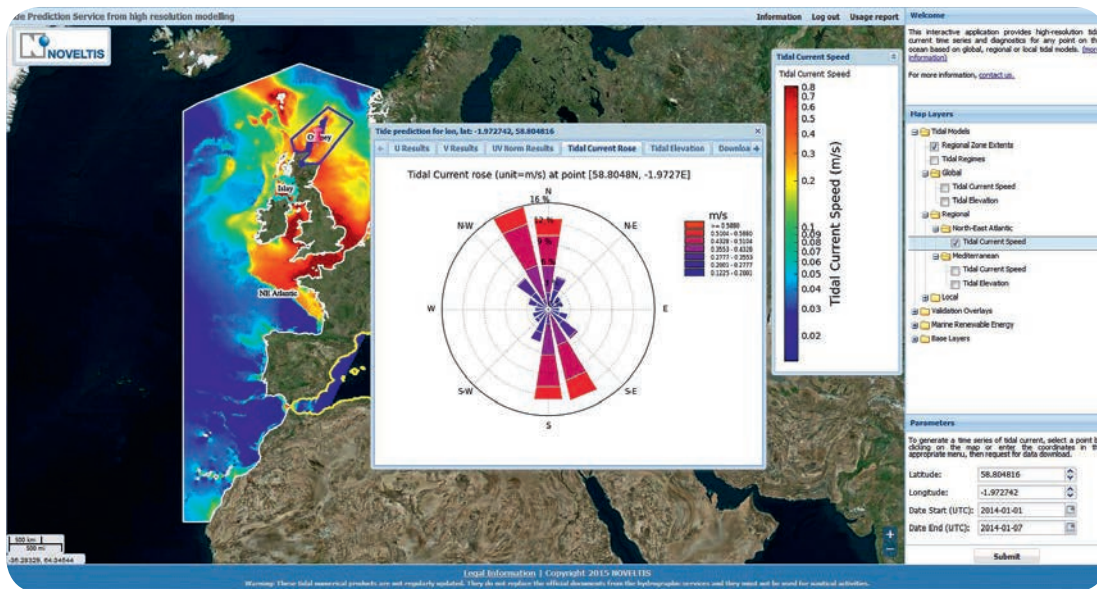
NOVELTIS promeut depuis plusieurs années des méthodes d'amélioration des produits altimétriques en zones côtières à l'aide de modèles régionaux de marée plus adaptés que les modèles globaux de modélisation des processus côtiers. NOVELTIS a ainsi développé plusieurs atlas régionaux, en particulier sur la façade nord-est Atlantique et sur la Méditerranée. Ces atlas nouvelle génération – du fait de la correction par les données satellitaires altimétriques – sont plus performants

que les atlas actuellement disponibles au niveau international. Ainsi, **NOVELTIS met à disposition, depuis 2012, à l'ensemble de la filière maritime, le service en ligne TIPS qui fournit sur l'ensemble des mers du globe des prévisions des courants de marée et des diagnostics d'énergie marémotrice à la demande.** Ce service est fondé sur les modèles de marée développés par NOVELTIS les plus récents et il sera progressivement enrichi avec d'autres modèles de marée régionaux ou locaux.

Grâce à ce service, NOVELTIS est régulièrement sollicité pour son expertise sur la marée par des utilisateurs finaux très variés : opérateurs spécialisés en travaux maritimes, transporteurs maritimes, sociétés de service, développeurs de projets d'énergie marine renouvelable, etc.

Contact (NOVELTIS) :
R. Bru, richard.bru@noveltis.fr

Plus d'informations : <http://tips.noveltis.com>



◀ Interface web TIPS. © NOVELTIS

SAVaS, premier service au monde de prévision des vagues extrêmes pour la filière maritime

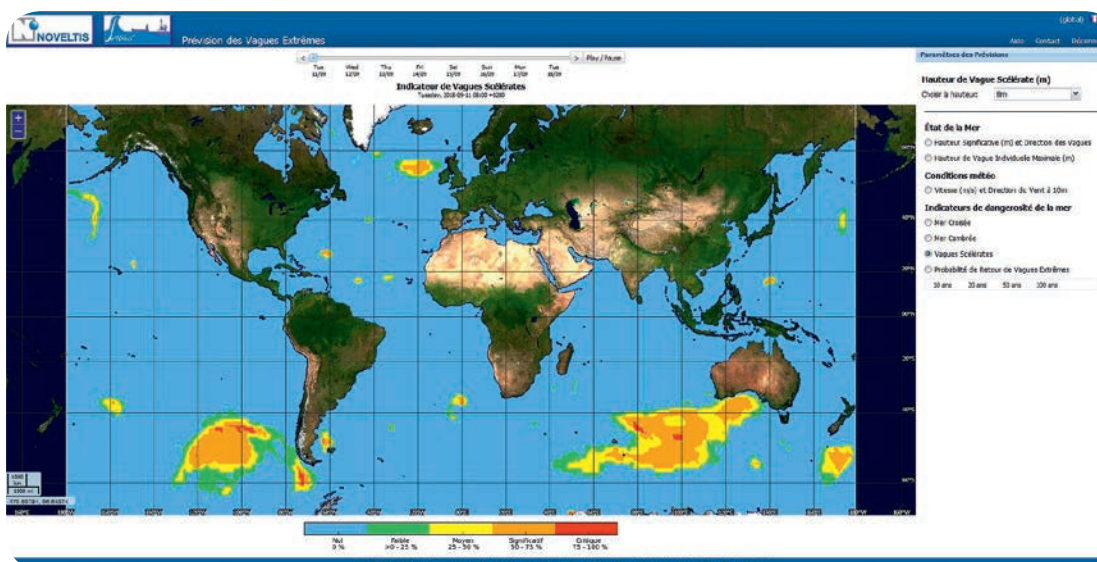
Le service opérationnel SAVaS de NOVELTIS est une première mondiale pour la prévision de l'état de la mer et l'alerte sur les risques de vagues extrêmes et scélébrates. Ce service a été développé avec le support de la Direction générale de l'Armement et a été validé avec la Marine nationale lors de plusieurs campagnes en mer. **SAVaS offre une protection continue et sur mesure pour tous les acteurs civils et militaires impliqués dans l'environnement marin. Il fournit des prévisions à 7 jours d'indicateurs synthétiques prenant en compte la taille**

des navires et des plateformes offshore pour adapter l'évaluation des risques en fonction de leur vulnérabilité. Les prévisions sont produites à différentes échelles spatiales et temporelles et sont mises à jour toutes les 6 heures. Les informations fournies par SAVaS sont fiables, précises, rapides et faciles à utiliser. Le service SAVaS est opérationnel dans le monde entier. Il ne nécessite aucune installation de logiciel par l'utilisateur final et est accessible par différents moyens : une interface de cartographie en ligne personnalisable et facile à utiliser et des bulletins quotidiens préparés par les prévisionnistes

de NOVELTIS qui transcrivent les indicateurs SAVaS. Le site web SAVaS dédié à la prévision de l'état de la mer et des risques en mer est un service payant. Il permet de visualiser différents paramètres météo-océaniques ainsi que des indicateurs d'évènements extrêmes en mer (mers croisées, mers cambrées et occurrence de vagues scélébrates, cf. ci-dessous).

Contact (NOVELTIS) :
R. Bru, richard.bru@noveltis.fr

Plus d'informations : <https://savas.noveltis.fr>



◀ Site web SAVaS : indicateur d'occurrence de vagues scélébrates. © NOVELTIS

Un observatoire de l'évolution et de la compréhension du trait de côte

La côte sableuse catalane est une unité hydrosédimentaire de 44 km orientée nord-sud, s'étendant de la plage du Racou (Argelès-sur-Mer) au Cap Leucate et constituant la bordure littorale de la plaine du Roussillon. À la fois basse et très aménagée, cette côte est très vulnérable aux tempêtes marines et aux aléas associés d'érosion côtière et de submersion marine. Aussi, Perpignan Méditerranée Métropole (dont les quatre communes côtières couvrent 23 km de ce linéaire) et la commune de Leucate ont initié, avec le soutien de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et le BRGM, une démarche de suivi du littoral afin de mieux comprendre son évolution et, *in fine*, mettre en œuvre une gestion cohérente et intégrée de ce territoire. À cette fin, l'observatoire de la côte sableuse catalane, créé en 2013, a pour objectifs de se doter d'un outil d'observation du littoral sableux, d'un socle solide de connaissances et d'un outil d'aide à la décision afin de mieux appréhender la dynamique côtière et les risques côtiers en lien avec les activités humaines et les interactions entre le bassin versant et la mer. Ses missions sont (i) le suivi du littoral (collecte des données), (ii) la mutualisation de l'information (bancairisation des données), (iii)

l'analyse des phénomènes et la formulation de recommandations (interprétation des données) et (iv) la communication (diffusion des données au plus grand nombre). Sur la base des suivis réalisés et de la compréhension de la dynamique côtière, **l'observatoire aide ainsi à formuler des recommandations pour mettre en œuvre la restauration et la gestion cohérente du milieu littoral.**

Contact (BRGM) : Y. Balouin, y.balouin@brgm.fr

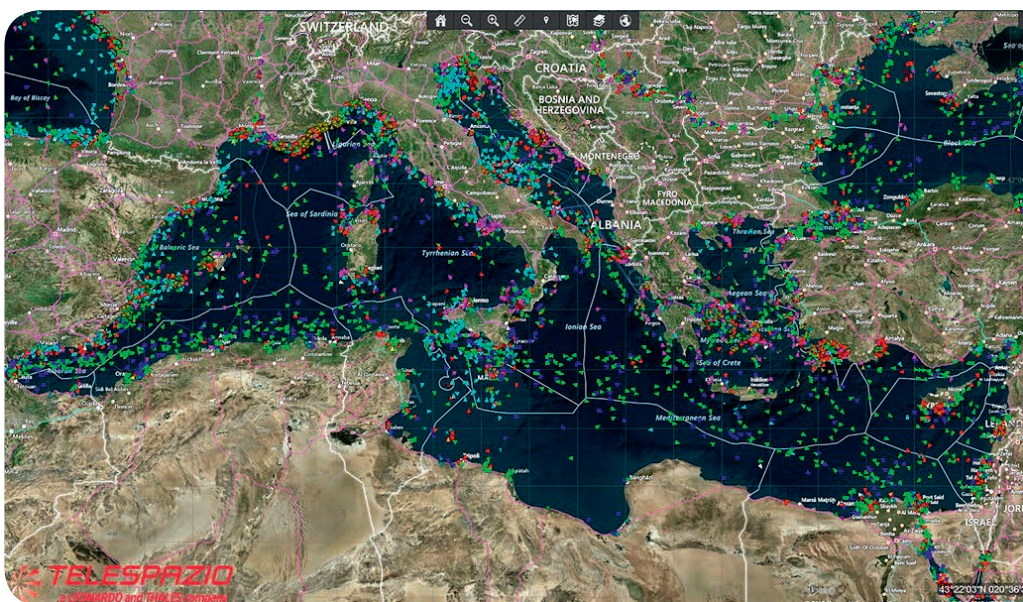
Plus d'informations : <http://obs.cat>

▼ Suivi bathymétrique de l'embouchure de l'Agly en mars 2017. © ObsCat-BRGM



Du suivi satellitaire des espaces maritimes au « cloud de la mer »

Le suivi des espaces maritimes est nécessaire à de nombreux acteurs : le secteur privé pour suivre leurs activités économiques en mer, le secteur public pour les missions des États en mer (contrôle de la pêche, sécurité et sûreté maritime, etc.)... L'usage de l'imagerie satellitaire s'est rapidement intensifié lors de la dernière décennie en raison du déplacement des menaces en haute mer (jusqu'alors plutôt confinées à proximité des côtes) et en raison des capacités satellitaires offrant aujourd'hui à l'utilisateur des images à haute résolution à moindre coût. En quelques années, Telespazio France, filiale des sociétés Thales et Leonardo, est devenu leader du domaine en France. Telespazio France a d'abord été opérateur au profit de la Marine nationale française, en partenariat avec Airbus, pour surveiller les 10 millions de km² de la zone économique exclusive française (service Trimaran, cf. article suivant). Pour la Direction des Affaires maritimes, Telespazio France a également mis en place le nouveau service de surveillance maritime assisté par imagerie satellitaire issue de Sentinel-1 et 2. À la demande du Secrétaire général de la Mer et en partenariat avec l'Institut de recherche de l'École navale (IRENav), Telespazio France développe une nouvelle génération d'algorithmes pour la surveillance maritime, fondée sur l'intelligence artificielle, combinant plusieurs sources de données, et aux nombreuses applications : implantation et surveillance des champs d'éoliennes, pêche illégale, suivi des parcs marins, etc.



Aujourd'hui, **de nombreuses initiatives sont lancées autour du « cloud » de la mer, tirant profit des technologies du Big Data et du calcul haute performance, afin d'augmenter le niveau de connaissance de l'activité humaine et de ses impacts sur les océans, et, *in fine*, répondre aux nouveaux défis posés par l'intensification des échanges par voies maritimes et la fragilisation des écosystèmes dans un contexte de changement climatique avéré.** De nombreuses collaborations autour de ce

sujet d'avenir sont en construction, notamment avec l'UM pour le calcul intensif et l'optimisation des algorithmes d'apprentissage.

▲ Collecte des signaux AIS (Automatic Identification System) par satellite sur la Méditerranée. © Telespazio France

Contact (Telespazio France) : F. Marques, francois.marques@telespazio.com

La surveillance des pollutions par hydrocarbures

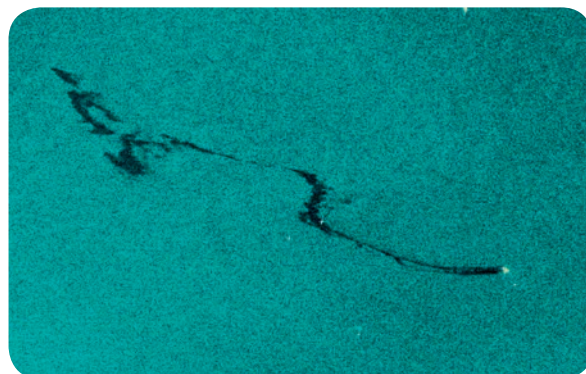
La pollution accidentelle ou volontaire par rejet d'hydrocarbures ou d'eaux de ballast en mer reste un phénomène répandu et très dommageable pour l'environnement. En observant n'importe quel point du globe, l'imagerie satellitaire peut apporter une réponse à l'échelle globale. Ainsi, plusieurs services aujourd'hui opérationnels visent en priorité à détecter les pollutions à des fins de gestion environnementale. C'est le cas du service Trimaran de la Marine nationale française, opéré conjointement par Telespazio France et Airbus DS, ou, à l'échelle européenne, du service CleanSeaNet mis en place par l'European Maritime Safety Agency, et qui s'appuie sur un réseau d'opérateurs. **Les grands opérateurs pétroliers utilisent cette technologie pour surveiller l'environnement autour de leurs installations en mer, mais également pour rechercher des rejets naturels d'hydrocarbures, en tant qu'indicateur de la maturité d'un gisement.**

En l'état actuel de la technique, ces services sont rendus principalement par analyse visuelle des images radar. Le phénomène observé provoque en effet une réflexion spéculaire du signal radar dans les images et apparaît telle une tache sombre dans l'image radar. Cependant, de nombreux autres phénomènes peuvent conduire à des taches similaires. Les chaînes de traitement automatique actuelles ne permettent pas de faire la distinction de manière fiable entre une nappe d'hydrocarbure et, par exemple, une zone déventée, un *upwelling* local ou un bloom planctonique. Afin de fiabiliser la détection automatique, Telespazio France, en partenariat avec l'Institut de recherche technologique Saint Exupéry, travaille sur une nouvelle génération de chaînes de traitements. Celle-ci sera fondée sur des méthodes d'apprentissage qui pourront mieux caractériser

la forme géométrique dans l'image radar, intégrer d'autres données, comme l'imagerie multi-spectrale à basse résolution et prendre en compte les données contextuelles (vents, courants, couleur de l'eau, etc.).

Contact (Telespazio France) :

F. Marques, francois.marques@telespazio.com



▲ Collision au large du Cap Corse entre un navire roulier et un porte-conteneurs, 7 octobre 2018. Image satellite SENTINEL-1. © ESA

Les technologies spatiales au service de la surveillance des pêches en Méditerranée

La société CLS, basée près de Toulouse et filiale du CNES et de l'Ifremer, est, depuis 1986, bien connue pour l'exploitation des balises ARGOS à bord des voiliers de compétition. C'est également un acteur reconnu à l'international dans le domaine de la surveillance des pêches. **CLS traite et analyse les positions et les captures de pêche collectées par des balises VMS (Vessel Monitoring System) installées sur plus de 16 000 navires dans le monde entier. En Méditerranée, les pêcheurs français au thon rouge sont équipés de ces balises. Leurs prises de pêche sont ainsi transmises par satellite et comptabilisées en temps réel par la Direction des pêches maritimes et de l'aquaculture (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation).**

L'ensemble du bassin méditerranéen est un enjeu majeur pour CLS qui intervient en support des États côtiers, des organisations régionales des pêches, et de l'Agence européenne pour la sécurité maritime (EMSA). Ainsi, CLS fournit le logiciel de contrôle de la pêche au thon pour la Commission Internationale pour la Conservation des Thonidés de l'Atlantique (CICTA). Via ce logiciel, il est possible d'afficher les données issues de plus de 50 pays membres. CLS est également partenaire de la Commission générale des pêches pour la Méditerranée (CGPM) et de l'EMSA. Dans ce cadre, **CLS contribue à la détection d'activités de pêche illégale en combinant différentes sources d'informations satellitaires** incluant des images radar et de positions AIS (Automatic Identification System). Des outils analogues peuvent être utilisés pour surveiller les activités d'aquaculture en mer. À partir de données spatiales, CLS propose donc une gamme d'outils de surveillance des pêches

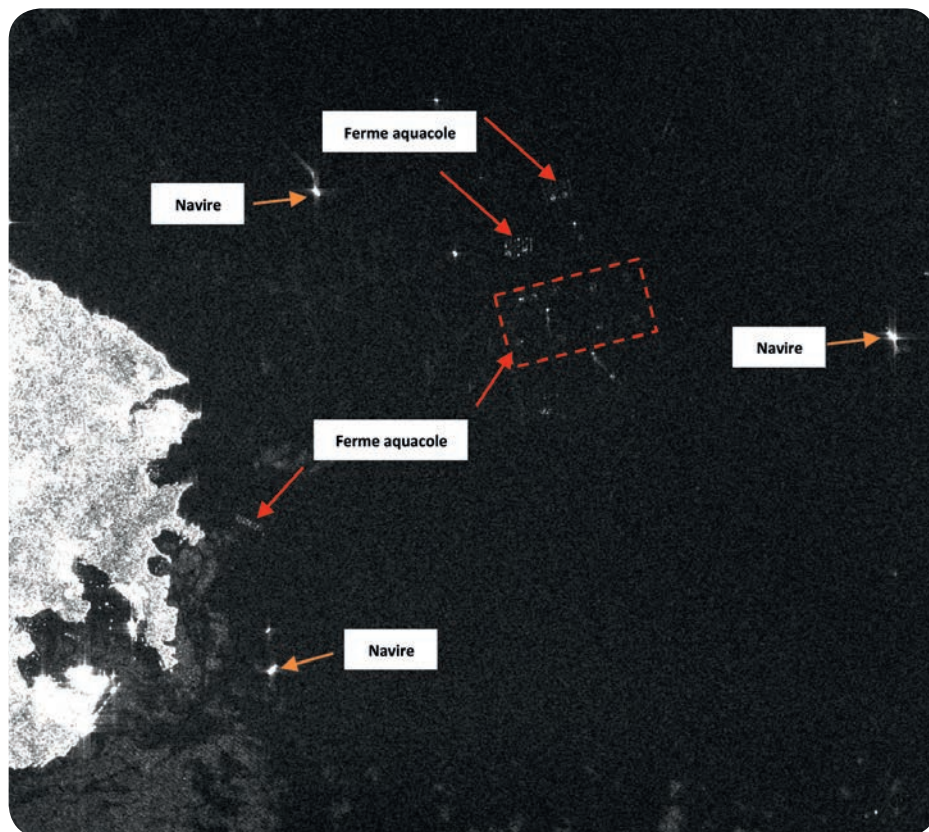
applicable aux activités des flottes industrielles et artisanales. CLS développe également des modèles d'estimation de stock (e.g. populations de thons) qui, couplés à des systèmes de contrôle efficaces, tendent à favoriser une exploitation durable des ressources halieutiques en Méditerranée.

Contact (CLS) :

J.-P. Cauzac, jcauzac@groupcls.com

Plus d'informations : <https://fisheries.cls.fr/fr/>

▼ Les satellites radar Sentinel-1 du programme Copernicus couvrent la Méditerranée avec des images à 10 m de résolution. Sur cette image prise le 25 juin 2018, on distingue la côte Est de Malte (à gauche de l'image), plusieurs cages à thon (formes géométriques plus brillantes au centre de l'image) et de nombreux navires de diverses tailles (points très brillants). Source : données Copernicus Sentinel modifiées et traitées par CLS.



Technologies et outils innovants

Développement d'outils innovants de suivi du trait de côte

La compréhension et la modélisation des risques côtiers se heurtent actuellement à une difficulté majeure : l'obtention de données *in situ*, en particulier lors des événements de tempête pendant lesquels le déploiement d'instrumentation reste difficile et risqué. Depuis quelques années, de nouvelles techniques de mesure ont permis d'améliorer la compréhension de la dynamique littorale. Des capteurs vidéo permettent aujourd'hui de caractériser et de quantifier des signatures optiques des morphologies et de l'hydrodynamique littorale, quelles que soient les conditions météo-marines. Ces nouveaux outils permettent de reconstituer la morphologie (topographie, bathymétrie)

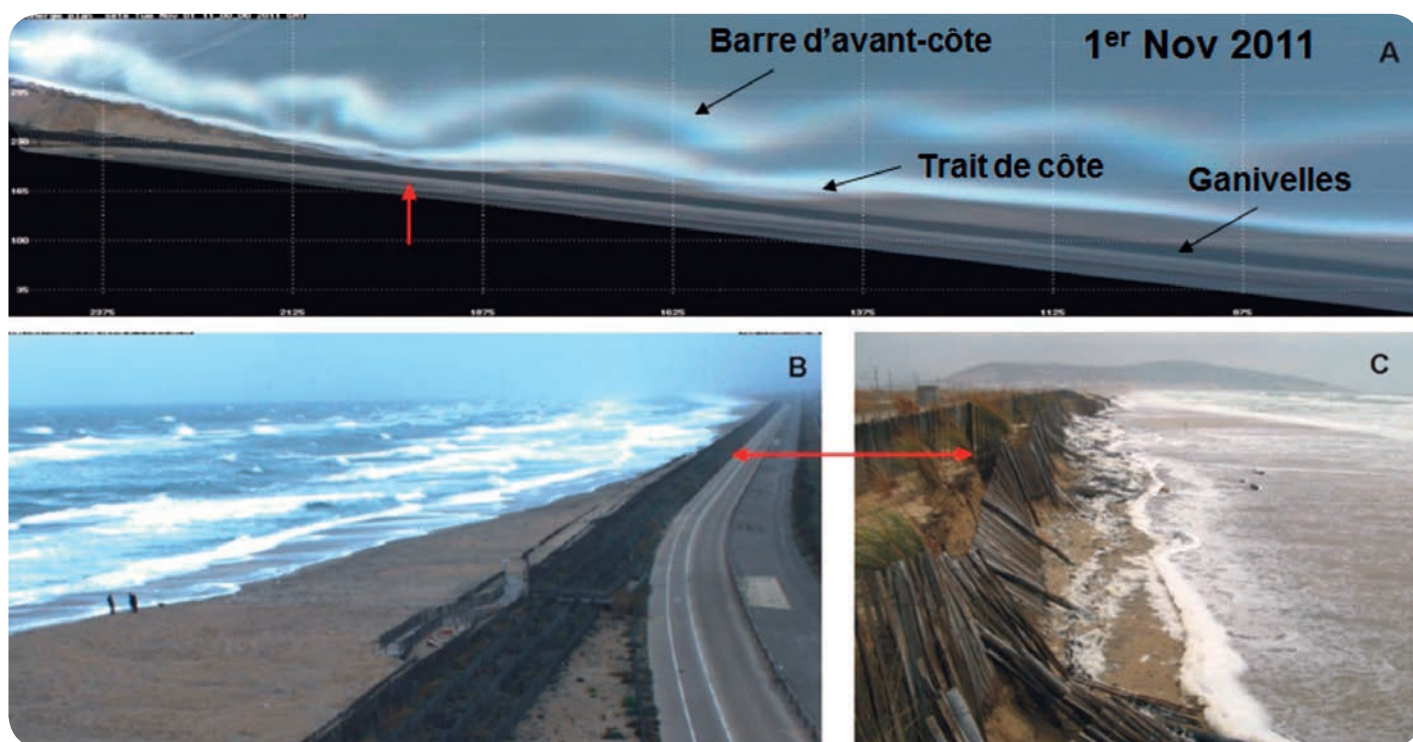
et les conditions d'agitation (houle, courants, vagues) et d'acquérir des données inédites sur les processus hydrosédimentaires. En Occitanie, deux systèmes permanents acquièrent en continu des informations depuis plusieurs années sur le Lido de Sète et sur la plage du Barcarès. Ces dispositifs s'intéressent notamment aux

mécanismes hydrosédimentaires induits par de nouveaux ouvrages de protection du littoral tels que les atténuateurs de houle (cf. ci-dessous). Les enjeux actuels résident dans l'assimilation de ces données dans les modèles numériques et dans le développement, en cours, de ces nouvelles techniques sur des capteurs mobiles (drones).

Contact (BRGM) : Y. Balouin, y.balouin@brgm.fr

Plus d'informations :

www.brgm.fr/projet/suivi-video-numerique-experimentation-techniques-protection-littoral-lido-sete-marseillan



▲ Suivi par vidéo du Lido de Sète à Marseillan lors de la tempête de novembre 2011.

© BRGM

A. Image ortho-rectifiée.

B. Même image brute.

C. Photographie de terrain.

Concevoir des outils pratiques, simples, directement opérationnels
au service des gestionnaires de la mer et du littoral.

Des atténuateurs de houle pour lutter contre l'érosion des plages

La protection du Lido de Sète à Marseillan par des géotubes atténuateurs de houle est une illustration des solutions innovantes proposées par BRL Ingénierie (BRLI). En 50 ans, l'érosion marine a fait perdre près de 50 ha à cette bande sableuse de 11 km de long et de 1 à 2 km de large. Un premier aménagement expérimental a été lancé en 2013 afin de reconstituer la plage près de Sète. Des géotubes – tubes en géotextile remplis de sable – ont été immergés sur près d'un kilomètre à 350 mètres du rivage. **Trois ans après, la plage a gagné une douzaine de mètres de large.** L'innovation, portée par BRLI avec l'appui de l'UM et du CNRS, est triple :

- invention du principe « d'atténuation de

houle » réduisant l'énergie apportée par les tempêtes en mimant l'efficacité naturelle des barres sédimentaires. Il s'agit d'une solution douce, durable et, si nécessaire, réversible, qui empêche, sans les reporter ailleurs, les problématiques d'érosion ;

- dimensionnement du géotube par calcul d'optimisation de forme (projet R&D COPTER*) ;
- utilisation de géotubes de très grande taille (6 m de large, 3 m de haut, 30 m de longueur) en remplacement des traditionnels enrochements.

Suite au succès de cette opération, la seconde tranche du projet a été confiée à BRLI en 2018 par Sète Agglopôle Méditerranée. Par ailleurs, BRLI exporte cette technique en Israël où le déploiement du dispositif est prévu fin

2018 pour protéger une plage touristique de Tel Aviv. BRLI est la filiale du Groupe BRL, lui-même membre du Parlement de la Mer de la Région Occitanie et spécialisé dans les domaines de l'eau, de l'environnement et de l'aménagement. BRLI, société de conseil en France et à l'international et membre du pôle de compétitivité Mer Méditerranée, met son savoir-faire au service des enjeux littoraux comme l'aménagement, la protection et une gestion durable de la bande côtière.

Contact (BRLI) : [N. Fraysse, dc.brli@brli.fr](mailto:N.Fraysse,dc.brli@brli.fr)

* Projet ANR COPTER : Conception et optimisation de forme contre l'érosion littorale.



▲ Atténuateur de houle en géotubes pour la protection de plages à Sète. © BRL/IGL

La vidéo au service de la gestion des risques littoraux

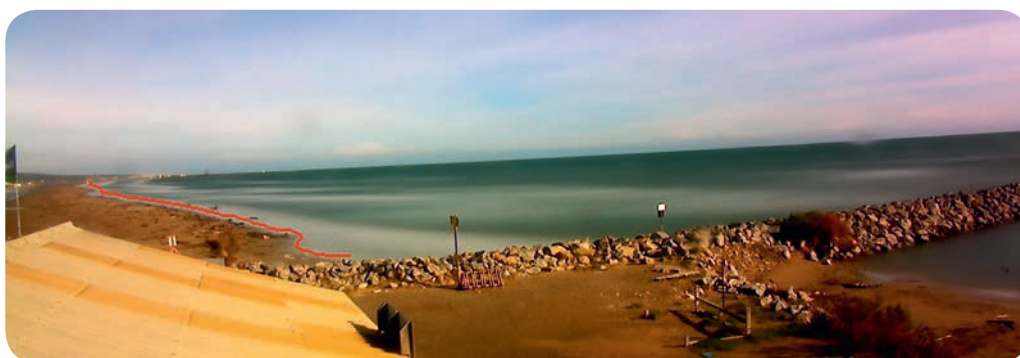
Pour les gestionnaires de littoraux, le coût écologique et économique de chaque décision d'aménagement du littoral nécessite une connaissance fine de la dynamique du milieu. Désormais, grâce à des images recueillies à l'aide d'une simple caméra vidéo, les scientifiques sont capables de surveiller les ressources sédimentaires des plages grâce au recueil continu de différentes données : évolution du trait de côte, topographie et bathymétrie, paramètres des vagues. Les caractéristiques mêmes du mode de recueil des données font l'avantage de ce système de mesure : en effet, **la vidéo permet un suivi à distance et, surtout, continu de l'évolution du littoral,**

primordial dans ce milieu à dynamique rapide. On peut ainsi connaître l'état de la plage à un instant t et suivre aussi son évolution sur le long terme ou lors d'événements extrêmes, et ainsi, in fine, comprendre la dynamique sédimentaire au niveau local.

Cette technologie aide à mieux appréhender les phénomènes d'érosion en anticipant les seuils critiques en termes de ressources sédimentaires ou encore en évaluant les tendances de reprise naturelle de la plage après une tempête. La gestion des risques inondation et submersion marine bénéficie aussi des apports de la mesure

vidéo : cette technologie permet d'obtenir des états de la mer ou encore les plus hauts niveaux de mer atteints au niveau local et à haute fréquence. À terme, elle pourra alors devenir l'alliée des prévisionnistes ou des systèmes d'alertes. Enfin, l'association de l'image à la mesure scientifique ouvre de belles perspectives pour la sensibilisation et la communication sur les risques littoraux.

Contacts (Waves'n See) : [A. Berger Sabbatel, amandine.berger@wavesnsee.com](mailto:A.Berger.Sabbatel,amandine.berger@wavesnsee.com)
et [Y. Soufflet, yves.soufflet@wavesnsee.com](mailto:Y.Soufflet,yves.soufflet@wavesnsee.com)



◀ Exemple de détection automatique de ligne d'eau pour un bilan post-tempête, plage de Gruissan, novembre 2014. © Waves'n See (SCOP Rivages)

La photogrammétrie : une méthode d'observation innovante pour l'étude et la conservation du milieu marin

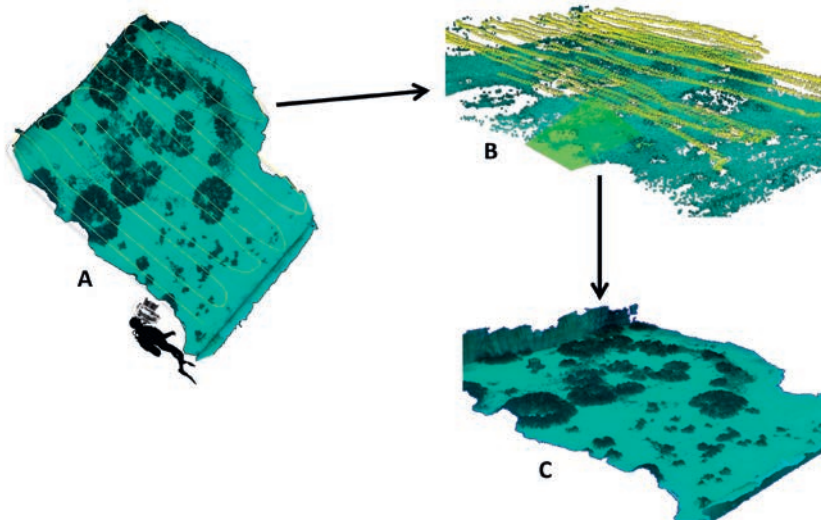
La société Andromède Océanologie, basée à Carnon, a développé depuis 2010, en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, des réseaux de suivi des écosystèmes côtiers les plus riches de Méditerranée afin de répondre aux exigences de la Directive cadre Stratégie pour le milieu marin. Afin d'améliorer ses méthodes d'observation, Andromède Océanologie a initié un projet de R&D sur la photogrammétrie sous-marine*, une technique innovante apte à reconstruire en 3D un objet ou un paysage à partir de photos 2D prises sous différents angles. Cette approche est encore peu répandue pour l'étude écologique du milieu marin.

L'objectif de nos travaux est de développer (i) des indicateurs fondés sur les modèles 3D et (ii) des méthodes intégrées pour le suivi automatisé de l'évolution des habitats marins et de leur biodiversité, depuis l'acquisition des données jusqu'à l'évaluation de leur état de santé. Une première phase méthodologique a consisté à quantifier et optimiser la précision de la méthode en fonction de l'acquisition (cf. fig. 1). Actuellement, nous travaillons à cartographier de manière automatique les zones d'herbiers de posidonie, un habitat fragile dont nous surveillons déjà les évolutions par télémétrie acoustique depuis 2010 (cf. fig. 2). En parallèle, nous étudions les corrélations entre des indicateurs de complexité structurale des récifs coralligènes et coralliens et des indicateurs de qualité écologique, afin d'élaborer des méthodes de mesure automatique de l'état de santé des récifs directement à partir de modèles 3D (cf. fig. 3). Enfin, l'ensemble des modèles et indicateurs 3D seront mis en ligne et exploitables par le reste de la communauté scientifique sur la plateforme cartographique MedTrix.

* Travaux réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE (collaboration TETIS/ISEM/LabCom InToSea/LIRMM).

Contacts : G. Marre (Andromède Océanologie/TETIS/ISEM), guilhem.marre@andromede-ocean.com, J. Deter (Andromède Océanologie/ISEM/LabCom InToSea), julie.deter@umontpellier.fr et F. Holon (Andromède Océanologie), florian.holon@andromede-ocean.com

Plus d'informations : www.andromede-ocean.com/photogrammetrie.html



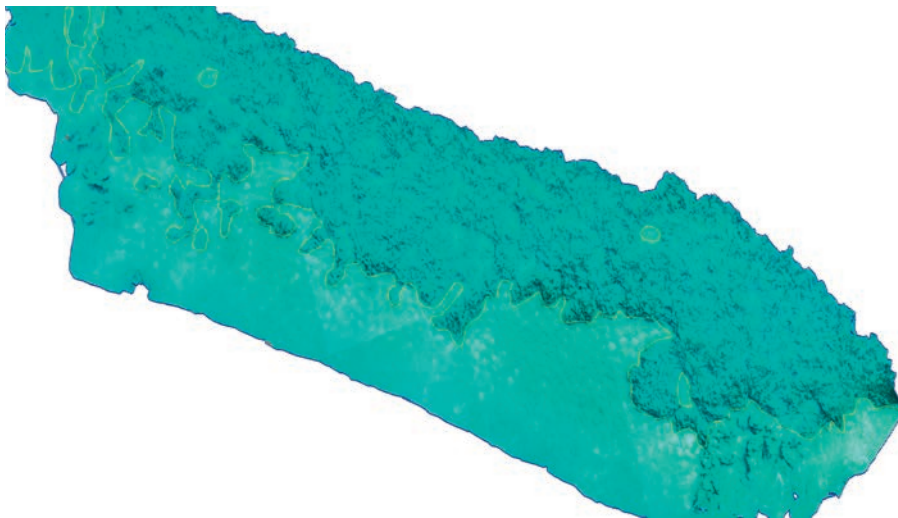
▲ Fig. 1. De l'acquisition de photos en plongée à la production du modèle 3D.

© Andromède Océanologie

A. Acquisition des photos par transects en plongée.

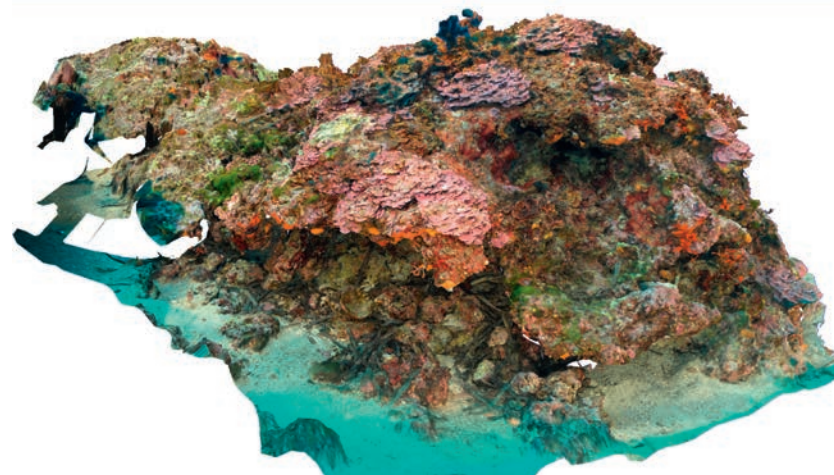
B. Alignement des images dans l'espace.

C. Production du modèle 3D texturé.



▲ Fig. 2. Modèle 3D d'un herbier de posidonie et cartographie de sa limite inférieure (Lion de mer, PACA).

© Andromède Océanologie



▲ Fig. 3. Modèle 3D d'un récif coralligène (rade de Bormes, PACA).

Des villages à poissons intelligents

BRL Ingénierie (BRLI), filiale du Groupe BRL qui a accompagné de nombreux programmes de récifs artificiels installés en Occitanie, a assuré la maîtrise d'œuvre de l'opération « Récifs Prado » lancée par la Ville de Marseille pour repeupler ses fonds marins. Ce projet, qui couvre plus de 220 ha, est le plus vaste réalisé en Europe et dans le bassin méditerranéen. Il a reçu en 2014 le grand prix du Génie écologique décerné par le ministère en charge de l'Écologie. Pour favoriser l'accueil d'une large biodiversité, BRLI a conçu une série de structures innovantes adaptées à diverses espèces. Près de 400 modules de formes diverses ont été immergés au sein de six « villages » répartis dans la baie du Prado.

Le projet a donné lieu à une large concertation préalable (élus et services de la ville, représentants de l'État, des métiers de la pêche, professionnels du tourisme, scientifiques, plongeurs, etc.) qui a permis d'obtenir l'adhésion des diverses parties prenantes. Le suivi scientifique, réalisé par le GIS Posidonie (groupement d'intérêt scientifique qui réunit des chercheurs et partenaires issus de laboratoires des Régions « Sud », « Occitanie » et « Corse ») a démontré le succès de l'opération. Les récifs sont désormais

totallement colonisés. Le nombre d'espèces de poissons a été multiplié par trois et la biodiversité a augmenté de plus de 30 % (nombre d'espèces). BRLI a assuré la maîtrise d'œuvre complète du projet : choix du site, phase de concertation, conception des récifs, études règlementaires et environnementales, maîtrise d'œuvre des travaux. Ses experts ont

également accompagné la Ville de Marseille pour l'organisation du premier colloque international des gestionnaires de récifs, qui a réuni en 2013 plus de 17 pays.

Contact (BRLI) : S. Fillon, dc.brli@brli.fr

▼ Récifs Prado, Marseille. Grand Prix du Génie écologique 2014. © Sandrine Ruitton



Fusion multimodale pour la cartographie en archéologie sous-marine

L'équipe « Explore » du département « Robotique » du LIRMM, propose de nombreux programmes applicatifs dédiés à l'exploration de l'environnement. Une composante forte est liée à la robotique marine et subaquatique, en association avec les biologistes marins, les hydrogéologues et

les archéologues. Le but de ces travaux de robotique est d'analyser des scènes sous-marines naturelles et, en particulier, de cartographier des environnements sous-marins en 3D. Il existe de nombreuses techniques pour résoudre ce problème. L'originalité de notre travail se trouve dans la fusion de deux cartes obtenues avec

des capteurs de différentes résolutions. Dans un premier temps, un engin autonome (ou un bateau) analyse les fonds marins avec un sonar multifaisceaux et crée une première carte globale de la zone. Cette carte est ensuite décomposée en petites cellules représentant une mosaïque du fond marin. Une deuxième analyse est ensuite réalisée sur certaines cellules particulières à l'aide d'un second capteur avec une résolution plus élevée. Une carte détaillée 3D de la cellule est ainsi obtenue. Un robot sous-marin autonome, ou un plongeur muni d'un système de vision stéréoscopique, effectue cette acquisition.

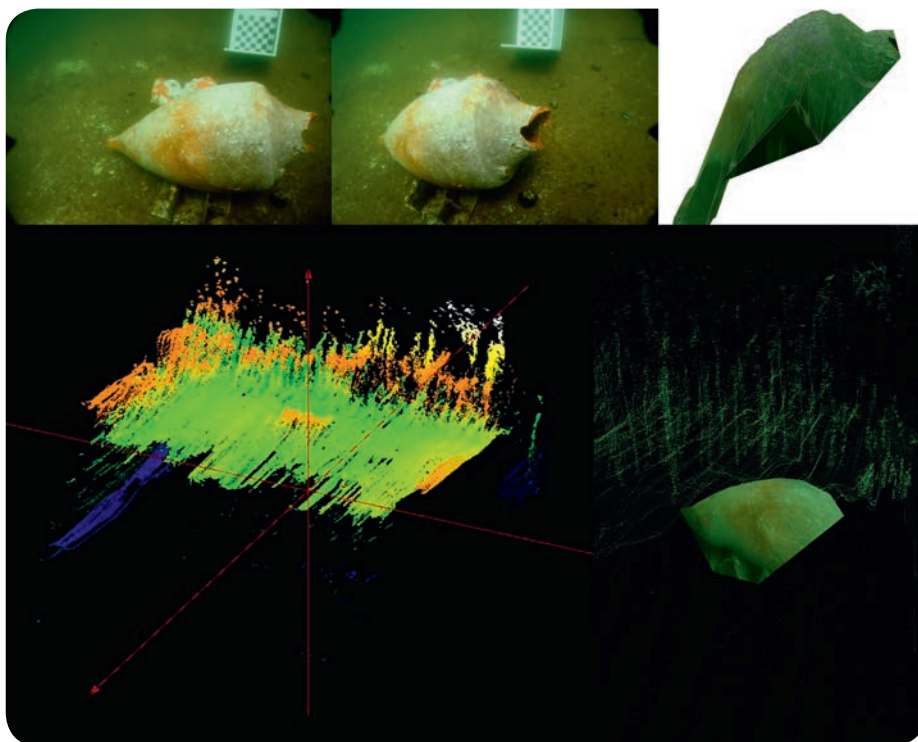
Ce projet se décompose en deux parties : la première s'intéresse à la reconstruction 3D de scènes sous-marines en milieu contraint à l'aide d'une paire stéréoscopique et la deuxième à l'aspect multimodal. Dans notre cas, nous voulons utiliser cette méthode pour obtenir des reconstructions précises d'objets d'intérêts archéologiques (statues, amphores, etc.) détectés sur la carte globale. Dans ce travail nous avons créé une carte 3D sous-marine multimodale réalisée à l'aide de modèles 3D « vidéo » et d'une carte acoustique globale.

Contact (LIRMM) : J. Triboulet, jean.triboulet@lirmm.fr

◀ En haut : paire stéréoscopique d'une amphore (à gauche) et modèle 3D de l'amphore (à droite).

En bas : carte sonar du site (à gauche) et superposition 3D/Sonar (à droite).

© J. Triboulet/LIRMM



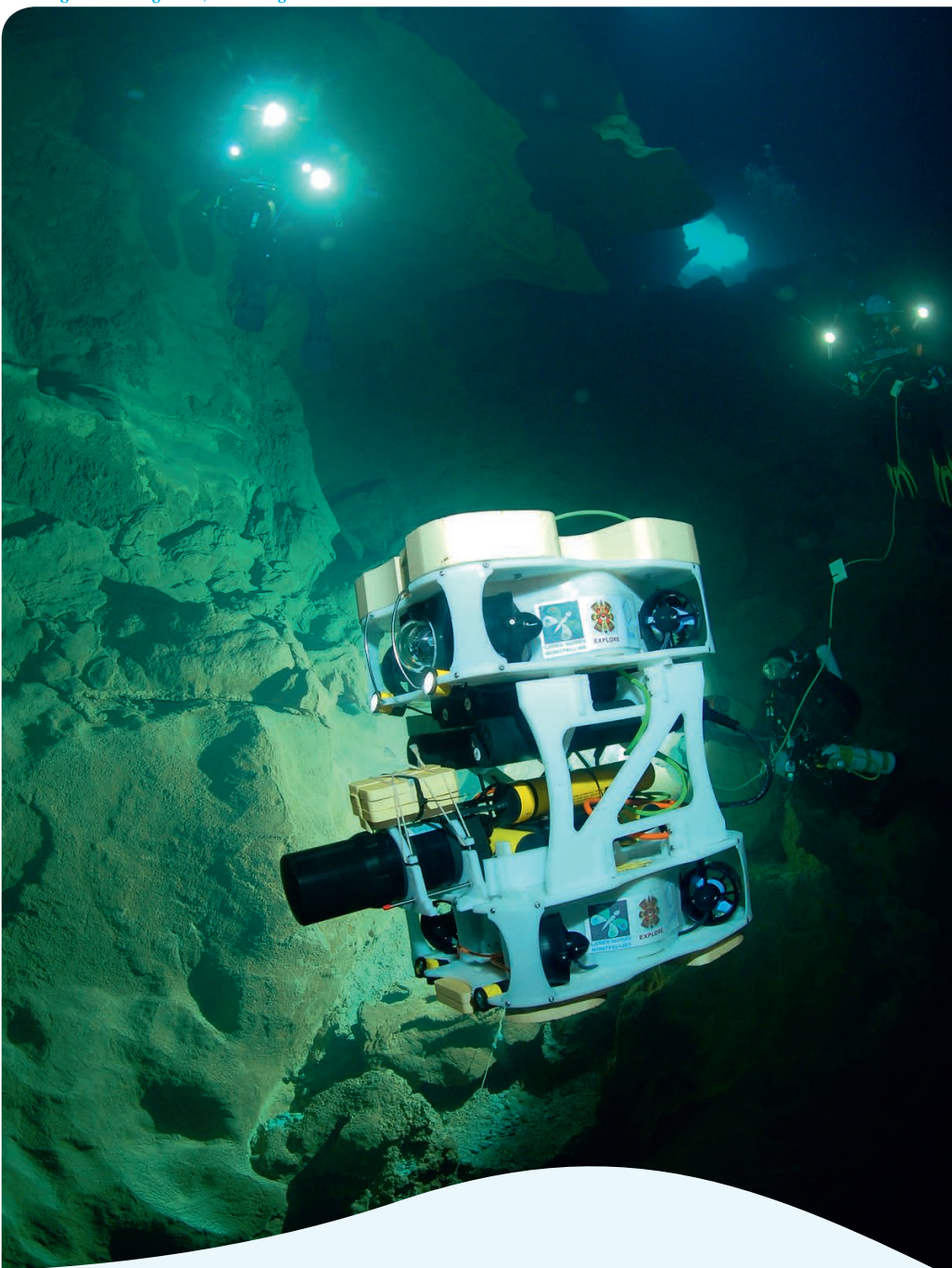
Robotique sous-marine pour l'exploration environnementale et le prélèvement

Dans le domaine de la robotique sous-marine, le LIRMM développe des méthodes visant soit à assister l'utilisateur pour le pilotage et la navigation, soit à rendre le système robotique complètement autonome durant certaines phases des missions. Dans les deux cas, un ordinateur exploite les données des capteurs (pression, cap, inclinaison, vitesse, sonar, *log Doppler*, caméras, etc.) pour automatiser partiellement, ou totalement, le pilotage du robot. L'aptitude à se localiser précisément est essentielle pour l'autonomie des robots, mais aussi pour la géolocalisation des données recueillies. Pour cela, le LIRMM propose des méthodes acoustiques ou visuelles innovantes et les applique aussi bien en mer que dans le contexte très contraignant des milieux confinés.

Les travaux du LIRMM portent également sur l'architecture informatique des robots et sur la commande, avec comme objectif commun d'offrir une garantie de performance à l'utilisateur et donc d'assurer la sécurité du véhicule et la précision des modèles reconstruits, aussi bien durant les phases autonomes que télé-opérées. Enfin, ses travaux portent sur le prélèvement d'échantillons et sur la manipulation sous-marine au moyen de préhenseurs spécifiques ou de mains robotisées. L'ensemble de ces travaux est appliqué régulièrement lors de campagnes de test dans les réseaux karstiques d'Occitanie (production de modèles 3D du réseau), sur des chantiers archéologiques profonds en Méditerranée (prélèvements d'objets et modélisation 3D, cf. page précédente) ou encore dans le lagon de Mayotte (comptage de poissons ou prélèvements biologiques). Les chercheurs du LIRMM fondent leurs développements robotiques sur les spécificités de chaque application, en collaboration étroite avec les utilisateurs (hydrologues, biologistes et archéologues). L'ensemble des expérimentations est accompli sous la supervision des spécialistes ou des autorités compétentes et dans le strict respect des réglementations (biologie, archéologie).

Contacts (LIRMM) : V. Creuze, vincent.creuze@lirmm.fr, K. Godary-Dejean, karen.godary@lirmm.fr et L. Lapierre, lapierre@lirmm.fr

▼ Robot sous-marin Ulysse explorant un réseau karstique.
Éclairage : Mehdi Dighouth, Manu Dugrenot. Photo : Frank Vasseur



Données géospatiales pour la gestion portuaire

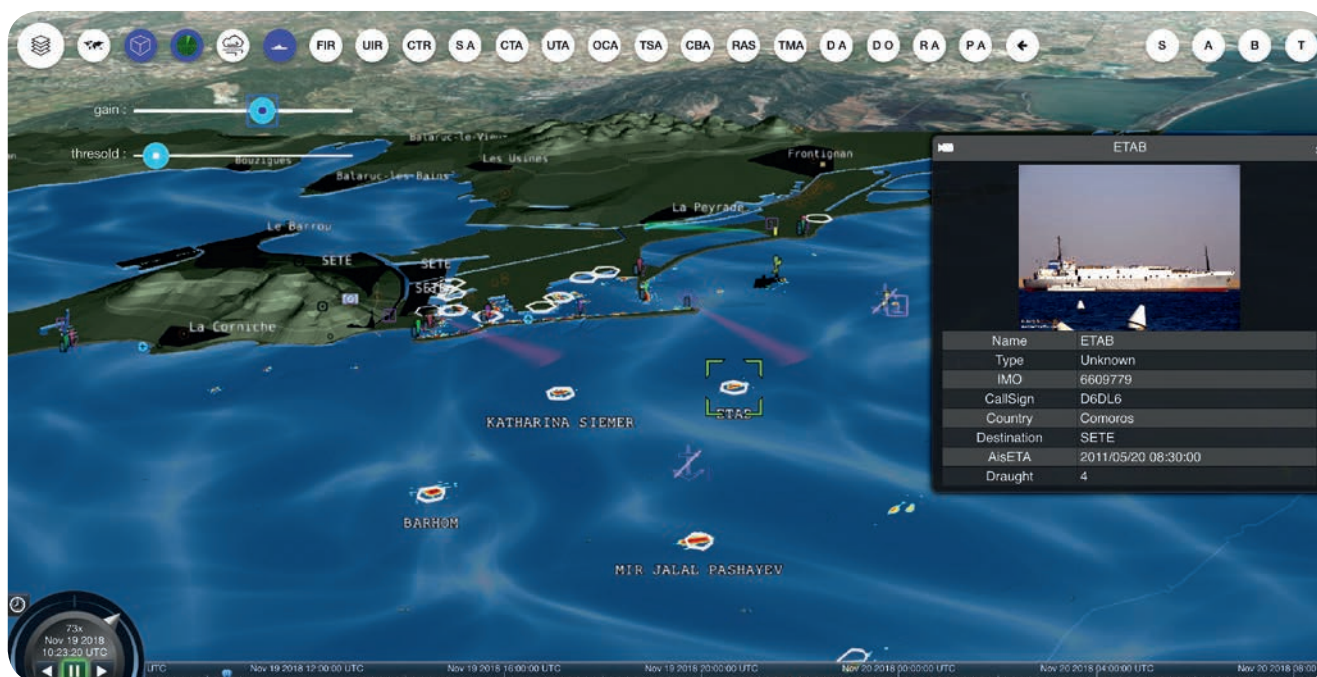
Geomatys développe depuis maintenant plus de dix ans des solutions de gestion, de traitement et de diffusion de données géospatiales. Fortement influencés par le monde maritime et les besoins en systèmes d'information qui en découlent, nous avons élaboré, au fil du temps, un environnement technologique unique apte à prendre en charge une grande part des formats multidimensionnels propres au monde océanographique et maritime plus généralement. Forts de cette expertise, dans le contexte actuel de l'augmentation constante des volumes de données scientifiques produites dans cette discipline, nous sommes parvenus à constituer une offre de traitement *big data* désormais employée par des acteurs majeurs du domaine, en France comme à

l'étranger. À ce titre, notre spectre d'intervention couvre différents axes tels que la télédétection, l'exploitation de modèles, la prise en charge et le traitement de données temps réel et historiques, la *DataScience* et la représentation de données complexes.

Notre champ d'expertise, associé à la réalisation d'un environnement technique très évolué, s'exerce plus particulièrement dans les domaines de l'environnement et la biodiversité, l'élaboration d'observatoires pour la conservation de la nature, la mise en place de systèmes d'information à vocation océanographique, mais également le développement de solutions à destination de zones portuaires ou la création de systèmes de conduite de missions pour le monde naval. Geomatys met l'ensemble des compétences

techniques préalablement citées au service du développement d'une solution de gestion et de supervision portuaire. Elle combine l'exploitation en temps réel de données de radars côtiers, de croisement avec des données AIS (*Automatic Identification System*), mais également d'exploitation de données météorologiques et océanographiques en mode prévision ou temps réel. **L'ensemble de ces informations ont pour objectif de s'intégrer dans une solution en réalité virtuelle afin de faciliter l'interprétation des phénomènes, et donc une prise de décision plus rapide et plus fiable.**

Contact (Geomatys) : V. Heurteaux, vincent.heurteaux@geomatys.com



▲ Copie d'écran du logiciel de couplage de signaux RADAR avec des pistes AIS sur le port de Sète. © Geomatys

Révolution numérique au service des transports maritimes et de la mer

Aujourd'hui la révolution numérique s'est emparée des bateaux. La technologie des navires à positionnement dynamique qui étaient une prouesse il y a encore quelques années est accessible à la plupart des navires commerciaux. Le bateau autonome est aujourd'hui une réalité, les premiers porte-containers sont prévus sur des lignes commerciales courtes, mais la tendance est lancée. Si la voiture autonome est capable de gérer les multiples aléas de la route, le navire autonome ne représente pas un challenge plus difficile, au contraire.

La prochaine étape sera certainement celle des bateaux « volants » ; c'est-à-dire des bateaux à foils régulés automatiquement. Réinventés par Éric Tabarly en 1980 et repris par l'*America's Cup* depuis 2013, les foils sont des ailes sous-marines dont la portance pousse la coque du bateau hors de l'eau et a pour effet de réduire considérablement la résistance à l'avancement du bateau, donc

d'aller aussi vite avec moins d'énergie. Si les foils sont maintenant utilisés dans tous les sports nautiques à voile, leur généralisation aux bateaux, à voile comme à moteur, nécessite qu'ils soient simples, accessibles et sûrs. Grâce aux avancées des sciences numériques, les prochains bateaux seront avec des foils dits de seconde génération qui, comme pour un avion sous pilote automatique, sont régulés en temps réel, donnant ainsi une stabilité parfaite à un vol au raz de l'eau. Sur le bateau, des capteurs de mouvement : cap, hauteur, vitesse, accélération, etc. envoient dans une unité centrale des informations traitées en temps réel par un algorithme performant et capable de contrôler la portance des foils via des actionneurs électriques. Le contrôle d'un bateau muni de 4 foils régulés devient ainsi très proche de celui des volets d'une aile d'avion, du décollage jusqu'à l'amerrissage. Cette technologie numérique avancée réduit de façon importante l'énergie nécessaire à l'avancement, jusqu'à pouvoir envisager des bateaux à propulsion électrique. Elle sera alors réellement bénéfique

pour l'environnement marin, avec des bateaux moins consommateurs de carburant fossile et bien plus silencieux sous la mer.

Contact (NEOCEAN) :
V. Dufour, vincent.dufour@umontpellier.fr



▲ Vue de l'OverBoat, le premier bateau électrique à foils régulés pour le grand public. De la taille d'un jet ski il est parfaitement silencieux, stable et consomme très peu d'énergie. © NEOCEAN



▲ © Joachim Hocine

Qu'est-ce que devient la démocratie si nous ne diffusons pas la culture scientifique ? [...] Le débat entre science et société est un grand débat de l'avenir. (Louis Malassis, fondateur d'Agropolis International, interview 2002)

Médiations innovantes et sciences participatives



Aujourd'hui, l'impact de l'homme sur la biodiversité marine ou terrestre n'est plus à prouver... Des espèces disparaissent, des continents de plastiques apparaissent, des écosystèmes se dégradent... Comment renverser ces tendances ? Il faut tout d'abord changer certaines de nos habitudes et de nos comportements, notamment ceux de tous les jours. La recherche joue ici un rôle essentiel pour connaître et comprendre ces enjeux, trouver des solutions et, *in fine*, induire de meilleurs comportements... Encore faudrait-il que ce savoir soit partagé par les citoyens ! C'est tout l'enjeu de la médiation scientifique.

La médiation scientifique (re)connecte le monde de la science au reste de la société en diffusant connaissances, idées, produits scientifiques, recommandations et savoir-faire. Cette « passerelle science-citoyen » a revêtu, à travers les âges, de nombreuses formes – depuis les cabinets des curiosités des 16^e et 17^e siècles jusqu'aux médias sociaux des années 2000 (*youtube, Facebook...*), en passant par les ateliers thématiques, expositions, vidéos, pièces de théâtre, etc. – qui donnent toujours l'occasion au grand public de faire le point de ses connaissances et de ses comportements mais aussi de s'approprier les solutions existantes ! La médiation scientifique implique ainsi des acteurs variés – musées, associations, laboratoires de recherche, etc. En Occitanie, plusieurs réseaux d'acteurs de la médiation scientifique existent – comme le Graine Occitanie et le Groupe Science Animation – qui mettent en place et animent des actions pour soutenir la culture scientifique, technique et industrielle en région et accompagner les acteurs dans ce développement.

Sans être exhaustive, la première partie de ce chapitre présente des exemples de médiation scientifique à travers des expositions grand public, qu'elles soient préparées par des chercheurs – comme l'exposition « Zostères, des prairies sous la mer » conçue par MARBEC – ou par des professionnels de la médiation (mais toujours en lien avec des scientifiques) comme l'exposition « Planète Mer » réalisée par Science Animation et Quai des savoirs. Conçu et animé par des scientifiques de toutes disciplines, le Train du climat représente une forme de médiation unique et originale en France, alliant exposition scientifique et conférences participatives itinérantes sur les enjeux liés au changement climatique. Des laboratoires publics de recherche dédient également des espaces de médiation, comme l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer avec son Biodiversarium. L'association Kimiyo développe quant à elle des démarches écotouristiques amenant les vacanciers à prendre conscience d'enjeux environnementaux sur leurs lieux de villégiature, œuvrant ainsi à un tourisme durable et respectueux de la nature. Le Seaquarium, un des pôles d'attraction touristique majeurs d'Occitanie, a même créé son propre Institut marin afin de partager les connaissances scientifiques avec les visiteurs de l'aquarium, mais aussi développer des projets de recherche impliquant les citoyens...

En effet, la médiation scientifique ne peut être dissociée des sciences participatives, objet de la 2^e partie de ce chapitre. L'apport de tout un chacun – qu'il soit expert ou débutant passionné de nature, scolaire ou professionnel de la mer – à la connaissance scientifique est aujourd'hui reconnu. En participant bénévolement à la récolte de grandes quantités de données, de façon répétée dans le temps et selon des protocoles simples répondant à des questions scientifiques – données que les chercheurs ne peuvent obtenir seuls ! –, tout citoyen peut aider la communauté scientifique dans ses recherches. Ces programmes de sciences participatives sont particulièrement utiles pour suivre le milieu naturel sur de grandes échelles géographiques et/ou de longues périodes comme, par exemple, pour suivre la biodiversité marine ou encore l'impact des changements climatiques sur l'environnement. Au final, ces nouvelles connaissances peuvent aider collectivités et gestionnaires d'espaces naturels à mettre en place des plans de gestion durable et/ou de préservation des ressources et de l'environnement. Par ailleurs, inciter les citoyens à suivre un protocole permet aussi de les sensibiliser, de les faire se questionner sur l'évolution de l'environnement.

Les exemples de programmes de sciences participatives présentés dans cette 2^e partie, sont conduits en partenariat entre des observateurs-citoyens et des laboratoires de recherche. Dans le domaine de la mer et du littoral, les Sentinelles de la mer Occitanie, réseau coordonné par le Centre permanent d'initiatives pour l'environnement (CPIE) Bassin de Thau, fédèrent les porteurs de programmes de sciences participatives en région dont plusieurs sont illustrés ci-après. Par exemple, « Cybelle Méditerranée » est l'un des rares programmes de suivi des animaux marins du large par des plaisanciers et des naturalistes experts. Autre exemple, « Diable de mer » recense les observations de cette espèce grâce à un réseau d'observateurs amateurs et professionnels de la mer sur tout le bassin méditerranéen. Le programme « Enquête d'Hippocampes » collecte des informations et entreprend des études écologiques de terrain sur deux espèces d'hippocampes avec la participation de plongeurs, pêcheurs et naturalistes amateurs. « Des espèces qui comptent » est un programme qui fédère plongeurs, apnéistes et pêcheurs sous-marins bénévoles pour réaliser des campagnes de recensement de trois espèces emblématiques de Méditerranée (mérout, corb et nacre). Par ailleurs, des structures dont la mission première est la préservation de l'environnement marin – comme le Parc naturel marin du golfe du Lion ou la réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls – développent aussi des sciences participatives associant scientifiques et citoyens bénévoles, pour suivre, par exemple, les populations de requins peau bleue, une espèce « en danger critique d'extinction » en Méditerranée selon l'UICN, ou encore pour réaliser des veilles écologiques d'espèces invasives. Enfin, l'histoire de la tortue « Louise » clôt ce chapitre, un autre exemple illustratif d'une action concertée multi-acteur associant professionnels de la mer, associations de conservation d'espèces protégées et établissements publics de recherche...

John Bandelier (Kimiyo)

Médiation autour de l'environnement marin

Science Animation, un acteur aux multiples facettes

Depuis plus de 30 ans, Science Animation développe et anime, avec ses partenaires scientifiques, industriels et éducatifs, des lieux, des événements, des communautés et des projets pour rendre accessibles à tous les sciences, les techniques et les innovations. Depuis 2017, **Science Animation coordonne un consortium d'associations* chargé par la Région Occitanie d'animer et de mettre en place des actions pour soutenir la culture scientifique, technique et industrielle (CSTI) en Occitanie et accompagner les acteurs dans ce développement.** Ces associations développent collectivement des ressources

itinérantes, montent des projets et animent l'ensemble du territoire. Depuis plusieurs années, Science Animation expérimente de nouveaux formats de médiation scientifique et technique, en s'appuyant notamment sur les nouvelles technologies, la co-création, les démarches participatives ou encore la culture du divertissement. En 2017, Science Animation

a coproduit avec le Quai des Savoirs une grande exposition sur l'océanographie : Planète Mer* (cf. page suivante). Dans le cadre de la série de portraits vidéo de chercheurs « Qui cherche... cherche », réalisée par Jacques Mitsch, Science Animation a produit en 2018 celui de Julie Deter, chercheuse en écologie marine à l'ISEM*.

Contact (Science Animation) : J. Langot, contact@science-animation.org

* **Plus d'informations :** www.science-animation.org

Exposition « Planète Mer » : www.science-animation.org/fr/actus-et-coulisses/2180-toulouse-figee-dans-les-glaces

Portrait de J. Deter :

www.youtube.com/watch?v=-dM9k-J6JWg&t=31s&index=41&list=PL_nuutQCh3LAlvc4iyTFcBHMJCwIj4QES

Le GRAINE Occitanie pour créer une dynamique de réseau

Le GRAINE anime depuis une quinzaine d'années une dynamique régionale « Éduquer à la mer et au littoral ». L'objectif principal est d'échanger et de mutualiser compétences, programmes, outils, informations ou ressources afin de sensibiliser différents publics sur la mer et le littoral. Il s'agit aussi de créer une culture collective sur ces sujets et de favoriser les collaborations. **Ce réseau réunit tous les acteurs en situation d'informer, de sensibiliser, de former ou d'éduquer des publics sur la mer et le littoral (associations, scientifiques, collectivités...).** Cela donne lieu à des journées d'échanges et de découverte alternant découverte sur le terrain, intervention d'experts, ateliers d'échanges de pratiques, et permet aussi la création d'outils pédagogiques, pensés, construits, et mutualisés en réseau.

- la camionnette pédagogique « Aucèl » accueille du public et propose des animations en lien avec le littoral (dans le cadre du Life+ Lag'Nature) ;
- la carriole de sensibilisation sur les oiseaux du littoral « Laromobile » (dans le cadre du Life+ ENVOLL) ;
- l'outil « La mer sur un plateau » pour découvrir les milieux marins, la biodiversité marine et les activités humaines en Méditerranée (soutien de l'Agence française pour la biodiversité et de la Région Occitanie).

Contact (GRAINE Occitanie) :

E. Launay, emilie.launay@graine-occitanie.org

Plus d'informations : www.graine-occitanie.org

Comment parler de la fragilité des écosystèmes marins ou de l'érosion du littoral avec le grand public ? Comment aborder la pollution des lagunes et questionner les usages ? Comment parler de la nidification des larolimicoles et de l'impact des activités humaines sur les plages ? Comment faire découvrir les écosystèmes marins au jeune public ? Autant de questions que les projets et outils pédagogiques abordent pour mettre en perspective des enjeux de territoires et favoriser une prise de conscience environnementale. Différents outils ont ainsi été créés par le réseau « mer et littoral » :

- la malle pédagogique « Gibbule » destinée aux éducateurs d'Occitanie travaillant sur le thème du littoral ;

Échosciences Occitanie : un média social régional dédié aux sciences et à l'innovation

Articles, agenda grand public, communautés, cartographie des lieux culturels et scientifiques à visiter... Cette plateforme, faite pour et par les passionnés de science, invite à découvrir ce qui se passe en région, à être acteur de la diffusion de la CSTI en publiant des articles et des événements, mais aussi à entrer en contact avec les autres membres d'Échosciences Occitanie.

Plus d'informations : www.echosciences-sud.fr
Découvrez les articles de l'OOB, p. ex. « Comment la mer se refroidit-elle en automne ? »
www.echosciences-sud.fr/articles/boss-comment-la-mer-se-refroidit-elle-en-automne

▼ Animation de la camionnette pédagogique Aucèl à la plage de Peyrefite (Gardes-barrières, Pyrénées-Orientales). © J.F. Planque



e nouveau Train du Climat : du national au régional

En octobre 2015, un train emportant avec lui une exposition sur le climat a sillonné la France, faisant étape dans 19 villes pour rencontrer plus de 23 000 visiteurs, dont 3 500 scolaires et 1 100 décideurs. Cette aventure originale a été initiée, puis construite et portée par une petite équipe de trois chercheurs toulousains appuyés par une ingénieure spécialisée en médiation de la culture scientifique. À bord du train, un collectif interdisciplinaire de scientifiques rattachés à une trentaine d'établissements ou laboratoires de recherche et désignés sous le nom de « Messagers du climat ». Combinant des expertises allant des sciences fondamentales aux sciences humaines et sociales, les Messagers du climat avaient pour but d'échanger savoirs et questionnements sur le changement climatique, au sens le plus large possible. De tous les

événements labellisés COP21, le Train du Climat s'est avéré être le seul de portée nationale hors Île-de-France, couvrant une aussi large partie du territoire. Ouvert à tous et accessible au cœur des villes, il a permis de créer un nouvel espace de rencontre et de partage sur la question climatique entre la communauté scientifique et le grand public.

Fort du succès de ce premier train, un nouveau projet est né pour répondre aux nombreuses demandes venant de villes qui n'avaient pas été visitées en 2015. Un nouveau partenariat s'est construit entre les Messagers du Climat et SNCF, avec pour but d'aller plus loin dans les territoires. L'exposition a évolué, plus orientée que la précédente sur les solutions à apporter face au défi du changement climatique. Elle est installée à bord d'un TER spécialement aménagé qui tournera

dans les régions de France qui se porteront volontaires pour le soutenir et l'accueillir. Pour commencer, en 2018, le Train du Climat régional fait étape dans plusieurs villes de Nouvelle-Aquitaine. Il arrivera en Occitanie début 2019. **Les impacts du changement climatique sur le milieu marin et le littoral – en particulier en regard à la montée du niveau de la mer et les adaptations nécessaires – y tiendront une place importante.**

Contacts : C. Jeandel (LEGOS), catherine.jeandel@legos.obs-mip.fr, C. Alazard (Train du Climat), caroline.alazard@trainduclimat.fr, C. Cassou (CERFACS), christophe.cassou@cerfacs.fr et S. Planton (CNRM), serge.planton@meteo.fr

Plus d'informations : <https://trainduclimat.fr>



▲ © Train du Climat

Exposition : Planète Mer, l'observer, la comprendre, menez l'enquête !

2180... Toulouse... Les routes sont impraticables, les avions ne décollent plus, la Garonne et le canal du Midi sont complètement gelés... Ainsi retentissent les premiers mots du scénario catastrophe de cette exposition. Après avoir pris la mesure de la situation dans le sas d'accueil présentant les enjeux climatiques, l'océanographie et la dimension internationale de cette discipline, les visiteurs embarquent dans l'exposition pour mener l'enquête suivante : pourquoi et comment le climat aurait-il pu se dérégler de manière si spectaculaire ? Pour cela, ils s'intéressent à l'océanographie spatiale, voyagent, au travers d'un casque de réalité virtuelle, dans les profondeurs des océans, rejoignent une campagne en mer, questionnent le phénomène *El Niño*, et se rendent en laboratoire pour analyser leurs prélèvements. Un scénario de science-fiction certes, mais une plongée réelle dans le quotidien d'un océanologue, qui rappelle aux visiteurs l'importance du lien entre climat et océans.

Planète Mer, exposition co-organisée en 2017 par le Quai des Savoirs et Science Animation, visait à faire découvrir l'océanographie et ses enjeux mais aussi à sensibiliser aux questions climatiques. Des questions majeures éclairées

par des présentations d'objets, manips, photos, films... mais également par des installations artistiques poétiques et questionnantes. *To Record Water during days* de Javiera Tejerina-Risso, installation métallique monumentale connectée à sept bouées océanographiques évoluait en live au rythme de la houle des quatre coins du monde, illustrant l'aspect planétaire de la discipline. *L'aquarium* du Proyectarium, installation d'art numérique créée pour l'exposition, proposait une immersion interactive dans un aquarium imaginaire dont les conditions de température et d'acidité évoluaient au fil de l'exposition, impactant la biodiversité présentée... Cette exposition originale, fondée sur un jeu enquête, a associé le CNES, Météo-France, Mercator Océan International, le CNRS et l'université de Toulouse. Également consacrées aux océans et au changement climatique : l'édition 2017 du festival « Lumières sur le Quai » et l'exposition interactive *El Niño-La Niña*, conçue en partenariat avec la Cité de l'espace de Toulouse, le Muséum et le *Parque Explora* de Medellin (Colombie).

Contacts : M. Leonard (Quai des Savoirs), marina.leonard@toulouse-metropole.fr et J. Poirier (Science Animation), julie.poirier@science-animation.org

Plus d'informations : www.quaidessavoirs.fr www.science-animation.org



L'exposition « Zostères, des prairies sous la mer ». Entre zone d'immersion et vie de laboratoire

Ce projet a pris naissance en 2015 au laboratoire MARBEC sous l'impulsion de deux chercheuses : Francesca Rossi qui travaille sur la diversité, le fonctionnement et la conservation des herbiers de zostères et Frédérique Carcaillet qui s'intéresse au transfert des connaissances de la recherche vers le grand public et à la formation des étudiants à la médiation et à la muséographie scientifique. C'est en unissant leurs compétences que ces dernières ont proposé à la Fondation de France la création d'une exposition itinérante pour sensibiliser les citoyens et les décideurs au rôle crucial que jouent ces écosystèmes et leur biodiversité dans le fonctionnement des milieux aquatiques et de toutes les activités qui s'y rattachent (pêche, conchyliculture, tourisme...). Ces herbiers sont en effet menacés partout dans le monde et cette exposition a pour objectif d'induire une prise de conscience et des changements de comportements pour renforcer les actions de conservation des herbiers engagés depuis quelques années.

La conception de l'exposition a été confiée à plusieurs étudiants* sous la direction de Frédérique Carcaillet. Ceux-ci y ont apporté leurs compétences en écologie, en vulgarisation scientifique, en conception d'exposition et en infographie, en partenariat avec le Musée de l'étang de Thau à Bouzigues. Pour accompagner l'exposition, les étudiants ont aussi créé un livret pédagogique pour les enseignants et les élèves du primaire, avec des activités à réaliser avant, pendant et après la visite, un livret jeu pour les enfants et des films d'animation à visionner dans l'exposition et sur une chaîne YouTube. En juin 2017, la Direction régionale des affaires culturelles (Drac Occitanie) a financé des animations sur la plage de Bouzigues en lien avec l'exposition alors présente au musée de l'étang de Thau. Installée en mai 2017 à Bouzigues, l'exposition a ensuite été présentée sur les bords des étangs de Salses-Leucate (Port-Leucate), de Berre (Marignane, Saint-Mitre-les-remparts, Miramas), de Thau (musée de la Mer, Sète) et au bord du bassin d'Arcachon (domaine de Certes-Graveyron). À partir de janvier 2019, elle sera accueillie à la Maison départementale de l'environnement (domaine de Restinclières, Hérault).

Contact (MARBEC) : F. Carcaillet, frederique.carcaillet@umontpellier.fr

Plus d'informations :
www.facebook.com/herbierszosteres
Ateliers Films d'animation scientifiques :
<https://youtu.be/Uztpv74OhPA>

* Masters IEGB (Ingénierie en écologie et gestion de la biodiversité) et ACCES (Animation, communication, culture, enseignement en sciences)



▲ © Frédérique Carcaillet

Biodiversarium : aquarium et jardin scientifiques méditerranéens

Le Biodiversarium, service de médiation scientifique de l'OOB, associe un aquarium et un jardin scientifique méditerranéen. Il a pour objectifs de **présenter au public et aux scolaires la biodiversité terrestre et marine du département des Pyrénées-Orientales au travers des recherches menées par l'OOB (cf. p. 87) et ses partenaires**. La biodiversité de ce territoire, étagée le long d'un continuum terre-mer exceptionnel est en effet remarquable et de nombreux sites protégés couvrent une grande partie des zones naturelles illustrées au sein du Biodiversarium (Réserve naturelle nationale de la forêt de la Massane, Réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls, Parc naturel marin du golfe du Lion, etc.). Le Biodiversarium entretient des liens étroits avec ces sites protégés afin de valoriser les richesses qu'ils hébergent.

L'aquarium public est situé dans un bâtiment qui héberge aussi des aquariums de recherche, une plateforme technologique dédiée aux biotechnologies marines, un laboratoire pédagogique, une salle d'enseignement à distance et des laboratoires de recherche. Les différentes activités menées dans le bâtiment sont pour partie visibles du public. Le jardin dispose de zones extérieures dédiées à la présentation de la faune et de la flore terrestres locales ainsi que d'espaces muséographiques qui permettent de compléter la visite et d'enrichir l'expérience des visiteurs (expositions, maquettes interactives, laboratoires pédagogiques, etc.). **Le Biodiversarium – l'aquarium en particulier – est un outil de médiation scientifique unique en Europe. De nombreuses interfaces avec les laboratoires sont mises en place et l'activité scientifique peut ainsi être observée par les visiteurs** (aquariums

de recherches, plateformes technologiques, laboratoires, etc.). Les salles pédagogiques, équipées comme de véritables laboratoires de recherche, accueillent près de 4 000 scolaires chaque année afin qu'ils participent à des ateliers scientifiques ou naturalistes. Les animateurs du Biodiversarium interviennent également à distance dans les établissements scolaires grâce aux technologies de l'information et de la communication. Le Biodiversarium constitue ainsi un outil moderne et novateur qui inscrit sa mission au cœur du débat science-société grâce à cette dualité de présentation naturaliste et scientifique.

Contact (Biodiversarium/OOB) :
P. Romans, pascal.romans@obs-banyuls.fr

Plus d'informations : www.biodiversarium.fr

▼ *Les herbiers de posidonies, un des biotopes sous-marins reconstitués dans l'aquarium.* © Pascal Romans



L'ENGAGEMENT D'UN AQUARIUM POUR LA MÉDIATION SCIENTIFIQUE

Depuis plusieurs années, les biologistes et les soigneurs du Seaquarium (l'aquarium du Grau du Roi) sont impliqués dans des programmes de recherche pour la protection du monde marin. Le Seaquarium est également une attraction touristique majeure d'Occitanie, avec plus de 320 000 visiteurs annuels. Comment croiser ces deux univers ? Comment transmettre la science aux citoyens ? Comment les impliquer dans la protection des écosystèmes marins ? Pour répondre à ces questions, le Seaquarium a imaginé, avec l'ensemble de ses salariés, son « Institut marin » : un lieu d'accueil, de ressources et de partage des connaissances scientifiques, mais aussi un lieu pour discuter et construire de nouveaux projets de préservation des milieux marins de Méditerranée, qui soit ouvert à tous, chercheurs, associations, citoyens passionnés, citoyens responsables... L'association « Institut marin pour les écosystèmes méditerranéens », structure d'accompagnement du Seaquarium, a ainsi été créée en décembre 2016 et l'Institut a ouvert ses portes en juin 2017.

Avec pignon sur rue dans le hall de l'aquarium, 25 m² ont été mis en scène pour attiser la curiosité des visiteurs. « Montez à bord d'un zodiac pour une mission scientifique en mer », « Ici les pêcheurs s'engagent, vous aussi prenez les déchets en mains »... sont autant d'accroches pour diffuser la connaissance scientifique et sensibiliser les visiteurs aux bons comportements à avoir pour préserver les milieux marins. Ces questions sont parfois approfondies dans l'aquarium. En tant qu'ambassadeur du réseau Sentinelles de la Mer Occitanie (cf. page suivante), c'est aussi dans ce lieu que sont expliqués, relayés et valorisés les programmes de sciences participatives. C'est ici que se construisent de nouveaux projets de recherche et des innovations.



▲ Lieu d'accueil du public de l'Institut Marin. © Institut Marin Seaquarium

Contact (Institut marin pour les écosystèmes méditerranéens) :
J.-M. Groul, institutmarin@gmail.com

Plus d'informations : www.seaquarium.fr/institutmarin

Écotourisme et patrimoine scientifique : à la découverte de la lagune de Thau

Basée sur le bassin de Thau, Kimiyo est une association de diffusion de la culture scientifique favorisant les regards croisés de différentes disciplines pour transmettre des connaissances, tous domaines confondus, au grand public. Comment faire pour que la culture scientifique soit un enjeu touristique ? Par exemple, Kimiyo fait découvrir aux vacanciers un lieu emblématique de la recherche marine – la station marine de Sète de l'UM – ainsi que la biodiversité exceptionnelle de l'étang de Thau

où ce bâtiment est situé. Depuis sa création en 1879, cette station appuie les recherches, l'observation et l'enseignement dans le domaine de la biologie marine. Aussi, chaque été, Kimiyo organise, avec le CPIE Bassin de Thau, des pêches à pied pour les vacanciers, aux abords de la station marine afin de découvrir la faune et la flore de la lagune ainsi que l'histoire de ce bâtiment et de ses recherches. Les touristes jouent alors le rôle des naturalistes du 19^e siècle qui pêchaient, identifiaient et classaient ces

espèces. Cette démarche écotouristique amène le public à appréhender différemment son lieu de vacances et à prendre conscience de la biodiversité qui l'entoure et, *in fine*, à participer au développement d'un tourisme durable et respectueux de l'environnement.

Contact (Kimiyo) : J. Bandelier, john@kimiyo.fr

Plus d'informations : <http://kimiyo.fr>



▲ © Kimiyo

Quelques exemples de programmes d'observation citoyenne au service de la recherche

Sentinelles de la mer Occitanie, un réseau de sciences participatives en mer, lagunes et littoral

Sentinelles de la mer Occitanie – coordonné par le CPIE du Bassin de Thau depuis 2015 – est un réseau qui réunit des porteurs de programmes de sciences participatives sur la mer et le littoral en Occitanie. Le réseau propose aux citoyens de contribuer à la science et à la préservation des milieux, en participant à 16 programmes* en mer, en lagunes et sur le littoral. Après avoir coordonné et relayé différents programmes de sciences participatives (Hippo-THAU - cf. p. 122, MedObs Sub**, BioLit**) sur son territoire, et vu l'enthousiasme citoyen pour ce type d'actions, le CPIE Bassin de Thau a réuni différents acteurs impliqués dans la protection du milieu marin (scientifiques, gestionnaires d'espaces naturels, collectivités, porteurs de programme, associations d'éducation à l'environnement) afin de créer un réseau fédérateur et de mieux valoriser la science participative en mer et sur le littoral.

Tout citoyen peut contribuer à plusieurs de ces programmes lors de ses activités, sur l'eau, sous l'eau ou sur le littoral. Sentinelles de la mer Occitanie fédère

ainsi une véritable communauté d'observateurs régionaux tout en diffusant les bonnes pratiques en milieu naturel. La sensibilisation à l'environnement est un des piliers du réseau, grâce au développement des connaissances citoyennes sur la biodiversité du territoire. Outre la sensibilisation et l'éducation à l'environnement, **Sentinelles de la mer Occitanie contribue à la gestion des espaces naturels et à l'étude des enjeux écologiques.** Les données récoltées peuvent en effet servir à des chercheurs, des collectivités ou des gestionnaires d'espaces naturels pour l'amélioration des connaissances et la mise en place de plans de gestion sur une espèce protégée (mérus, grandes nacres, tortues marines par exemple) ou un site remarquable. L'implication des gestionnaires et des scientifiques dans ce réseau permet de mieux cibler les actions de terrain à des fins de préservation et de valorisation des espèces.

Contact (CPIE Bassin de Thau) : E. Emmanuelli, e.emmanuelli@cpiebassindechau.fr

* Plus d'informations sur ces 16 programmes : www.sentinellesdelamer-occitanie.fr



▲ Sortie de sciences participatives BioLit organisée par le CPIE Bassin de Thau. © CPIE Bassin de Thau

** MedObs Sub : dispositif de surveillance de l'état de santé du milieu marin mis en place par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse sur la façade méditerranéenne française.
BioLit : programme national de sciences participatives sur la biodiversité littorale animé par Planète Mer.

CYBELLE MÉDITERRANÉE : COLLECTE ET PARTAGE DE DONNÉES SUR LA FAUNE MARINE

Cybelles Méditerranée est un programme de sciences participatives qui rassemble les plaisanciers, les professionnels de la mer et les naturalistes experts pour une meilleure connaissance de la faune marine du large (cétacés, poissons, tortues marines, raies et requins, oiseaux et macroplancton). Mené depuis 2009 par Cybelle Planète, ce programme permet à des amateurs de reporter facilement leurs observations d'espèces pélagiques en mer. Les données sont collectées par des plaisanciers et également par les équipiers des expéditions en mer organisées chaque année par l'association. Depuis 2009, près de 1 600 plaisanciers se sont inscrits au programme et 1 500 personnes ont participé aux expéditions. Plus de 10 000 observations ont ainsi pu être reportées sur tout le bassin méditerranéen.

Fort de son expérience, Cybelle Planète a co-créé en 2016-2017, avec le Groupe d'étude des cétacés du Cotentin, des outils numériques dédiés à la collecte de données en mer : OBSenMER. Une application mobile permet de rapporter facilement les observations faites en mer selon trois niveaux d'expertise : observations opportunistes et observations avec effort (pour le grand public) et observations expertes (réservée aux naturalistes confirmés) qui suivent un protocole scientifique. Une base de données commune archive les observations collectées. Selon le programme, cette base de données est publique (libre partage) ou privée. Enfin, une plateforme collaborative web*, permet de consulter, gérer, partager les données, et d'accéder à un catalogue de photo-identification des cétacés. L'ensemble de ces outils OBSenMER est partagé librement avec d'autres

structures collectrices ou utilisatrices de données. OBSenMER est administré par zones géographiques. Cybelle Planète est l'administrateur pour la mer Méditerranée. Dix-huit structures y participent aujourd'hui – associations naturalistes et/ou de nautisme, institutions, laboratoires de recherche... –, partageant ainsi des données homogènes et standardisées sur le long terme et à grande échelle.

Contacts (Cybelle Planète) : C. Arnal, celine.arnal@cybelle-planete.org et C. Gesnin, camille.gesnin@cybelle-planete.org

Plus d'informations : www.cybelle-planete.org

* www.obsenmer.org

▼ Carte des observations reportées en mer Méditerranée avec OBSenMER. © Cybelle Planète



CONNAÎTRE POUR MIEUX PROTÉGER LA RÉSERVE NATURELLE MARINE DE CERBÈRE-BANYULS

Créée en 1974, la Réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls est située au cœur de la côte Vermeille. D'une superficie de 650 hectares, elle s'étire sur 6,5 km de côte entre les communes de Banyuls-sur-Mer et Cerbère. La Réserve est dotée d'un plan de gestion permettant de planifier les actions sur 5 ans et qui consacre une large place à la conservation du patrimoine naturel.

Mieux connaître, c'est mieux protéger. Les suivis scientifiques améliorent les connaissances relatives au milieu marin. Pour cela, le gestionnaire de la Réserve a su constituer un réseau de partenaires dont l'objectif est de relever des informations sur le milieu marin. Des observateurs en plongée recueillent ainsi des données sur la base d'un protocole défini. Ces suivis, associant scientifiques et citoyens bénévoles aident le gestionnaire à prendre toutes les mesures utiles pour maintenir dans un parfait état de conservation cet écosystème fragile. Une veille écologique permanente sur les espèces invasives telles que les algues filamenteuses ou la présence de *Caulerpa taxifolia* ou *racemosa* est mise en place en collaboration avec ces plongeurs sentinelles. Véritable enjeu prioritaire, cette veille permet d'obtenir des informations précieuses pour le gestionnaire. L'implication des usagers leur permet de s'approprier le territoire et ainsi devenir des acteurs de sa protection. Des orientations de gestion peuvent alors être construites en concertation et faire de ce site un espace où gestionnaires et usagers agissent ensemble dans un objectif commun.

Contact (Réserve naturelle marine Cerbère-Banyuls) :

F. Cadene, frederic.cadene@cd66.fr

Plus d'informations :

www.ledepartement66.fr/62-la-reserve-marine-de-cerbere-banyuls.htm



▲ Prélèvement d'algues filamenteuses à des fins d'analyse.
© Didier Fioramonti

PARC NATUREL MARIN DU GOLFE DU LION : AMÉLIORER LES CONNAISSANCES SUR LE REQUIN PEAU BLEUE

Le Parc naturel marin du golfe du Lion est une aire marine protégée qui couvre plus de 4 000 km² d'espace marin au large des Pyrénées-Orientales et de l'Aude. La vocation du parc est la gestion intégrée de l'espace marin. Il a pour ambition de répondre à trois objectifs indissociables : la connaissance du milieu marin, la protection de ce milieu et notamment des habitats et des espèces qu'il abrite, et le développement durable des activités maritimes. Le parc participe également à des actions de sciences participatives qui contribuent à atteindre ces objectifs. Ainsi, depuis 2016, il accompagne les bénévoles de l'association Ailerons et les pêcheurs plaisanciers membres de la Fédération nationale de la plaisance et de la pêche en mer pour une journée à la rencontre des requins peau bleue (*Prionace glauca*). Les équipages participant à l'évènement collectent des informations sur les requins capturés puis relâchés : taille, sexe et prélèvements pour analyses génétiques. Cette action de sciences participatives améliore les connaissances sur cette espèce. Le requin peau bleue est de taille moyenne, généralement comprise entre 1,80 et 2,40 mètres. Il possède un corps élancé et souple, avec un dos bleu

foncé et des flancs bleu vif, qui lui valent son nom de « peau bleue ». C'est un requin océanique, que l'on peut observer au large des côtes du parc naturel marin de fin mai à fin septembre. Il se nourrit principalement de petits poissons pélagiques, tels que les anchois, harengs ou sardines. Il peut avoir jusqu'à 135 petits par portée qui mesurent 35 à 52 cm à la naissance. En Méditerranée, malgré qu'il soit extrêmement menacé, le requin peau bleue n'est toujours pas protégé et continue à être pêché et commercialisé. Le premier geste écoresponsable est de ne plus en consommer. Le parc fait partie de l'Agence française pour la biodiversité, un établissement public du ministère de la Transition écologique et solidaire, créé en janvier 2017.

Contact (Parc naturel marin du golfe du Lion) :

A. Gigou, alexandra.gigou@afbiodiversite.fr

Plus d'informations :

www.parc-marin-golfe-lion.fr

www.facebook.com/parc.naturel.marin.golfedulion

▼ Requin peau bleue observé au large de Canet-en-Roussillon.
© Alexandra Gigou/Agence française pour la biodiversité



Connaissance des hippocampes et de leur vulnérabilité

Créée en 1995, l'association Peau-Bleue (Agde) a pour objectif de mieux connaître et faire connaître la vie marine. En 2005, face au déficit de connaissances sur l'écologie des hippocampes en France, notamment leur vulnérabilité aux impacts anthropiques, Peau-Bleue a engagé le programme **Enquête d'Hippocampes pour collecter des informations et entreprendre des études écologiques de terrain sur ces animaux**. Ce programme s'intéresse à l'hippocampe moucheté (*Hippocampus guttulatus*) et l'hippocampe à museau court (*H. hippocampus*) et aux autres espèces de la famille des Syngnathidés (syngnathes ou poissons-aiguilles). Il combine un travail d'enquête participative auprès des usagers du milieu marin (projet Hippo-ATLAS) et des études ou suivis *in situ*, là aussi dans une logique de science participative, notamment par une implication forte de plongeurs amateurs :

- Mené depuis 2005 en partenariat avec le CPIE Bassin de Thau, le projet-pilote Hippo-THAU a permis, grâce à une forte mobilisation sociétale (plongeurs, conchyliculteurs, pêcheurs, écoliers...), de mieux comprendre l'écologie des hippocampes et syngnathes de la lagune de Thau, notamment leurs préférences d'habitat, et de montrer de fortes fluctuations de populations, qui paraissent refléter la variabilité du milieu lagunaire. Des observations inédites ont été réalisées sur l'écologie et la croissance des juvéniles d'hippocampes.
- Depuis 2016, le projet « Singularité des

hippocampes de Thau » décrit les différences morphologiques entre deux lignées génétiques d'hippocampes mouchetés (forme lagunaire de Thau, forme marine de Méditerranée) par une approche de photomorphométrie. Conduit en partenariat avec le CPIE Bassin de Thau et l'ISEM*, ce projet s'appuie sur la collecte d'images d'hippocampes auprès des photographes sous-marins.

- Depuis 2012, un suivi est engagé, en partenariat avec l'Institut marin du Seaquarium et avec l'appui de nombreux plongeurs bénévoles, sur les hippocampes à museau court du banc de sable de l'Espiguette. Les résultats de ce suivi ont convaincu autorités et porteurs de projets que les opérations de dragage de sable sur la zone ne devaient pas impacter cette espèce sensible.

L'association Peau-Bleue constitue aujourd'hui le principal pôle de compétence français sur les hippocampes et Syngnathidés. Cette expertise scientifique est aussi citoyenne, car construite avec l'ensemble de la société civile.

Contact (Peau-Bleue) :
P. Louisy, patrick.louisy@wanadoo.fr

Plus d'informations : www.peaubleue.org

* Équipes « Spéciation, évolution et adaptation en milieu marin » et « Macroévolution et développement » de l'ISEM, avec le soutien de la Fondation Total.



▼ Hippocampus hippocampus. © P. Louisy



▼ Hippocampus guttulatus. © P. Louisy

Diabie de mer, un projet de sciences participatives au service d'une espèce en danger

Le diabie de mer (*Mobula mobular*) est une raie endémique de Méditerranée dont certains individus peuvent atteindre jusqu'à 5,20 m d'envergure. Confondue avec la Raie manta des eaux tropicales et équatoriales, le diabie de mer n'est présent qu'en Méditerranée aussi bien le long des côtes qu'au large et se nourrit de plancton et de petits poissons. Hélas, c'est également une espèce menacée, victime de captures accidentelles, entre autres dans les filets dérivants, et de ce fait reconnue comme « en danger d'extinction » par l'UICN. Sa protection est complexifiée du fait qu'elle n'est que très peu observée et peu connue (biologie, comportement, effectifs...).

Face à cette situation, l'association Ailerons, basée à Montpellier et œuvrant à la protection des requins et des raies en Méditerranée, a lancé en 2010* le projet de sciences participatives « Diabie de mer » afin d'améliorer les connaissances scientifiques de cette espèce. L'objectif est de créer et animer un réseau d'observateurs constitué du grand public

et des professionnels de la mer sur l'ensemble du bassin méditerranéen pour recenser les observations de l'espèce. Depuis 2014, les données collectées sont transmises au Muséum national d'Histoire naturelle et intégrées à l'Inventaire national du patrimoine naturel pour améliorer les stratégies de conservation. Grâce à ce projet et à l'implication du réseau d'observateurs, la plus grosse base de données jamais constituée sur l'espèce a pu être réalisée. Ces données ont notamment montré l'inquiétant statut de conservation de l'espèce qui est désormais identifiée comme espèce cible dans certaines aires marines protégées comme le Parc naturel marin du golfe du Lion.

Contacts (Ailerons) :
W. Travers et M. Lapinski, contact@asso-ailerons.fr

Plus d'informations : <http://asso-ailerons.fr>

* Ce projet est toujours en cours en 2018.



▼ Diabie de mer © P. Trelut

Les plongeurs de loisir en quête des espèces emblématiques du Parc des Calanques

Depuis 2003, plus de 1 800 plongeurs de la Fédération française d'études et de sports sous-marins (FFESSM) ont participé à 15 campagnes successives d'observation et de recensement des mérours, corbs et nacres dans le Parc national des Calanques et ailleurs en Méditerranée (plus de 35 sites prospectés). Cela en fait la plus importante opération de science participative en Méditerranée

française en regard du nombre de participants et de sa pérennité. L'objectif de ces campagnes de recensement est de connaître les effectifs des populations locales de ces trois espèces phares, précédemment surexploitées, de façon à en suivre l'évolution. Nombre de clubs gardois et de plongeurs de l'Hérault et du Gard ainsi que les structures de plongée du Vaucluse, du Var et des Bouches-du-Rhône, répondent chaque année à ce rassemblement.

Le principe d'inventaire adopté pour les campagnes du Groupe d'Étude Mérour (GEM) est utilisé afin de couvrir les zones retenues avec une très bonne efficacité. Les plongeurs prospectent en détail chaque site, en progressant parallèlement selon la topographie et les conditions de visibilité, ce qui permet à chaque observateur de rester en contact visuel avec ses coéquipiers afin d'éviter les doublons et d'assurer une sécurité réciproque. Pour chaque individu rencontré, plusieurs paramètres sont notés : la taille, le temps d'immersion,

la profondeur, le comportement du poisson et les caractéristiques de l'habitat. Ces observations permettent d'obtenir des informations fiables grâce à un protocole facilement reproductible sur d'autres sites. Les recensements effectués par les plongeurs amateurs et par les scientifiques apportent des informations complémentaires aux gestionnaires d'aires marines protégées. La force et l'intérêt de ces inventaires sont de faire se rencontrer des acteurs d'horizons très différents (institutionnels, gestionnaires, associations, usagers, scientifiques), de sensibiliser et de fédérer l'ensemble des participants (plongeurs, apnéistes et pêcheurs sous-marins bénévoles) autour d'une action commune fédératrice et éco-citoyenne sur des espèces patrimoniales et hautement symboliques.

Contact (Comité Occitanie/Parc des calanques/GEM) :

J. Cabaret, jean.cabaret@wanadoo.fr



▲ Rassemblement des « Espèces qui comptent », Marseille 2018.
© Frédéric Fedorowsky

LA TORTUE LOUISE : OBSERVATION, RECENSEMENT ET ALERTE EN VUE D'UN SAUVETAGE

Le dimanche 20 août 2017, un pêcheur de l'étang de Thau découvrait dans ses filets une grosse tortue caouanne (*Caretta caretta*) vivante, dont la présence de naissains d'huîtres sur sa dossière révélait un long séjour dans la lagune. Le Réseau Tortues Marines de Méditerranée Française de la Société Herpétologique de France (RTMMF-SHF), aussitôt alerté, procéda d'abord à l'identification de l'espèce et au recueil d'informations sur les circonstances de l'évènement puis fit diriger l'animal vers le centre de soins du Centre d'études et de sauvegarde des tortues marines de Méditerranée (CestMed). Au cours d'une brève mise en observation, cette tortue, baptisée Louise, subit quelques prélèvements biologiques analysés ensuite par le CEFÉ. Sa remise en liberté, au cours du festival des Sentinelles de la Mer du CPIE Bassin de Thau à Sète fut l'opportunité d'une communication au public et l'occasion pour l'Ifremer de Sète de suivre son comportement à l'aide d'une balise satellitaire.

En effet, Louise, comme toutes ses congénères visitant le littoral français participe à l'amélioration des connaissances sur la biologie des tortues marines et constitue aussi un indicateur du suivi de l'état écologique du milieu marin dans le cadre de la Directive cadre stratégie pour le milieu marin. Le sauvetage de Louise est un bon exemple d'action concertée multi-acteur associant professionnels, associations de conservation d'espèces protégées et établissements publics de recherche. Ce type d'action fait partie d'un programme national de conservation des tortues marines et bénéficie du concours de programmes européens de recherche et du soutien de l'Agence française pour la biodiversité.

Contacts : J. Sacchi (RTMMF), rtmmf@lash.org, J.-B. Sénégas (CestMed) contact@cestmed.org et F. Poisson (MARBEC), francois.poisson@ifremer.fr

Plus d'informations :

RTMMF-SHF : http://lash.org/rtmmf_info

CestMed : www.cestmed.org

MARBEC : www.umr-marbec.fr



▲ Tortue caouanne relâchée avec une balise Argos. © CestMed

Thématiques couvertes par les structures de recherche (Janvier 2019)

Les principales structures de recherche apparaissant dans le texte de ce dossier sont consignées dans les tableaux ci-dessous. Une **couleur foncée** indique une thématique dans laquelle une structure développe principalement ses activités, une **couleur claire** une thématique dans laquelle elle est également impliquée de façon ponctuelle. Le ratio « nombre de scientifiques impliqués dans la thématique Mer et Littoral / Nombre total de scientifiques » est également indiqué pour chacune de ces structures.

Chapitre 1

Forçages naturels et anthropiques sur la dynamique de la Méditerranée

- 1.1. L'océan, agent climatique à toutes les échelles
- 1.2. Formation et acidification des eaux profondes méditerranéennes, rôle du golfe du Lion
- 1.3. Couplage « météorologie/océanographie » : exemple des crues cévenoles

Chapitre 4

Fondamentaux d'un développement durable du « Système Mer »

- 4.1. Gestion écosystémique de la pêche et de l'aquaculture
- 4.2. Trafic maritime, activités industrielles et portuaires
- 4.3. Biotechnologies, bioingénieries marines et restauration écologique des milieux
- 4.4. Gestion des risques côtiers et adaptation au changement climatique
- 4.5. Aires marines protégées et stratégies de bioconservation
- 4.6. Énergies marines

Chapitre 2

Biodiversité et dynamique des communautés biologiques en milieu marin

- 2.1. Structure, dynamique et fonctionnement des communautés
- 2.2. Organismes marins : modèles biologiques et plateformes d'expérimentation

Chapitre 5

La force de l'observation pérenne, la synergie de l'intégration numérique

- 5.1. Observatoires et données *in situ*
- 5.2. Place de la télémétrie des satellites d'observation
- 5.3. Modélisation, simulation, prévision à l'ère du *big data*
- 5.4. Nouveaux services numériques au bénéfice de la collectivité et plateforme de surveillance littorale et maritime
- 5.5. Technologies et outils innovants

Chapitre 3

Des preuves scientifiques de la vulnérabilité de l'océan

- 3.1. Variations du niveau de la mer et impact sur le trait de côte
- 3.2. Impacts côtiers des apports continentaux
- 3.3. Conséquences des activités industrielles et anthropiques sur la mer et les zones côtières
- 3.4. Des ressources menacées

Chapitre 6

Médiations innovantes et sciences participatives

- 6.1. Médiation autour de l'environnement marin
- 6.2. Quelques exemples de programmes d'observation citoyenne au service de la recherche

Structures de recherche publiques	Nombre de scientifiques impliqués / Nombre total	Chap. 1			Chap. 2		Chap. 3				Chap. 4						Chap. 5					Chap. 6			
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2		
ART-Dev (UMR) • Acteurs, ressources et territoires dans le développement (CNRS/UPVM/Cirad/UM/UPVD) Directeur : David Giband, giband@univ-perp.fr http://art-dev.cnrs.fr	3/70																								
BIOM (UMR) • Biologie intégrative des organismes marins (Sorbonne Université/CNRS) Directeur : Hector Escriva, hector.escriva@obs-banyuls.fr http://biom.obs-banyuls.fr	15/15																								
BRGM • Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Direction régionale Occitanie) Directrice : Ariane Blum, a.blum@brgm.fr www.brgm.fr	4/40																								
C2MA • Centre des Matériaux des Mines d'Alès (IMT Mines Alès) Directeur : José-Marie Lopez-Cuesta, jose-marie.lopez-cuesta@mines-ales.fr http://c2ma.mines-ales.fr/pages/centre-de-recherche-c2ma	4/33																								
CEE-M (UMR) • Centre d'Économie de l'Environnement de Montpellier (CNRS/Inra/Montpellier SupAgro/UM) Directeur : Brice Magdalou, brice.magdalou@umontpellier.fr www.cee-m.fr	8/31																								
CEFE (UMR) • Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CNRS/UM/UPVM/IRD/Montpellier Supagro/Inra/EPHE) Directeur : Richard Joffre, direction@cefe.cnrs.fr www.cefe.cnrs.fr	20/119																								

Structures de recherche publiques	Nombre de scientifiques impliqués/ Nombre total	Chap. 1			Chap. 2		Chap. 3				Chap. 4						Chap. 5					Chap. 6	
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2
CEFREM (UMR) • Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens (UPVD/CNRS) Directeur : Wolfgang Ludwig, ludwig@univ-perp.fr http://cefrem.univ-perp.fr	21/21																						
CNES (Centre spatial de Toulouse) • Centre national d'études spatiales Directrice : Geneviève Campan, genevieve.campan@cnes.fr https://cnes.fr	10/150																						
CNRM (UMR) • Centre national de recherches météorologiques (Météo-France/CNRS) Directeur : Marc Pontaud, marc.pontaud@meteo.fr www.umr-cnrm.fr	9/169																						
CRIOBE (USR) • Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement (PSL Université Paris : EPHE/CNRS/UPVD) Directrice : Annaïg Le Guen, annaig.leguen@cnsr.fr www.criobe.pf	35/35																						
ENTROPIE (UMR) • Écologie marine tropicale des océans Pacifique et Indien (IRD/CNRS/Univ. la Réunion) Directrice : Claude Payri, claude.payri@ird.fr http://umr-entropie.ird.nc	35/35																						
ESPACE-DEV (UMR) • Espace pour le développement (IRD/UMI Univ. des Antilles/Univ. de la Guyane/Univ. Réunion) Directrice : Frédérique Seyler, espace-dev@ird.fr www.espace-dev.fr	11/67																						
GET (UMR) • Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (IRD /CNRS/ UT3) Directeur : Etienne Ruellan, etienne.ruellan@get.omp.eu www.get.obs-mip.fr	23/165																						
GM (UMR) • Géosciences Montpellier (CNRS/UMI/Univ. des Antilles) Directeur : Benoît Ildefonse, dirgm@gm.univ-montp2.fr, benoit.ildefonse@umontpellier.fr www.gm.univ-montp2.fr	2/85																						
GREM (UMR) • Gouvernance, Risque, Environnement, Développement (IRD/UPVM) Directeur : Bernard Moizo, bernard.moizo@ird.fr www.gred.ird.fr	8/53																						
HSM (UMR) • HydroSciences Montpellier (CNRS/IRD/UM) Directeur : Patrick Seyler, hsm-direction@umontpellier.fr www.hydrosciences.org	10/77																						
IHPE (UMR) • Interaction Hôtes-Pathogènes Environnements (CNRS/UPVD/UMI/Ifremer) Directeur : Guillaume Mitta, mitta@univ-perp.fr http://ihpe.univ-perp.fr	16/25																						
IMAG (UMR) • Institut Montpellierain Alexander Grothendieck (CNRS/UM) Directeur : Jean-Michel Marin, imag-direction@umontpellier.fr http://imag.edu.umontpellier.fr	9/98																						
Inria-Lemon • Équipe-projet « Littoral, Environnement : Méthodes et Outils Numériques » (Inria) Responsable : Antoine Rousseau, antoine.rousseau@inria.fr www.inria.fr/equipes/lemon	5/5																						
ISE-M (UMR) • Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (CNRS/IRD/UMI/EPHE) Directrice : Agnès Mignot, isem-direction@umontpellier.fr www.isem.univ-montp2.fr	5/120																						
LA (UMR) • Laboratoire d'Aérogologie (CNRS/UT3) Directrice : Céline Mari, celine.mari@aero.obs-mip.fr www.aero.obs-mip.fr	5/52																						
LBBM (USR) • Laboratoire de Biodiversité et Biotechnologies Microbiennes (Sorbonne Université/CNRS) Directeur : Marcelino Suzuki, marcelino.suzuki@obs-banyuls.fr http://lbbm.obs-banyuls.fr	25/25																						
LECOB (UMR) • Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques (Sorbonne Université/CNRS) Directrice : Nadine Le Bris, nadine.le_bris@obs-banyuls.fr (Katell Guizien au 1 ^{er} janv. 2019, guizien@obs-banyuls.fr) http://lecob.obs-banyuls.fr	14/14																						
LEGOS (UMR) • Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (CNES/IRD/CNRS/UT3) Directeur : Alexandre Ganachaud, alexandre.ganachaud@ird.fr www.legos.obs-mip.fr	63/72																						

Structures de recherche publiques	Nombre de scientifiques impliqués/ Nombre total	Chap. 1			Chap. 2		Chap. 3				Chap. 4						Chap. 5					Chap. 6	
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2
LGEI • Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (IMT Mines Alès) Directrice : Anne Johannet, anne.johannet@mines-ales.fr http://lgei.mines-ales.fr	6/28																						
LIRMM (UMR) • Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (CNRS/UM) Directeur : Philippe Poignet, philippe.poignet@lirmm.fr www.lirmm.fr	15/200																						
LOMIC (UMR) • Laboratoire d'océanographie microbienne (Sorbonne Université/CNRS) Directeur : Fabien Joux, joux@obs-banyuls.fr http://lomic.obs-banyuls.fr	35/35																						
MARBEC (UMR) • MARine Biodiversity, Exploitation and Conservation (IRD/Ifremer/UM/CNRS) Directeur : Laurent Dagorn, marbec-dir@listes.ird.fr www.umr-marbec.fr/fr	110/110																						
ONERA Midi-Pyrénées • Office national d'études et de recherches aérospatiales Directeur : Dominique Le Quéau (Occitanie), dominique.lequeau@fondation-stae.net www.onera.fr	NC*																						
SHOM • Service hydrographique et océanographique de la Marine (implantation Toulouse) Responsable : Caroline Bru, caroline.bru@shom.fr www.shom.fr – https://data.shom.fr	11/20																						
TETIS (UMR) • Territoires, environnement, télédétection et information spatiale (AgroParisTech/Cirad/Irstea) Directrice : Christiane Weber, christiane.weber@teledetection.fr www.umr-tetis.fr	3/80																						

Structures de recherche privées	Nombre de scientifiques impliqués/ Nombre total	Chap. 1			Chap. 2		Chap. 3				Chap. 4						Chap. 5					Chap. 6	
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2
Andromède Océanologie Responsable : Pierre Descamp, pierre.descamp@andromede-ocean.com www.andromede-ocean.com	6/6																						
BRLI • BRL Ingénierie DG : Gilles Rocquelain, brlingenierie@brli.fr www.brli.fr/brli	8/20																						
CERFACS • Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique Directrice : Catherine Lambert, catherine.lambert@cerfacs.fr www.cerfacs.fr	5/70																						
CLS • Collecte Localisation Satellites Directeur : Christophe Vassal, info@cls.fr www.cls.fr	37/83																						
Ecocean Président : Gilles Lecaillon, contact@ecocean.fr www.ecocean.fr	5/15																						
Geomatys • (Agence de Montpellier) Directeur : Vincent Heurteaux, vincent.heurteaux@geomatys.com www.geomatys.com	6/16																						
Mercator Ocean International DG : Pierre Bahurel, pierre.bahurel@mercator-ocean.fr www.mercator-ocean.eu http://marine.copernicus.eu	45/80																						
NEOCEAN Directeur : Vincent Dufour, contact@neocean.com www.neocean.com	2/2																						
Noveltis PDG : Richard Bru, richard.bru@noveltis.fr www.noveltis.com	12/37																						
QEM • Quadran Énergies Marines DG : Olivier Guiraud, contact@eolmed.fr www.quadran-marines.com	0/12																						
TAS • Thalès Alenia Space Directeur (site de Toulouse) : Albert Cerro, albert.cerro@thalesaleniaspace.com www.thalesgroup.com/fr	NC*																						
Telespazio France PDG : Jean-Marc Gardin, contact@telespazio.com www.telespazio.fr	10/300																						
Waves'n See Directeur : Yves Soufflet, yves.soufflet@wavesnsee.com www.wavesnsee.com/fr/	2/2																						

* NC : non communiqué

Structures fédératives de recherche	Chap. 1			Chap. 2		Chap. 3				Chap. 4						Chap. 5					Chap. 6	
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2
EID Méditerranée • Entente interdépartementale pour la démoustication du littoral méditerranéen Directeur : Bruno Tourre, btourre@eid-med.org www.eid-med.org																						
EMBRC-France • European Marine Biological Resource Center (Sorbonne Université/CNRS) Directeur : Bernard Kloareg, kloareg@sb-roscoff.fr www.embrc-france.fr																						
GEOSUD (EquipEx) • GEOinformation for Sustainable Development (AgroParisTech/Cerema/CINES/Cirad/CNRS/IGN/IRD/Irstea/UM/Univ. Antilles/Univ. Guyane/Univ. La Réunion/AFIGEO/Geomatys) Coordinateur : Pierre Maurel, pierre.maurel@irstea.fr http://ids.equipe-geosud.fr																						
InToSea (LabCom) • Laboratoire commun « Innovative Tools under the sea » (UM/Andromède Océanologie) Directeurs : Nicolas Mouquet et Julie Deter, nicolas.mouquet@cnsr.fr / julie.deter@umontpellier.fr http://labcomr2c.edu.umontpellier.fr																						
OHM-LM • Observatoire Hommes-Milieux « Littoral méditerranéen » (CNRS) Directeurs : Samuel Robert & Patrick Monfort, samuel.robert@univ-amu.fr / patrick.monfort@umontpellier.fr www.ohm-littoral-mediterraneen.fr																						
OMP (OSU) • Observatoire Midi-Pyrénées (UT3/CNRS/CNES/IRD/Météo-France) Directeur : Mike Toplis, michael.toplis@obs-mip.fr www3.obs-mip.fr/omp																						
OOB (OSU) • Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer (Sorbonne Université/CNRS) Directeur : Vincent Laudet, vincent.laudet@obs-banyuls.fr www.php.obs-banyuls.fr																						
OREME (OSU) • Observatoire de REcherche Méditerranéen de l'Environnement (UM/CNRS/IRD/Irstea) Directeur : Éric Servat, eric.servat@umontpellier.fr www.oreme.org																						
Pôle Mer Méditerranée • (Représentation en Occitanie) Directeur : Patrick Baraona, landi@polemermediterranee.com baraona@polemermediterranee.com Déléguée Occitanie : Julie Person, person@polemermediterranee.com www.polemermediterranee.com																						



▲ Gorgonocéphale. © Thomas Changeux / IRD

Occitanie : une Région qui s'engage pour la mer et son littoral

Facteur d'attractivité et de développement économique, la Méditerranée est aussi un marqueur social et culturel essentiel pour la région et ses 5,7 millions d'habitants. C'est donc avec une vraie volonté politique que la Région construit son ambition maritime pour et avec les habitants d'Occitanie.

Le Parlement de la Mer : un outil unique en France

Cette volonté de démocratiser la Méditerranée s'est concrétisée dès 2013 avec la création du **Parlement de la Mer, instance de concertation originale qui fédère et représente la communauté maritime régionale**. La gouvernance de cet outil inclusif est constituée d'un forum ouvert de plus de 2 000 membres, d'une assemblée de 200 membres représentant des collectivités, des socio-professionnels et de la société civile ainsi que d'un bureau composé de 15 personnes parmi lesquelles des socio-professionnels et des élus.

Au-delà de la démocratisation, la réappropriation de l'espace maritime et littoral est un enjeu majeur pour les entreprises, les usagers, les citoyens et les collectivités. Celle-ci passe notamment par le déploiement d'une vision stratégique et prospective du littoral afin d'impulser un nouvel élan économique et façonner le littoral du 21^e siècle, avec de nouveaux moyens pour aménager durablement la côte et en moderniser les infrastructures vieillissantes.

Le Plan Littoral 21 : « dans notre région, une nouvelle ambition pour le littoral »

Deuxième outil, le **Plan Littoral 21 a pour ambition d'accompagner la transition économique, écologique et sociale du littoral**. Résilience écologique, développement économique et innovation, attractivité territoriale, bien vivre ensemble et ouverture sur la Méditerranée, sont autant d'orientations stratégiques de ce Plan. Il rend possible cette innovation de rupture pour le littoral d'Occitanie avec la mobilisation, d'ici fin 2020, d'un milliard d'euros d'investissement de l'État, de la Région, de la Caisse des Dépôts, des collectivités territoriales et des entreprises privées. Depuis 2017, avec plus de **300 projets et près de 600 millions d'euros d'investissement**, le Plan Littoral 21 s'avère un catalyseur des dynamiques d'investissement mises en œuvre sur le littoral d'Occitanie. Pour 71 % des investissements, le Plan Littoral 21 se concentre sur « une économie innovante qui irrigue tout le territoire ».

L'innovation, l'ADN de la Région Occitanie

Stimuler la croissance et le développement économique, transformer les habitudes, se projeter vers l'avenir tout en respectant les activités traditionnelles et l'identité du territoire... sont les enjeux auxquels doit faire face le littoral d'Occitanie. Pour y parvenir, l'innovation doit être au cœur des ambitions.

Depuis 2007, chaque Région développe une **Stratégie Régionale de l'Innovation (SRI)** à la demande de la Commission Européenne dans le cadre de la politique de fonds structurels. En 2014, est venu se rajouter ce que la Commission appelle la « stratégie de spécialisation intelligente » qui a pour objectif de concentrer les investissements sur un nombre restreint de secteurs innovants pour ainsi se démarquer et être compétitif au niveau mondial. Une partie des fonds structurels, mais aussi des financements nationaux et régionaux (PIA3 régionalisé, appels à projets collaboratifs régionaux, etc.), sont dédiés à des domaines précis, à fort potentiel ou en émergence.

Dans le cadre de la **SRI, co-pilotée par l'État et la Région, sous l'impulsion de l'Europe, sept domaines de « spécialisation intelligente » ont été définis pour l'Occitanie jusqu'en 2020 dont « l'économie du littoral et de la mer »**. Ce dernier couvre l'environnement et l'aménagement durable du littoral, les ressources énergétiques et minières marines, les ressources biologiques marines, la plaisance et les activités nautiques, la sécurité et sûreté maritimes, les ports, les infrastructures et les transports maritimes. Plus globalement, il répond à **l'enjeu de faire de l'Occitanie un modèle d'innovation pour le littoral et la mer**.



▲ La Maison Régionale de la Mer, siège du Parlement de la Mer. © Laurent Boutonnet

Démocratiser la mer et offrir des perspectives de transition écologique et économique bleue aux habitants

Littoral + : le volet innovation du Plan Littoral 21

Avec pour ambition de « **faire du littoral d'Occitanie un territoire modèle des espaces littoraux attractifs et pérennes de demain** », le **projet Littoral+, porté par la Région**, fait partie des 24 lauréats, sur les 117 candidatures, de l'Appel à Manifestation d'Intérêt de l'action « Territoires d'innovation de grande ambition » (TIGA) lancée en 2017. Trois enjeux fondent cette candidature et l'ambition générale du projet :

- la performance et la diversification (activités traditionnelles, activités nouvelles) de l'économie du littoral ;
- l'économie des ressources naturelles du littoral et la conservation du patrimoine naturel ;
- la résilience du littoral.

Les actions proposées illustrent ces enjeux : *big data* littoral, lab territorial sur le bassin de Thau, réutilisation des eaux usées traitées, production d'hydrogène vert à partir des éoliennes en mer, résilience de l'habitat face aux risques naturels, aménagement d'une zone rétro-littorale avec de l'habitat modulable, etc.

Depuis janvier 2018, grâce à des études d'ingénierie, la Région, avec ses partenaires industriels et académiques, consolide les actions « Littoral + » afin de répondre aux attentes de l'appel à projets « Territoire d'Innovation ».

Un riche vivier de compétences en science, technologie et d'accompagnement des innovations de rupture dans les filières maritimes

La région est dotée d'un vivier exceptionnel de compétences pour accompagner sa transformation, avec quatre pôles de compétitivité (Eau, Mer, Énergie renouvelable, *French Tech*), une Agence de développement économique (Ad'Occ), un centre technique dédié aux filières halieutiques (Cépralmar), plus de 500 entreprises dans le domaine de l'eau, plus de 600 entreprises dans le domaine des énergies renouvelables, plus de 16 000 entreprises dans la filière numérique et **plus de 700 scientifiques fortement impliqués sur les thématiques « mer et littoral »**.

Avec ses 7 universités, 11 organismes de recherche, et plus de 20 grandes écoles, la région Occitanie est forte d'un potentiel exceptionnel en matière d'enseignement supérieur et de recherche. Fondée sur le double principe de l'excellence et de la proximité, la Région met en place une politique d'ampleur, repensée pour soutenir l'enseignement supérieur, le transfert technologique et la recherche.

Plus d'informations :

Parlement de la Mer : www.laregion.fr/Parlement-de-la-mer

Plan Littoral 21 : http://occitanie.direccte.gouv.fr/sites/occitanie.direccte.gouv.fr/IMG/pdf/plan_littoral_21.pdf

SRI : www.sri-occitanie.fr

SRESRI : www.laregion.fr/SRESRI

Le Schéma Régional de l'Enseignement Supérieur, de la recherche et de l'Innovation

Dans le cadre de sa Stratégie Régionale pour l'Emploi et la Croissance (SREC), l'Assemblée plénière du Conseil Régional a adopté, le 2 février 2017, le Schéma Régional de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation (SRESRI). **Ce schéma constitue le cadre politique de référence pour l'action de la Région Occitanie en matière d'enseignement supérieur, de recherche et d'innovation pour la période 2017-2021**. Il définit les orientations et les priorités en matière d'intervention de la Région et des autres collectivités territoriales dans ces domaines, en cohérence avec les stratégies nationales de l'État. Aussi, le SRESRI a vocation à s'articuler avec l'ensemble des autres schémas régionaux liés à l'enseignement supérieur ou à l'innovation, notamment le Contrat de Plan Régional des Formations et de l'Orientation Professionnelle (CPRDFOP) et le Schéma Régional du Développement Économique, de l'Innovation et de l'Internationalisation (SRDEII).

Pour mettre en œuvre le SRESRI sur la période 2017-2021, la Région a développé **17 dispositifs de soutien aux formations et projets de recherche, au transfert technologique aux entreprises et à la diffusion de la science, avec un budget annuel de plus de 100 millions d'euros**.

La Région a la volonté de construire les emplois de demain en renforçant l'équité d'accès à l'enseignement supérieur et en stimulant la recherche, préalable à l'innovation, sous toutes ses formes et sur l'ensemble du territoire.



▲ Carole Delga, Présidente de la région Occitanie, au Parlement de la Mer. © Laurent Boutonnet / Région Occitanie

L'Économie du Littoral et de la Mer : « un domaine prioritaire de la Stratégie Régionale d'Innovation Occitanie »

Liste des acronymes & abréviations

AFIGEO	Association française pour l'information géographique
AIS	<i>Automatic Identification System</i> / Système d'identification automatique
AMP	Aire marine protégée
ANR	Agence Nationale de la Recherche
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BWM	Convention internationale pour le contrôle et la gestion des eaux de ballast et sédiments des navires
CeMEB	Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CestMed	Centre d'étude et de sauvegarde des Tortues Marines de Méditerranée
CICTA	Commission internationale pour la conservation des thonidés de l'Atlantique
CINES	Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNES	Centre national d'études spatiales
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CPIE	Centre permanent d'initiatives pour l'environnement
CREM	Centre de Recherche sur les Écosystèmes Marins
EHESS	École des hautes études en sciences sociales
EID	Entente Interdépartementale de Démoustication
EMBRC	Centre national de ressources biologiques marines
EPHE	École Pratique des Hautes Études
EquipEx	Équipement d'excellence
ESA	<i>European Space Agency</i>
FEDER	Fonds européen de développement régional
FFESSM	Fédération française d'études et de sports sous-marins
GEM	Groupe d'Étude du Mérrou
GIS	Groupement d'intérêt scientifique
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
IMT	Institut Mines-Télécom
Inra	Institut national de la recherche agronomique
Inria	Institut national de recherche en informatique et en automatique
INSU	Institut national des sciences de l'Univers
InToSea	<i>Innovative Tools under the Sea</i>
IRD	Institut de recherche pour le développement
Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
I-Site	Initiatives – Science - Innovation - Territoires - Économie
LabEx	Laboratoire d'excellence
LEFE	Programme « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »
LIDAR	<i>Light (ou Laser Imaging) Detection And Ranging</i>
MEDIMEER	<i>MEDiterranean platform for Marine Ecosystem Experimental Research</i>
MUSE	Montpellier Université d'Excellence
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i> / Oscillation Nord-Atlantique
NAPPEX	Nurseries artificielles pour ports exemplaires
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OHM-LM	Observatoire Hommes-Milieus « Littoral méditerranéen »
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
OOB	Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer
OREME	Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers
PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PIA	Programme « Investissements d'Avenir »
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
R&D	Recherche et développement
RTMMF	Réseau Tortues Marines de Méditerranée Française
SNO	Service national d'observation
SRI-3S	Stratégie Régionale d'Innovation- Stratégie de Spécialisation Intelligente
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UM	Université de Montpellier
UMR	Unité mixte de recherche
UMS	Unité mixte de service
UPVD	Université de Perpignan <i>Via Domitia</i>
UPVM	Université Paul-Valéry Montpellier 3
USR	Unités de service et de recherche
UT3	Université Toulouse III - Paul Sabatier

Les structures suivantes ont contribué à la réalisation de ce dossier

*** Organismes membres d'Agropolis International**

AFIGEO	Kimiyo
AgroParisTech*	Mercator Ocean International
Ailerons	Météo-France
Andromède Océanologie	Montpellier SupAgro*
BRGM*	NEOCEAN
BRL Ingénierie*	Noveltis
Cerema	OHM-LM
CERFACS	OMP
CestMed	ONERA
CINES	OOB
Cirad*	OREME
CNES	Parc des calanques
CNRS	Parc naturel marin du golfe du Lion
Collecte Localisation Satellites	Peau-Bleue
CPIE Bassin de Thau	Pôle Mer Méditerranée
Cybelles Planète	Quadrans Energies Marines
Ecocean	Quai des Savoirs
EID Méditerranée	Région Occitanie*
EMBRC-France	Réserve naturelle marine Cerbère-Banyuls
EPHE	RTMMF
FFESSM	Science Animation
GEM	SHOM
Geomatys	Sorbonne Université
GEOSUD	Telespazio France
GRAINE Occitanie	Thalès Alenia Space
Ifremer	Train du Climat
IGN	UM*
IMT Mines Alès	Université de la Guyane
Inra*	Université de La Réunion
Inria	Université des Antilles
Institut marin pour les écosystèmes méditerranéens	UPVD*
InToSea	UPVM*
IRD*	UT3
Irstea*	Waves'n See

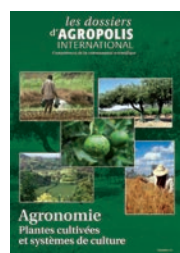
Ont participé à ce numéro :

N.-E. Abriak, C. Alazard, C. Aliaume, J. Almany, R. Almar, I. Amsallem, M. Andrello, C. Arnal, S. Arnaud-Haond, D. Aubert, J.-C. Auguet, N. Azema, Y. Balouin, J. Bandelier, E. Bappel, M. Barral, L. Barthelmebs, A. Bas, M.-A. Bassetti, L. Batté, J. Baudart, C. Bazart, B. Bec, S. Bejannin, R. Benshila, A. Berger, A. Berger Sabbatel, S. Bernard, I. Berry-Chikhaoui, Y. Bettarel, N. Bierre, F. Birol, F. Bonhomme, S. Bonhommeau, P. Bonifacio, D. Bonnet, F. Bouchette, F.-Y. Bouget, D. Boulet, G. Boulet, T. Boulinier, J. Bourjea, B. Bourrin, T. Bouvier, L. Bramanti, X. Briottet, R. Bru, J.-R. Brunet, J. Cabaret, F. Cadene, R. Caillibotte, M. Callier, S. Campagna, F. Carcaillet, C. Cassou, J. Catanzano, J.-P. Cauzac, A. Célérier, R. Certain, R. Chailan, B. Chatain, M. Chaumont, V. Chavagnac, J. Claudet, P. Conan, P. Constantin, P. Courtois, D. Cové, V. Creuze, L. Crosnier, L. Dabbadie, L. Dagorn, G. Darmon, A. Darnaude, G. David, J. de Lorget, C. de Nicola, G. Dera, V. Derolez, J. Deter, M. Dégremont, R. de Wit, V. Ducrocq, V. Dufour, X. Durrieu de Madron, E. Emmanuelli, H. Escriva, C. Estournel, É. Fache, M.-H. Favant, S. Fillon, S. Fonbonne, A. Fontcuberta, P.-Y. Foucher, É. Fouilland, N. Fraysse, J.-M. Fromentin, P.-A. Gagnaire, P. Galand, P. Gaspar, C. Gesnin, J.-F. Ghiglione, D. Giband, A. Gigou, O. Gimenez, K. Godary-Dejean, C. Gonzalez, C. Goyet, D. Grémillet, J.-M. Groul, M. Groc, A. Gudefin, Y. Gueguen, K. Guizien, T. Hattab, L. Hédouin, C. Hérivaux, M. Herrmann, G. Herrouin, V. Heurteaux, H. Heutefeu, F. Holon, F. Houngmandan, B. Hubert, I. Hubiche, D. Ienco, P. Ienny, C. Iovan, C. Jacob, A. Jadaud, C. Jeandel, F. Jeliazovski, D. Jourdan, G. Junqua, A. Justice-Espenan, P. Kerhervé, V. Kerzérho, H. Labach, C. Labrune, D. Lacroix, V. Lajarige, C. Lambert J. Langot, L. Lapierre, M. Lapinski, G. Larnicol, V. Laudet, E. Launay, A. Laurent, V. Lavaud-Letilleul, P. Lebaron, G. Lecaillon, G. Le Cozannet, F. Lefevre, P.-Y. Le Meur, P. Lenfant, M. Leonard, F. Leprieux, Y. Leredde, D. Lestang, P. Louisy, C. Lucion, W. Ludwig, F. Lyard, J. Macaruella, A. Maillard-Lenoir, P. Maisongrande, S. Manel, A. Mangos, P. Marchesiello, P. Marin, F. Marques, G. Marre, S. Mas, P. Masaleix, S. Mathieu, L. Mathon, B. Maurel, P. Maurel, O. Maury, A. Melet, F. Messal, B. Meyssignac, C. Miaud H. Michaud, J.-M. Miossec, G. Mitter, P. Monfort, C. Montagnani, M. Morineaux, B. Mostajir, D. Mouillot, N. Mouquet, S. Muttoni, N. Pade, D. Parin, A. Pasquet, C. Payri, D. Perrin, M. Petit, L. Phalippou, N. Picot, G. Piganeau, S. Pioch, S. Planton, J. Poirier, F. Poisson, N. Quérou, H. Rey-Valette, M. Richard, N. Rivière, E. Rodary, P. Romans, E. Roque, A. Rousseau, V. Rousseau, T. Rouyer, J. Sacchi, D. Salas y Mélia, M. Salgues, J.-M. Salles, S. Sanchez, C. Sarau, A. Schneider, J.-B. Sénégas, E. Servat, F. Sevault, V. Severac, Y. Shin, E. Simon, C. Skandrani, J.-C. Souche, Y. Soufflet, S. Somot, D. Stien, M. Suzuki, I. Taupier-Letage, M. Tchakérian, L. Terray, C. Thomas-Courcoux, S. Thorin, C. Tison, L. Tokarski, M. Toplis, G. Toulemonde, F. Touratier, W. Travers, J. Triboulet, A.-S. Tribot, N. Turque, P. van Beek, S. Vaz, F. Vidussi, L. Vigliola, M. Vittecoq, R. Vuillemin, R. Waldman.

Remerciements pour l'iconographie : tous les contributeurs au dossier ainsi que
 Éric Bappel (GEOSUD), Anaïs Deprez (Plateforme Océan et Climat),
 Rémy Dubas (Ecocean), Daina Rechner (Photothèque INDIGO), Pascal Romans (OOB),
 Sébastien Villegier (MARBEC).

Également disponible en **anglais**

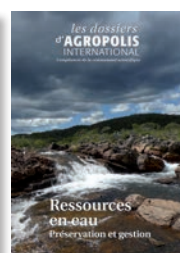
Les informations contenues dans ce dossier sont valides au 31/12/2018.



Juillet 2010
68 pages (2^{ème} éd., 2012)
Français et anglais



Octobre 2010
84 pages
Français et anglais



Février 2012
72 pages
Français, anglais, espagnol



Octobre 2012
48 pages
Français et anglais



Février 2013
48 pages
Français, anglais, espagnol



Octobre 2013
76 pages
Français



Décembre 2013
72 pages
Français



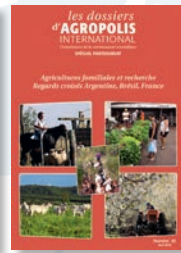
Février 2014
64 pages
Français, anglais, espagnol



Février 2015
88 pages
Français et anglais



Novembre 2015
76 pages
Français et anglais



Avril 2016
72 pages
Français



Juin 2018
80 pages
Français et anglais

Les dossiers d'Agropolis International

La collection des *dossiers d'Agropolis International* est un outil phare de présentation et de promotion des compétences des membres d'Agropolis International sur des problématiques scientifiques majeures. Chaque dossier est consacré à une thématique spécifique. Les unités de recherche et les formations concernées y sont présentées ainsi que les travaux menés et leurs résultats. Les dossiers donnent aussi un éclairage sur les apports de la société civile, de la sphère économique et des collectivités territoriales dans ces domaines. Chaque dossier est décliné en version papier et numérique, généralement en deux langues (français et anglais).

Pour découvrir tous les numéros :
www.agropolis.fr/publications/dossiers-thematiques-agropolis.php

Directeur de la publication :
 Jean-Luc Khalfaoui (Président, Agropolis International)

Communication et diffusion :
 Nathalie Villeméjeanne (Agropolis International)

Coordination scientifique :
John Bandelier (Kimiyo), Bernard Hubert (Inra, EHESS, Agropolis International),
Catherine Jeandel (CNRS), Philippe Lebaron (Sorbonne Université, CNRS),
Michel Petit (Agropolis International), Hélène Rey-Valette (UM), Pierre Soler (OMP)

Coordination éditoriale et rédaction :
Isabelle Amsallem (Agropolis International) & Michel Petit (Agropolis International)

ISSN : 1628-4240 • **Dépôt légal :** février 2019

AGROPOLIS
INTERNATIONAL

1000 avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France

Tél. : +33 (0)4 67 04 75 75

Fax : +33 (0)4 67 04 75 99

agropolis@agropolis.fr

www.agropolis.fr