

Changement climatique & *biodiversité et écosystèmes*

Les études scientifiques menées depuis plusieurs décennies, qui trouvent un large écho dans le dernier rapport du GIEC, montrent chez beaucoup d'espèces terrestres, dulcicoles et marines, une évolution de l'aire de répartition, des activités saisonnières, des mouvements migratoires, de l'abondance et des interactions interspécifiques découlant du changement climatique en cours. La nature et l'ampleur des perturbations à venir sont difficiles à prévoir et à anticiper, compte tenu de la faible échelle de temps à laquelle elles se produisent et de la diversité des réponses biologiques, mais aussi de la complexité des interactions entre espèces et des espèces avec leur environnement. On peut cependant affirmer qu'elles sont sans précédent sur une aussi courte période dans l'histoire de la Terre.

L'acquisition de connaissances sur la vulnérabilité future, l'exposition et la capacité de réaction des systèmes naturels, interconnectés aux sociétés, constitue donc un défi majeur posé à la science, en raison du nombre de facteurs en jeu et de leurs interactions complexes. Cette problématique est abordée de manière très large et pluridisciplinaire par les équipes de recherche présentes en Languedoc-Roussillon, à travers l'étude des transformations du monde vivant, de l'évolution de la biodiversité et des écosystèmes et de l'adaptation au changement climatique et, ce, à différentes échelles de temps (du court au long terme), d'espace et d'organisation du vivant (des génomes aux écosystèmes).

Ces travaux — qui concernent non seulement des organismes « modèles », mais aussi les spécificités des milieux méditerranéens ou tropicaux — s'appuient en partie sur des observatoires permanents (en milieu terrestre comme en milieu marin) et des plateformes expérimentales de pointe (Écotron, MEDIMEER, Centre national de ressources biologiques marines).

Ce chapitre offre un panorama des unités de recherche régionales qui étudient, d'une manière ou d'une autre, l'impact du changement climatique sur les écosystèmes continentaux, d'une part, et sur les écosystèmes marins, d'autre part.

Les recherches menées visent à comprendre la dynamique et le fonctionnement de la biodiversité (grâce à des démarches d'observation sur le terrain, avec l'appui de l'OSU OREME, et d'expérimentation en conditions contrôlées, couplées à des approches théoriques et à la modélisation). Elles visent également à prévoir les conséquences biologiques des changements planétaires (à l'aide de scénarios), à anticiper l'évolution des services écosystémiques et à définir des modalités de gestion adaptative des espèces et des milieux.

**Philippe Jarne (UMR CEFE)
& Philippe Lebaron (OOB)**

Biodiversité et écosystèmes continentaux

Une grande partie des recherches menées sur les écosystèmes et la biodiversité continentaux sont fédérées au sein du LabEx CeMEB. Les approches développées font appel à un large corpus de disciplines (écologie, biologie des populations, botanique, génétique, physiologie, informatique, etc.). Elles ont pour objectif d'étudier la dynamique des écosystèmes et leur réponse aux changements climatiques, en milieu naturel ou pseudo-naturel. Le site expérimental méditerranéen de Puéchabon ou les zones humides des basses plaines de l'Ain fournissent de bons exemples. Les approches se font aussi en milieu contrôlé, par exemple dans les enceintes confinées de l'Écotron, en serre ou en animalerie. Ces approches portent aussi sur les mécanismes d'adaptation des espèces à leur environnement aux points de vue génotypique, phénotypique ou biogéographique. On peut citer, à titre d'exemple, la simulation de l'aire de répartition de plusieurs espèces d'arbre en lien avec les prévisions du changement climatique (projet Evorange).

Les objets d'étude vont des microorganismes aux plantes et aux animaux, portent sur l'ensemble des écosystèmes (terrestres, aquatiques, sols), de l'équateur aux pôles avec une emphase sur les écosystèmes méditerranéens et tropicaux. Ceux-ci sont étudiés dans leurs relations avec les sociétés, afin d'en définir les modalités de gestion adaptative (voir par exemple les projets REDD et INFORMED). Les espèces et communautés d'espèces sont appréhendées aussi bien au niveau de leur diversité, de leur structure, de leur organisation que de leur fonctionnement. Des représentations mathématiques et informatiques des organes, des plantes, des peuplements, des paysages et des processus, sont élaborées à des fins d'analyse ou de prédiction et de simulation. Les sols font l'objet d'une attention particulière, non seulement en tant que substrat nutritif pour les plantes, mais aussi en tant que milieu abritant une riche biodiversité d'organismes essentiels à la réalisation des cycles biogéochimiques. Des méthodes d'ingénierie écologique, par exemple basées sur les symbioses entre plantes et microorganismes et visant à restaurer les milieux dégradés, sont également à l'étude.

Une des forces de la communauté repose sur la prise en compte explicite des relations homme-milieu, par des approches intégrant les sciences humaines et sociales. On peut citer les travaux sur les services écosystémiques ou encore l'évaluation des capacités des écosystèmes en tant que sources ou puits de carbone dans la perspective d'atténuer les effets de l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère.

**Sophie Boutin (LabEx CeMEB)
& Philippe Jarne (UMR CEFE)**

Les structures principales

Écotron européen de Montpellier
(CNRS)
7 scientifiques

LabEx CeMEB
Centre Méditerranéen de
l'Environnement et de la Biodiversité
(UM/UPVM/Montpellier SupAgro/CNRS/IRD/
Inra/Cirad/EPHE/Inrap/UNimes)
630 scientifiques

OSU OREME
Observatoire de Recherche
Méditerranéen de l'Environnement
(UM/CNRS/IRD)
10 scientifiques

UMRAMAP
botANique et Modélisation
de l'Architecture des Plantes
et des végétations
(Cirad/CNRS/Inra/IRD/UM)
54 scientifiques

UMR CEFE
Centre d'Écologie Fonctionnelle
et Évolutive
(Cirad/IRD/Montpellier SupAgro/
UM/UPVM/CNRS/EPHE)
86 scientifiques

Suite p. 31

▼ *Éclosion des bourgeons végétatifs et des fleurs femelles de mélèze, stades phénologiques suivis au sein de l'Observatoire des saisons (www.obs-saisons.fr).*

Les événements phénologiques, plastiques face aux conditions environnementales et capables d'évoluer rapidement sous l'effet du réchauffement climatique, constituent des traits adaptatifs majeurs chez les arbres (qui ont un temps de génération long). Ils expliquent une part importante de leur répartition géographique.



© E. Gritti

Partager et transmettre le savoir sur la biodiversité et les écosystèmes face aux changements planétaires

Labellisé « Laboratoire d'Excellence » par le programme « Investissement d'Avenir » 2011-2019 de l'ANR, le « *Centre Méditerranéen de l'Environnement et de la Biodiversité* » (LabEx CeMEB – UM, UPVM, Montpellier SupAgro, CNRS, IRD, Inra, Cirad, EPHE, Inrap, UNîmes) est une structure fédérative regroupant neuf unités de recherche (AMAP, CBAE*, CBGP, CEFÉ, Eco&Sols, Écotron, ISEM, LAMETA, MIVEGEC).

Le CeMEB définit des stratégies communes sur ses secteurs d'intervention, en concertation étroite avec les partenaires locaux et régionaux fédérant l'observatoire des sciences de l'univers (OSU) OREME, le DiPEE de Montpellier, le comité thématique d'établissement (CTE) B3E de l'Université de Montpellier et d'autres LabEx[†]. Il poursuit également des missions d'appui à la recherche (doctorat, post-doctorat), d'animation scientifique (organisation et financement

d'ateliers, de rencontres et de programmes de science participative), de formation (public professionnel, enseignants et futurs enseignants du secondaire...), de transfert et de valorisation (portail web en écologie et biodiversité, participation aux Assises de la Biodiversité 2014...).

Le LabEx CeMEB travaille sur les champs disciplinaires suivants :

- dynamique de la biodiversité, écologie et biologie évolutive ;
- rôle fonctionnel de la biodiversité et services des écosystèmes ;
- santé-environnement ;
- socioéconomie de l'environnement ;
- conséquences biologiques des changements planétaires.

Ses objectifs sont :

- de comprendre la dynamique et le fonctionnement de la biodiversité en combinant observation, expérimentation et modélisation ;
- de prévoir les conséquences biologiques des changements planétaires à l'aide de scénarios ;
- d'anticiper l'évolution des services écologiques et des sociétés humaines.

Le projet LabEx CeMEB propose :

- de mettre en place un centre d'expertise et de connaissance sur la biodiversité devant répondre à la croissance des demandes d'intervention du monde de la recherche sur les questions de biodiversité, tant auprès des scolaires ou du grand public que de milieux plus spécialisés. Il aura également pour objectif l'amélioration des capacités d'expertise et d'appui aux décideurs, aménageurs, gestionnaires et autorités publiques ;
- de créer de nouvelles formations au niveau licence et master, et d'ouvrir la formation des doctorants au management et à l'environnement économique, afin de faciliter leur insertion professionnelle. ●●●

* UMR CBAE : Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie (CNRS, UM, EPHE).

** DiPEE : Dispositifs de Partenariat en Écologie et Environnement ; B3E : Biologie Écologie Évolution Environnement

La réponse de la diversité fongique au changement climatique : l'utilisation de collections d'herbier âgées de 170 ans

Comparer la distribution actuelle de la diversité biologique à ce qu'elle était il y a 200 ans est rendu difficile par la rareté de données anciennes de qualité. Lorsque de telles données existent, elles sont généralement issues d'échantillonnages datant de quelques décennies tout au plus. Lorsque le pas de temps étudié s'allonge, des changements importants interviennent aussi bien en termes de nomenclature des espèces étudiées que de dénomination des lieux d'observation. Par ailleurs, il est fréquent que des données climatiques collectées lors de campagnes aussi éloignées dans le temps concernent les mêmes stations.

L'ensemble de ces contraintes donne une idée de la valeur exceptionnelle des données constituées autour de Montpellier entre 1820 et 1850, par de Candolle et ses successeurs de l'Institut Botanique de Montpellier, et conservées jusqu'à nos jours par l'Herbier de Montpellier. Ces collections constituent ainsi l'un des plus anciens jeux de données mycologiques assemblés en un herbier et localisés avec précision. Ces données sont par ailleurs assignées à des informations climatiques précises, relevées manuellement au moment de l'échantillonnage.

Après un important travail de réassignation nomenclaturale et d'analyse des données météorologiques, ces informations ont été comparées à des relevés réalisés dans la même région sur la période 2000-2010. Les équipes impliquées (Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault, CEFE, Biotope, Laboratoire de Botanique, Phytochimie et Mycologie, Herbier de l'Université de Montpellier, Laboratoire des Sciences Végétales et Fongiques) ont ainsi pu mettre en évidence que, en l'espace de deux siècles, les espèces de champignons décomposeurs et mutualistes ont retardé leur fructification de deux à trois semaines, alors que dans le même temps certains paramètres climatiques (température moyenne, distribution temporelle des pluies) montrent d'importants changements.

Ces grandes tendances connaissent des variations spécifiques parfois fortes et sont modulées par les traits écologiques des espèces (espèces d'arbres associées, type de substrat...), et permettent par exemple de constater que certains champignons largement consommés autrefois, et faisant l'objet d'un commerce à Montpellier, ont aujourd'hui très fortement régressé.

Contact : Franck Richard, franck.richard@cefe.cnrs.fr

© Delile



▲ Pivoulade d'éouse, dessin de Delile (Herbier de Montpellier).

La collybie à pieds en fuseau (*Collybia fusipes*) était aussi appelée « pivoulade d'éouse » lorsqu'elle était vendue sur le marché des Arceaux au début du 19^e siècle. Cette espèce s'est aujourd'hui considérablement raréfiée autour de Montpellier.

Le champ immense des adaptations biologiques aux changements environnementaux

Des microorganismes à l'écosystème, de la plasticité phénotypique aux migrations et à la sélection naturelle, le « Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive » (UMR CEFE – Cirad, IRD, Montpellier SupAgro, UM, UPVM, CNRS, EPHE) développe des recherches couvrant une multitude d'aspects par lesquels le monde vivant s'adapte aux changements climatiques.

Comprendre et prévoir l'ensemble de ces bouleversements est une tâche ardue face à la complexité :

- des changements (tendances générales, variation régionales ou saisonnières, etc.) ;
- de la diversité biologique et de ses champs de réponse (génétiques, phénotypiques, biogéographiques) ;
- des interactions entre ces changements et les différents niveaux de réponse de la diversité biologique.

De par la diversité de ses approches au sein des départements « Écologie Évolutive », « Écologie Fonctionnelle »,

« Biodiversité et Conservation », et « Interactions, Écologie et Sociétés », le CEFE est un acteur de premier plan dans le développement d'une vision multidisciplinaire et intégrée des changements récents et à venir de nos écosystèmes.

Les recherches qui y sont développées associent des travaux de court et de long termes portant sur de nombreuses classes d'organismes à travers ces trois modes d'adaptation :

- L'adaptation génotypique concerne les processus bien connus sous le nom de « sélection naturelle darwinienne ». La diversité génétique des populations d'organismes est ici le facteur clé de l'adaptation des espèces à travers la sélection des génotypes les mieux adaptés aux changements en cours. La disparition de biodiversité qui en découle au sein des espèces est une source potentielle d'inquiétude pour la résistance de nombreuses classes d'organismes aux successions de changements à venir.
- L'adaptation phénotypique correspond à la plasticité phénotypique, c'est-à-dire à la capacité, à partir d'un génotype unique, de produire plusieurs

phénotypes selon les conditions du milieu. Cette plasticité physiologique, morphologique, comportementale ou encore phénotypique est dite « adaptative » si elle permet de maintenir ou d'accroître la valeur sélective face aux changements du milieu. Les limites et les coûts de cette plasticité, notamment en conditions d'interactions multitrophiques, jouent donc un rôle crucial dans la capacité des organismes à s'adapter aux changements climatiques.

- L'adaptation biogéographique concerne les espèces capables de migrer ou de se disséminer vers les zones bioclimatiques les plus favorables à leur survie. La capacité des organismes à se propager est très variable entre espèces et dépend du contexte biogéographique de leurs aires de répartition. Face à la rapidité des changements climatiques en cours et au morcellement des aires naturelles par les activités humaines, la capacité de déplacement des populations représente un enjeu majeur d'adaptation aux changements climatiques.

Associer la biologie et la paléontologie pour replacer les transformations du vivant face aux changements climatiques dans le contexte de leur adaptation historique

L'« Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier » (UMR ISEM – CNRS, UM, IRD, EPHE) réunit paléontologie et biologie des populations. Il a été créé avec la volonté d'encourager la voie de la pluridisciplinarité dans l'approche des transformations du monde vivant.

Les recherches au sein de l'ISEM concernent l'origine et la dynamique de la biodiversité, ainsi que les modalités et les mécanismes de son évolution. Les chercheurs de cette unité s'intéressent aussi bien à la biodiversité actuelle que passée, étudient un large éventail d'organismes et de milieux, et allient des approches de terrain, expérimentales et théoriques. Ces recherches intègrent les questions fondamentales de la biologie évolutive (adaptation, spéciation), l'accélération des moyens de production de données (révolution de la génomique, programmes de science participative), ainsi que le questionnement scientifique et sociétal portant sur les réponses de la biodiversité vis-à-vis des changements planétaires et anthropiques.

Les recherches menées à l'ISEM abordent l'étude de l'adaptation aux changements climatiques à des échelles multiples de temps, d'espace et d'organisation du vivant, depuis l'échelle très fine des génomes jusqu'à celle des écosystèmes. Les réponses adaptatives étudiées vont des modifications physiologiques des organismes (notamment, dans une perspective d'adaptation des pratiques d'aquaculture au changement climatique, *via* l'étude des normes de réaction des œufs, embryons et larves des poissons vis-à-vis de la température) jusqu'aux changements de composition des communautés à très large échelle spatiale.

À partir de jeux de données issus de programmes de science participative, l'ISEM a notamment montré que, à l'échelle de toute l'Europe, les communautés d'oiseaux et de papillons subissent des modifications interprétables dans le cadre du réchauffement climatique, mais aussi que le rythme de réponse des communautés est inférieur à celui de l'augmentation des températures, engendrant une dette climatique pour la biodiversité.

L'étude des réponses de la biodiversité aux changements climatiques passés est, à l'ISEM, une force des recherches sur l'adaptation au changement climatique : cela

permet de replacer les défis adaptatifs auxquels les espèces sont confrontées actuellement dans le contexte de leur histoire d'adaptation.

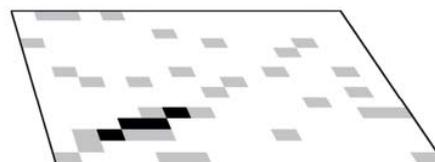
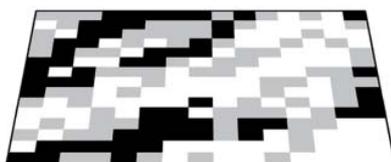
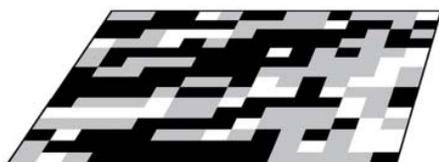
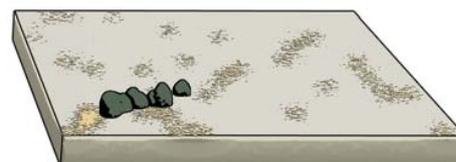
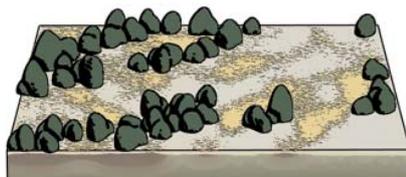
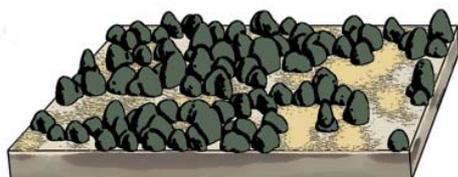
Une autre originalité de l'unité consiste à développer des approches intégratrices alliant l'écologie des communautés et des écosystèmes avec l'évolution. L'ISEM étudie en particulier le rôle des réponses évolutives dans le façonnement des patrons d'extinction, et il développe de nouveaux outils de modélisation pour intégrer ces aspects évolutifs dans les scénarios de devenir de la biodiversité dans le contexte du changement climatique. ●●●

Les structures principales

UMR ISEM
Institut des Sciences
de l'Évolution de Montpellier
(CNRS/UM/IRD/EPHE)
89 scientifiques

UR B&SEF
Biens et Services
des Écosystèmes Forestiers tropicaux
(Cirad)
45 scientifiques

UR URFM
Écologie des Forêts Méditerranéennes
(Inra)
15 scientifiques



▲ Formalisation d'un écosystème aride (haut) en automate cellulaire (bas).

© F. Schneider

Comment l'évolution affecte-t-elle la dynamique d'extinction et de changements d'aire de distribution dans le contexte des changements globaux ?

Le projet EvoRange^{*}, financé par le programme « Sixième extinction » de l'ANR, a été coordonné par l'ISEM. Il réunissait des équipes de Grenoble (Laboratoire d'Écologie Alpine), de Paris (École Normale Supérieure et Muséum national d'Histoire naturelle) et de Montpellier (CEFE).

Plusieurs questions étaient soulevées par le projet :

- ❶ Quand l'évolution peut-elle empêcher une population déclinante de s'éteindre ?
- ❷ Quels sont les rôles respectifs de la migration, de la plasticité phénotypique et de l'adaptation génétique lors des déplacements d'aire prédits par les changements globaux ? Comment ces différents facteurs interagissent-ils ?
- ❸ Qu'est-ce qui explique que la niche écologique évolue rapidement dans certaines populations ou espèces et qu'elle soit fortement conservée dans d'autres ?

Pour répondre à ces interrogations, l'ISEM et ses partenaires ont mobilisé différentes méthodes complémentaires. Des modèles mathématiques et informatiques sont développés pour simuler, d'une part, l'adaptation d'espèces soumises à un stress et, d'autre part, leur déplacement en réponse à des pressions nouvelles. Les équipes de recherche prennent également avantage des phénomènes d'évolution

très rapide des microbes pour observer au laboratoire leur adaptation à différentes conditions stressantes et les facteurs limitant cette adaptation. Par ailleurs, à une échelle très différente, elles utilisent aussi des reconstructions phylogénétiques pour estimer si les préférences climatiques se sont diversifiées rapidement entre espèces proches ou si elles sont restées semblables à celles de l'ancêtre.

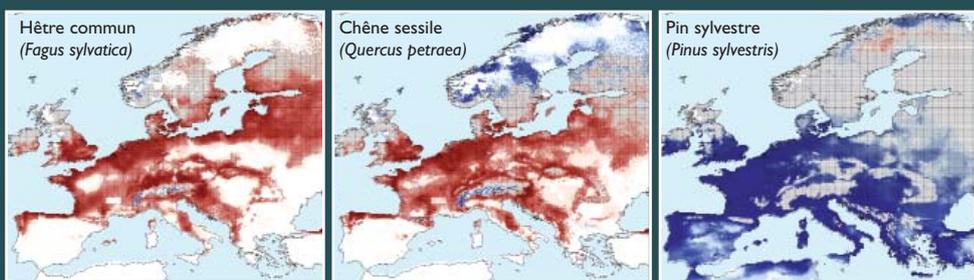
Les modèles développés suggèrent notamment que la dispersion facilite, plus souvent qu'elle ne les contraint, l'expansion géographique et l'adaptation à des conditions nouvelles. Ces contraintes évolutives peuvent être renforcées par certains types de dispersion (comme celle du pollen), par des contraintes génétiques, ou par des patrons de sélection conflictuels sur différents traits adaptatifs. Bien qu'elle soit évoquée fréquemment comme un mécanisme majeur de mitigation des conséquences du changement climatique, la plasticité phénotypique de la phénologie a des conséquences contrastées et très variables selon les espèces sur la persistance des populations d'arbres européens en marge nord et sud de leur répartition.

Contact : Ophélie Ronce, ophelie.ronce@univ-montp2.fr

Pour plus d'informations : <http://162.38.181.25/EvoRange>

* How does EVOLUTION affect extinction and species RANGE dynamics in the context of global change?

© A. Duprêtre



▲ Effet de la plasticité phénotypique sur la persistance de trois arbres forestiers sous scénario de réchauffement climatique (période 2081-2100).

La date de feuillaison varie en fonction de la température. Ces cartes montrent les zones en Europe où ces variations ont un effet positif (en rouge) ou un effet négatif (en bleu) sur la persistance des arbres. Les zones pointillées sont les zones où chaque espèce peut persister sous ce scénario de changement climatique. Prédications du modèle PHENOFIT.

Analyser et simuler le développement des écosystèmes végétaux

Les activités de l'UMR « botANique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations » (AMAP – Cirad, CNRS, Inra, IRD, UM) relèvent de deux grands champs disciplinaires :

- d'une part, la botanique systématique et structurale, l'écologie de la végétation, l'agronomie et la foresterie ;
- d'autre part, l'informatique, les mathématiques et les statistiques appliquées.

Les équipes ont des compétences scientifiques et techniques originales et reconnues. Leur projet s'articule autour de différents thèmes.

- ❶ Il est centré sur la caractérisation et l'analyse de la diversité, de la structure et de l'organisation des plantes et des peuplements végétaux.
- ❷ Il aborde des problématiques

méditerranéennes, tempérées et tropicales, prend en compte la dimension phylogénétique et évolutive, et s'intéresse aux plantes actuelles ou fossiles, cultivées ou se développant en conditions « naturelles » ou faiblement anthropisées.

- ❸ Il s'appuie sur des méthodes originales qu'il contribue souvent à développer, telles que l'identification assistée par ordinateur, l'analyse de l'architecture et du développement des plantes, l'analyse biomécanique des végétaux, la représentation mathématique et informatique des organes, des plantes, des peuplements et des paysages, ou encore la modélisation de la croissance et de la dynamique des espèces et des peuplements.

À travers ses projets, l'intention de l'UMR est de fédérer :

- des recherches cognitives, axées sur la description et la compréhension de la diversité de la végétation, de

la croissance et du fonctionnement des végétaux, ainsi que des relations structure-fonction et des relations avec les phylogénies, la biogéographie et la systématique ;

- des recherches méthodologiques, visant à proposer des approches et des modèles mathématiques, statistiques et informatiques suffisamment génériques pour analyser, prédire et simuler la structure et le développement, dans des contextes variés, des plantes et de la végétation ;
- des recherches finalisées, orientées vers la maîtrise de la dynamique, de la composition et de la production quantitative et qualitative des écosystèmes végétaux cultivés ou naturels. En particulier, ces recherches concernent les variations de biomasse aérienne des forêts tropicales humides en fonction de différents facteurs naturels ou anthropiques, dans le but d'évaluer les quantités de carbone présentes dans ces forêts. ●●●



a.

▲ **Évaluation de la biomasse aérienne des forêts tropicales.**

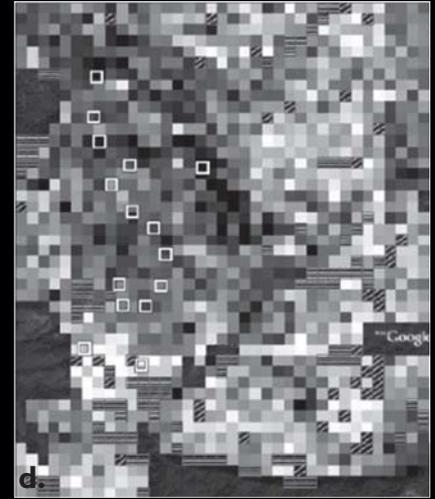
Exemple de démarche allant de l'évaluation précise des biomasses d'arbres individuels sur des sites de référence (photos a et b), jusqu'à la production, grâce aux images de télédétection (photo c) de cartes de biomasse (photo d).



b.



c.



300 500 700 800 m

Inventaire et suivi de la biomasse aérienne des forêts tropicales : une contribution au mécanisme REDD

Face aux objectifs internationaux de maîtrise des quantités de gaz à effet de serre, et face aux enjeux du programme de Réduction des Émissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts tropicales (REDD+), il est important de recenser les stocks de carbone que ces forêts hébergent et ce, d'autant plus que le mécanisme REDD prévoit d'appuyer financièrement les pays tropicaux dans la conservation de ces stocks.

Pour mener à bien un tel projet, l'UMR AMAP a développé des méthodes fiables permettant de suivre dans le temps l'évolution des quantités de carbone séquestrées. Le carbone est majoritairement séquestré dans les parties aériennes des arbres. Il convient de l'estimer de façon cohérente malgré les contraintes liées aux territoires forestiers, qui sont vastes et souvent difficilement accessibles. Les inventaires forestiers de terrain concernent principalement des mesures simples, comme le diamètre du tronc et, exceptionnellement, des mensurations et pesées plus détaillées permettant la calibration des équations allométriques prédisant la biomasse totale des arbres individuels.

Ces inventaires, forcément limités dans l'espace, permettent d'échantillonner les différents types de forêts d'un territoire, et de calibrer les prédictions de la biomasse des arbres à partir de la télédétection (altimétrie laser, analyse du grain de la canopée sur images optiques, mesures radar, etc.). Le recours à la télédétection est nécessaire pour obtenir des cartographies généralisant l'information de terrain.

La démarche de l'UMR AMAP se place ainsi à l'interface entre le traitement des informations spatiales et les observations de terrain, en particulier au travers de l'architecture des arbres. Cette conjonction de compétences, dans deux domaines généralement dissociés, permet d'envisager des collaborations plus étroites et plus directes entre la télédétection et la modélisation 3D des structures végétales. Par ailleurs, pour garantir la robustesse et la généralité de ses résultats, l'UMR mène ces recherches dans différentes régions tropicales : Afrique centrale, Guyane française, Inde, Nouvelle-Calédonie et, plus ponctuellement, Brésil et Indonésie.

Contact : Pierre Coueron, pierre.coueron@ird.fr

Projet INFORMED : des recherches intégrées sur la résilience et la gestion des forêts méditerranéennes



▲ Écosystème forestier mélangé hêtre-sapin (col du Comte, Mont-Ventoux, France).

© Inra/URFM

Dans le cadre de l'initiative ERA-Net FORESTERRA*, le projet collaboratif INFORMED** (2015-2017) développe une approche pluridisciplinaire sur la résilience des forêts méditerranéennes face au changement global. Cette approche est basée sur le schéma conceptuel suivant : d'une part, le changement global modifie le contexte général d'un système socioécologique au sein duquel la gestion oriente la biodiversité forestière et ses fonctions, ce qui détermine les services écosystémiques ; d'autre part, l'évaluation économique de ces services peut aider le système de gouvernance à choisir les futures options de gestion les plus appropriées.

Le projet, coordonné par l'URFM, est conduit par un consortium de 15 partenaires issus de 10 pays des deux rives de la Méditerranée, alliant des compétences en écologie, gestion forestière, gouvernance et économie.

Le projet INFORMED a trois objectifs scientifiques principaux :

- combler les lacunes relatives aux mécanismes de base qui déterminent la flexibilité des réponses du système socioécologique à la perturbation ;
- intégrer les connaissances en combinant différents modèles basés sur les processus, à des échelles spatiales et temporelles variées ;
- utiliser les connaissances intégrées pour élaborer des stratégies de gestion, et des lignes directrices politiques et de gouvernance à même de favoriser la résilience du système forestier.

Contact : François Lefevre, francois.lefevre@avignon.inra.fr

Pour plus d'informations : www.foresterra.eu

* L'ERA-Net FORESTERRA (*Enhancing FOrest RESearch in the MediTERRanean through improved coordination and integration*) vise à renforcer la coordination scientifique et l'intégration de programmes méditerranéens de recherches forestières ainsi que la coopération scientifique parmi les pays du bassin méditerranéen et avec d'autres zones sous climat méditerranéen.

** *Integrated research on FOrest Resilience and Management in the mEDiterranean.*

Forêts méditerranéennes : fonctionnement et dynamiques

L'« *Unité de Recherche Écologie des Forêts Méditerranéennes* » (URFM – Inra) développe un projet de recherche pluridisciplinaire faisant appel à des compétences en biologie des populations, écologie, écophysiologie, entomologie, génétique, mathématiques appliquées, physique et sciences forestières. Ce projet s'inscrit dans une démarche de recherche finalisée, centrée sur un objet d'étude, les forêts méditerranéennes, pour aborder des questions générales en écologie sur la réponse des écosystèmes complexes et hétérogènes aux changements globaux.

Le projet de recherche de l'URFM sur les dynamiques et le fonctionnement des forêts méditerranéennes intègre trois grands thèmes de recherche, étroitement liés :

- l'étude de la dynamique, de l'utilisation de l'eau et du bilan de carbone dans les forêts mélangées, hétérogènes dans leur

© Inra/URFM

▼ Étagement altitudinal de végétation d'arbres forestiers.



composition et la structure de leurs communautés ;

- une approche démo-génétique de la dynamique évolutive des populations d'arbres et d'insectes phytophages à différentes échelles spatiales ;
- une approche de l'écologie du feu basée sur la connaissance des mécanismes physiques du comportement et des impacts du feu.

Sur chacun de ces thèmes, l'URFM allie démarches expérimentale et de modélisation.

Les productions de l'unité sont avant tout académiques, mais l'URFM participe aussi activement au transfert des connaissances sous diverses formes. L'unité est par ailleurs fortement investie dans l'espace européen de la recherche.

Favoriser l'adaptation au changement climatique des systèmes écologiques et sociaux forestiers tropicaux

Le projet scientifique de l'UR « *Biens et Services des Écosystèmes Forestiers tropicaux* » (B&SEF – Cirad) est, d'une part, d'étudier l'écologie des forêts tropicales et, d'autre part, de définir, de mettre en œuvre et d'évaluer les politiques, règles, pratiques ou instruments liés à ces écosystèmes.

L'objectif général est de faciliter l'adaptation des systèmes écologiques et sociaux aux contraintes et aux opportunités résultant des changements globaux. C'est également de renforcer au profit des populations, à l'échelle locale aussi bien que globale, la durabilité des services fournis par les écosystèmes forestiers tropicaux.

À travers ces recherches, l'UR s'efforce de répondre à deux problématiques transversales :

- Systèmes écologiques et sociaux forestiers tropicaux : quelle est l'opérationnalité du concept pour le dialogue entre sciences écologiques et humaines, et la modélisation des interactions Homme-Nature sur les ressources forestières ?
- Caractéristiques des écosystèmes forestiers tropicaux, valeur des services écosystémiques et paiements pour services environnementaux : quelles relations, à quelles échelles ?

L'UR B&SEF s'organise autour de trois équipes de recherche : « Résilience des écosystèmes forestiers tropicaux face à l'exploitation et aux changements globaux », « Relations entre résilience des écosystèmes et vulnérabilité des sociétés dans les systèmes écologiques et sociaux forestiers » et « Politiques et instruments de l'action publique concernant les forêts tropicales ».

Elle se fixe également trois objets d'étude :

- ❶ Les forêts tropicales. Elles représentent un enjeu de développement en raison de leur potentiel à produire des biens et des services essentiels à nos sociétés. Elles sont en effet au cœur des grands changements globaux et constituent le plus riche réservoir de carbone et de biodiversité terrestre.
- ❷ Les sociétés qui y vivent ou en dépendent. L'UR B&SEF étudie les règles, pratiques, usages, savoirs et représentations liés aux forêts et à la construction de capital social, ainsi que leurs dynamiques rattachées de coopération ou de compétition.
- ❸ Les politiques publiques. Les politiques ou instruments qui s'appliquent aux forêts peuvent être externes au système écologique et social étudié (conventions internationales, fiscalité nationale, plans nationaux d'adaptation au changement climatique, marchés et mécanismes financiers associés, *etc.*) ou internes (marchés locaux, règles de gestion locale, pratiques, organisations, institutions locales, *etc.*). ●●

Voir un exemple de projet mené par l'UR B&SEF page 25.

▼ *Érosion dans le Parc National du W (Bénin, Burkina Faso, Niger).*

© A. Billand



▼ La plateforme d'observation et d'expérimentation de Puéchabon, intégrée à la très grande infrastructure européenne ICOS (Integrated Carbon Observation System), permet d'observer et de mesurer la dynamique de la forêt méditerranéenne.



© R. Joffre

La plateforme de Puéchabon : site d'étude de l'impact du changement planétaire sur la forêt méditerranéenne

La forte amplitude des changements climatiques attendus pour la région méditerranéenne (intensité et durée des périodes de stress, fréquence des sécheresses extrêmes) en fait un des principaux *hot-spot* de bouleversement identifié par les climatologues. Trois caractéristiques fondamentales des changements en cours (augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, augmentation de la température et modifications des précipitations) affectent très directement le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Ces modifications impactent les échanges de matière (eau, carbone, azote) et d'énergie à l'interface biosphère-atmosphère, en altérant significativement les flux de matière au sein de la zone critique.

Basée sur des méthodes de micro-météorologie, l'instrumentation du site de Puéchabon (dispositif faisant partie de l'OREME) permet de quantifier ces flux à toutes les échelles de temps, de la seconde à l'année. À l'échelle régionale, les changements de flux de matière vont se répercuter directement sur les termes des bilans hydrologiques des bassins versants et sur les apports aux écosystèmes côtiers. Outre ces

impacts directs, les changements climatiques couplés aux changements d'usage des terres vont transformer profondément le régime des perturbations, et principalement des incendies.

Afin de suivre le fonctionnement et la biodiversité des écosystèmes forestiers régionaux face à ces changements, le site de Puéchabon est intégré à deux réseaux : celui des Stations expérimentales méditerranéennes forestières (SEMAFOR) et celui des Stations expérimentales méditerranéennes de terrain (STEXMED). Il est également relié au réseau européen *Experimentation in Ecosystem Research* (ExpeER) et au réseau international de réseaux régionaux FLUXNET (Amérique, Europe, Asie, Océanie) coordonnant l'analyse quantitative régionale et planétaire des échanges de matière et d'énergie à partir de sites expérimentaux instrumentés à l'aide de tours micro-météorologiques.

Contact : Richard Joffre, Richard.JOFFRE@cefe.cnrs.fr

Pour plus d'informations : <http://cefe.cnrs.fr>

Un observatoire pour évaluer l'impact des changements climatiques et anthropiques sur les des milieux méditerranéens

« *L'Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement* » (OREME – UM, CNRS, IRD) est un Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) dédié à l'étude des aléas et de la vulnérabilité des milieux méditerranéens. Il se focalise sur les risques naturels et l'impact des changements globaux et anthropiques sur l'espace méditerranéen vivant et inerte.

Il a pour mission :

- de soutenir l'activité et le développement d'observations systématiques en sciences de l'univers et de l'environnement ;
- de soutenir la construction de bases de données environnementales ouvertes, partagées et référencées au niveau international ;
- d'encourager la mutualisation des savoir-faire et des moyens analytiques (observation, expérimentation, modélisation) ;
- de constituer le relais local des réseaux nationaux d'observations et de se positionner en acteur fort des actions en environnement tournées vers la Méditerranée.

La mission essentielle de l'OREME consiste à récolter, intégrer et partager les données hétérogènes associées à ces disciplines et à établir des corrélations qui ne pouvaient l'être au préalable. À la clé de cette mise en adéquation des données : la découverte de signaux systématiques permettant de juger de l'effet du changement climatique et/ou anthropique et d'en comprendre les mécanismes (aléas, vulnérabilité) dans ses effets environnementaux.



J. Roy © Ecotron

▲ Ecotron de Montpellier, en arrière-plan, les dômes des macrocosmes.

► Mesure du fractionnement $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ par les racines de haricots cultivés en microcosme.



multiplexer

on-line ^{13}C & CO_2 analyser

C. Piel © Ecotron

L'Écotron de Montpellier une plateforme expérimentale à disposition de la communauté scientifique internationale

« L'Écotron européen de Montpellier » (CNRS) est une plateforme de recherche expérimentale dédiée à l'étude de l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement des écosystèmes et leur biodiversité. L'insertion dans les enceintes de l'Écotron de blocs d'écosystèmes, intacts ou reconstitués, permet à la fois de contrôler leur environnement dans une large gamme de conditions climatiques et de chimie atmosphérique, et de mesurer en continu les variations des principaux cycles biogéochimiques sous l'effet de facteurs de forçage imposés. L'Écotron donne donc directement accès à des paramètres d'intérêt écologique ou agronomique dans des scénarios climatiques à venir ou passés.

Les paramètres environnementaux contrôlés sont : la température (-10 à +50 °C), l'humidité relative de l'air (20 à 80 %), les précipitations (aspersion ou goutte à goutte), le CO_2 atmosphérique (200 à 1000 ppm), la lumière (intensité et composition spectrale) et le rapport isotopique

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'air. Les fonctions de l'écosystème mesurées en ligne sont : l'évapotranspiration, le flux net de CO_2 de l'écosystème, la respiration du sol, le flux de méthane, et le fractionnement isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans la molécule de CO_2 .

Ces paramètres permettent de calculer des bilans de masse pour plusieurs molécules ainsi que l'efficacité d'utilisation des ressources de l'écosystème (efficacité de l'eau, de l'azote, de la lumière, du carbone). Classiquement, beaucoup d'autres paramètres peuvent être mesurés sur des échantillons, prélevés dans ces écosystèmes, que l'Écotron stocke et conditionne (sous forme lyophilisée par exemple) et qui sont ensuite analysés dans d'autres laboratoires.

Les trois plateformes de l'Écotron permettent de travailler à des échelles différentes :

- Les « Macrocosmes » sont des enceintes de 40 m³, chacune pouvant accueillir des lysimètres de 2 à 12 tonnes, pour une surface de 2 à 5 m² et une profondeur allant jusqu'à 2 m.
- Les « Mésocosmes » sont des enceintes de 2 à 4 m³. Elles peuvent accueillir des lysimètres de 0,4 à 1 m de profondeur et de 0,4 à 1 m² de surface.

- La plateforme « Microcosmes » se compose de chambres de culture (1 m de hauteur et 1 m² de surface utile) dans lesquelles plusieurs dizaines de microcosmes variés (micro-lysismètres avec plantes photosynthétiques, micro-containers avec sol...) peuvent être insérés.

Un minimum de 12 enceintes est disponible dans chaque plateforme afin de permettre l'étude de l'impact de plusieurs facteurs et de leurs interactions, ou encore afin de constituer une série de scénarios successifs permettant l'analyse de la linéarité des réponses et des points de basculement.

L'Écotron de Montpellier est ouvert à la communauté scientifique nationale et internationale dans les domaines de l'écologie, de l'agronomie, de la biologie et des géosciences.

Un appel à projets permanent est d'ailleurs disponible, avec les modalités de soumission et d'acceptation des projets, ainsi que la description et les coûts de fonctionnement de chaque plateforme, sur le site : www.ir-ecotrons.cnrs.fr ■

Quelques exemples de recherches menées à l'Écotron



H. Raguet © CNRS

L'impact des événements climatiques extrêmes attendus vers 2050 sur les flux de carbone et d'eau d'une prairie de moyenne altitude a montré que l'effet délétère d'une vague de chaleur et d'une sécheresse pouvait être annulé sous l'effet de l'augmentation du CO_2 atmosphérique des décennies à venir.

Une autre expérimentation sur la décomposition de la litière forestière méditerranéenne a montré l'effet de synergie entre la diversité fonctionnelle de la litière, celle de la macrofaune détritricole et la stabilité de ce fonctionnement dans une situation de sécheresse modérée.

◀ Insertion de blocs intacts d'écosystème prairial dans un des macrocosmes.

Les changements climatiques vont altérer la diversité biologique dans les écosystèmes. À cet effet, l'Écotron a montré par quels mécanismes physiologiques, à l'échelle de la canopée, la diversité de la communauté végétale peut augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau, de l'azote et de la lumière et *in fine* de la production primaire.

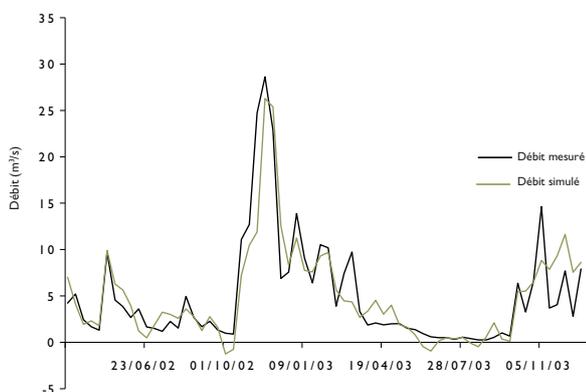
La modélisation des cycles biogéochimiques est nécessaire pour prédire l'impact des changements climatiques. L'Écotron a récemment pu identifier que le rythme circadien, largement significatif à l'échelle de l'écosystème, la température et la sécheresse de l'air ont des rôles additifs dans la régulation des flux de CO_2 et de H_2O . Il a également montré que le rythme circadien devrait être incorporé dans la modélisation de ces flux.



▲ *Lônes, bras morts de l'Ain, anciens méandres abandonnés à la faveur des crues.*

© A. Johannet

L'évolution des zones humides de la basse plaine de l'Ain



▲ *Simulations du débit de la rivière Albarine (affluent de l'Ain) avec les réseaux de neurones.*

Le projet NEUROHYDRO, réalisé par le LGEI (voir p.38) et le Centre SITE de l'École des Mines de Saint-Étienne, s'inscrit dans le cadre du projet ANR WETCHANGE® qui vise à établir, à l'horizon 2030-2050, des prévisions de réponses de zones humides aux étiages provoqués par le changement global, à partir de différents scénarios climatiques. Ces réponses sont étudiées en termes de fonctionnement hydrologique mais aussi biologique.

La zone étudiée concerne la basse vallée de l'Ain (France), située à environ 40 km au nord-est de Lyon. Les nombreuses zones humides présentes dans ce secteur abritent des écosystèmes particulièrement diversifiés. L'objectif du projet était de développer un modèle fondé sur les réseaux de neurones pour les bassins de l'Ain, couplé avec un modèle maillé aux différences finies, afin d'étudier les évolutions

de la ressource en eau en liaison avec les évolutions de variables climatiques issues de plusieurs scénarios de prévision du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC).

Le projet a permis de fournir une simulation de l'évolution de ces zones humides soumises à de nombreux enjeux (irrigation, préservation de la biodiversité). Les échanges nappe-rivière ont également été étudiés sur le bassin karstique de la Cèze (Gard, France).

Le modèle couplé a ensuite été alimenté par des prévisions de précipitation issues de modèles de prévision climatiques du GIEC (période 2010-2040), de manière à comparer les impacts des différents scénarios sur la biodiversité et sur la ressource (eau potable et irrigation).

Les résultats portent plus précisément sur les échanges hydrauliques entre la nappe et la rivière de l'Ain, en rive droite et en rive gauche. Là où la rivière alimente la nappe, il est possible de prélever les ressources en eau souterraine par captage pour l'irrigation ou l'eau potable. Lorsque la rivière draine la nappe, ce n'est en revanche pas possible, en particulier si l'incision du lit de la rivière est importante. En cas de pollution de la rivière ou de la nappe, la connaissance de ces échanges est fondamentale pour prendre les mesures de protection nécessaires. Les prévisions climatiques (2040, 2070) ont permis d'évaluer les impacts sur ces échanges nappe/rivière et l'assèchement potentiel des bras morts et des lônes de la rivière.

Contact : Anne Johannet, anne.johannet@mines-ales.fr

Pour plus d'informations : www.graie.org/wetchange

* Le projet Wetchange (Biodiversité et fonctions des zones humides en réponse aux étiages sévères induit par le changement global) rassemble trois partenaires : le CNRS, l'École nationale supérieure des Mines de Saint-Étienne et l'Irstea.

Communautés microbiennes du sol et changements climatiques

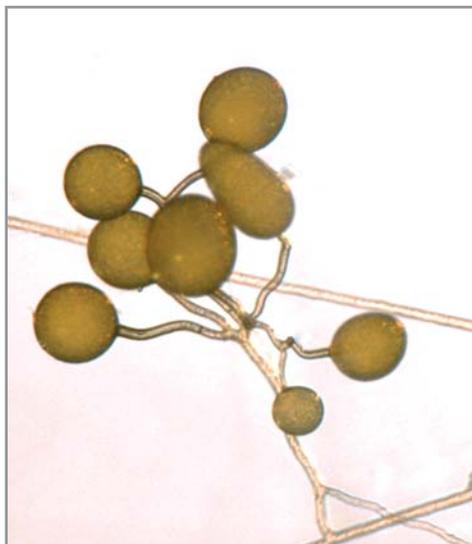
Au sein des écosystèmes terrestres, l'activité des communautés microbiennes est l'une des principales sources de CO₂, un puissant gaz à effet de serre. Leur activité produit en effet plus de CO₂ par an que la combustion de combustibles fossiles.

L'UMR Eco&Sols (voir p.77) a mené des études pour vérifier la capacité des communautés microbiennes à s'adapter aux changements climatiques. Les travaux de l'unité ont porté sur les effets d'une élévation de la température sur la respiration du sol lors d'expériences de laboratoire en milieu contrôlé. Cette fonction ne semble pas être altérée lorsque la température ne dépasse pas 40°C. Dans cette gamme de température, la disponibilité d'un substrat carboné conditionne

l'activité des communautés microbiennes. Au delà de 40°C, l'activité respiratoire est stimulée alors que la biomasse microbienne décroît.

Un travail complémentaire, portant spécifiquement sur l'impact d'un stress thermique ponctuel (60°C durant 16h) sur la diversité des communautés microbiennes, indique que les communautés qui résistent à ce stress s'adaptent à un changement ponctuel de leur environnement. Ces travaux ont mis en évidence une modification du métabolisme des communautés microbiennes du sol exposées à un stress thermique.

Contact : Tiphaine Chevallier, tiphaine.chevallier@ird.fr



Y. Prin © Cirad - LSTM



◀ À gauche : Spores de champignon mycorhizien à arbuscules (*Glomus intraradices*).

À droite : Nodules de *Rhizobium*.

Valoriser la symbiose mycorhizienne pour limiter les processus d'érosion hydrique

L'un des impacts, très probable, des aléas climatiques sur l'environnement est une altération de la structure du couvert végétal et, en conséquence, une fragilisation des sols aggravant les phénomènes d'érosion hydrique, pour aboutir à un appauvrissement de la fertilité des sols en éléments biodisponibles pour la plante.

Dans ce contexte, il est nécessaire d'améliorer la capacité du végétal à avoir accès à ces ressources minérales (azote et phosphore en particulier) mais aussi d'augmenter sa tolérance à des conditions environnementales peu propices à son développement. À cette fin, le LSTM (voir p. 55) développe des stratégies d'ingénierie écologique visant à optimiser l'activité des microorganismes symbiotiques du sol (champignons mycorhiziens, *rhizobia*...) au service de leur partenaire végétal.

▼ Effet de l'inoculation par différentes souches de *rhizobia* sur la croissance de *Dalbergia sp.*

Y. Prin © Cirad - LSTM

Différentes pratiques ont ainsi été élaborées en foresterie et en agroécologie via :

- une approche dite « holistique », en favorisant le développement du potentiel mycorhizien et rhizobien des sols par l'insertion, dans l'itinéraire sylvicole, de plantes hypermycotrophes (ou plantes nurses) ;
- ou une approche dite « réductionniste », en dotant le plant forestier ou la plante cultivée d'un statut mycorhizien optimal (colonisation maximale de son système racinaire par des symbiotes fongiques et rhizobiens).

Les résultats montrent qu'il est possible de revégétaliser durablement des surfaces érodées issues de la manifestation de phénomènes d'érosion hydrique et, ainsi, d'adapter des stratégies culturales aux modifications environnementales attendues dans le cadre du changement global.

Contact : Robin Duponnois, Robin.Duponnois@ird.fr

Pour plus d'informations : <http://umr-lstm.cirad.fr>



Biodiversité et écosystèmes marins

Les études de prospective, à différentes échelles territoriales, spécifiques aux enjeux et aux risques induits par le changement climatique, doivent permettre de retracer la chaîne d'impacts, depuis les phénomènes qui risquent de se conjuguer jusqu'à leurs conséquences sur les activités humaines. De telles méthodes nécessitent ainsi un croisement de disciplines scientifiques (climatologie, océanographie, géomorphologie, économie, sociologie, géographie...). Tous ceux qui souhaitent engager des politiques d'anticipation et d'adaptation ont besoin de cette connaissance pluridisciplinaire organisée comme un socle scientifique à adapter à chaque situation géographique, économique et environnementale.

Même s'il existe aujourd'hui encore beaucoup d'incertitudes sur le rythme de modification future des climats — et surtout sur les manifestations locales des phénomènes climatiques à venir — de nombreuses équipes scientifiques d'Agropolis étudient l'impact des pressions anthropiques et du réchauffement climatique sur la biodiversité marine et le fonctionnement des écosystèmes Méditerranéens (MARBEC, CEFREM, BIOM, LECOB, LOMIC, LBBM). Souvent très pluridisciplinaires, ces unités de recherche étudient notamment les impacts directs et indirects du changement climatique sur les écosystèmes littoraux, côtiers et hauturiers, sur les flux de matière aux interfaces terre/mer, sur les modifications du trait de côte, des habitats et des aires de distribution des espèces et sur leurs interactions et leurs conséquences sur le fonctionnement des réseaux trophiques.

Ces travaux s'appuient sur des services d'observation adossés à des observatoires et parfois à des unités (OREME et OOB, CEFREM) qui enregistrent sur le long terme l'évolution des paramètres physico-chimiques et biologiques du milieu marin.

Enfin, plusieurs dispositifs d'expérimentation sont également disponibles et ouverts à l'ensemble de la communauté régionale, nationale et européenne pour mener des expérimentations en conditions contrôlées (MEDIMEER). Il est aussi possible d'accéder à une large diversité d'organismes *in situ* ou *ex situ* et à de multiples services logistiques et analytiques au sein de l'EMBRC, infrastructure à vocation nationale et européenne.

Philippe Lebaron (OOB)

Les structures principales

Centre national de ressources biologiques marines EMBRC-France
(*European Biological Resource Centre*)
(UPMC/CNRS)
90 scientifiques

OOB
Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer
(UPMC/CNRS)
80 scientifiques

UMR BIOM
Biologie Intégrative des Organismes Marins
(UPMC/CNRS)
15 scientifiques

UMR CEFREM
Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens
(UPVD/CNRS)
30 scientifiques

UMR LECOB
Laboratoire d'Écogéochimie des Environnements Benthiques
(UPMC/CNRS)
12 scientifiques

Suite p. 44



© Shutterstock

▲ Banc de barracudas (Sicile).

Un observatoire méditerranéen pour étudier et enseigner la biologie marine et l'océanographie

« *L'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer* » (OOB – UPMC, CNRS) est un lieu privilégié pour l'étude de la biologie marine et de l'océanographie en Méditerranée. Bénéficiant d'un environnement exceptionnel par la diversité de ses biotopes, de sa faune et de sa flore, les missions de l'OOB concernent la formation, la recherche, l'observation, l'accueil et la vulgarisation scientifique.

L'adaptation des écosystèmes au changement climatique est l'un des axes forts de sa mission d'observation et de suivi à long terme des écosystèmes avec, à disposition de l'observatoire : une composante terrestre créée en 1973 (réserve naturelle de la forêt de la Massane) et une composante marine créée en 1974 (réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls). Le rôle de l'observation a été renforcé en 1985 avec l'obtention du statut d'« Observatoire Océanologique »

pour le laboratoire Arago de l'OOB. Face aux rapides changements des conditions climatiques, il est important de développer les connaissances sur les dynamiques temporelles et spatiales des écosystèmes afin de prédire à la fois leurs évolutions et les conséquences que ces changements peuvent avoir sur les services écosystémiques. Or, seules de longues séries de mesures permettent de décrire l'évolution naturelle ou perturbée d'un système présentant une variabilité saisonnière et/ou interannuelle importante.

L'OOB dispose aujourd'hui de trois stations d'observation fixes localisées le long du gradient côte-large. Elles font l'objet d'un suivi régulier (hebdomadaire à mensuel) de paramètres physiques, chimiques et biologiques. Ces séries ont débuté en 1997 pour la station la plus côtière et en 2003 pour la station du large. L'ensemble de ces données est intégré à des réseaux d'observation nationaux : SOMLIT* pour le Service d'Observation du Laboratoire Arago (station côtière SOLA) et MOOSE** pour l'Observatoire Microbien du Laboratoire Arago (station du large

MOLA***). Depuis 2010, certains paramètres sont par ailleurs acquis à haute fréquence et en temps réel.

L'OOB est une école interne de l'université Pierre et Marie Curie. Il propose, dans le domaine de l'océanographie, des formations universitaires en lien avec les problématiques du changement climatique. L'observatoire a également mis en place le centre de médiation scientifique « Biodiversarium », qui regroupe un aquarium public en cours de rénovation et d'extension et un jardin méditerranéen. Tous deux accueillent des publics, allant des scolaires au grand public, afin de les sensibiliser, d'une part, à la biodiversité terrestre et marine et, d'autre part, à l'effet des changements globaux (et notamment climatiques) sur la biodiversité. ●●●

* Service d'Observation en Milieu Littoral, <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr>

** Mediterranean Ocean Observing System on Environment, www.moose-network.fr

*** La station MOLA (*Microbial Observatory Laboratoire Arago*) est située sur le flanc nord du canyon Lacaze-Duthiers, http://sooob.obs-banyuls.fr/fr/les_sites_d_observation.html



© CNRS

▲ Le navire instrumenté Néréis II du CNRS.

► Bouée Océanographique de l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer.



© L. Zudaire - CNRS - OOB

Suivi temporel de la dynamique de l'écosystème côtier méditerranéen

La problématique générale du Service d'Observation du Laboratoire Arago de Banyuls-sur-Mer (SOLA, OOB) concerne directement l'impact du changement global sur les zones côtières et son importance relative par rapport aux activités humaines locales (global vs local).

Le site SOLA a été choisi comme représentatif d'une situation de « normalité » qu'on peut caractériser ainsi : à partir du suivi de paramètres pertinents à des échelles temporelles adaptées, il est possible de définir une typologie des fluctuations saisonnières et interannuelles. Conscients des problèmes posés par la représentativité d'un point unique dans une rade, les membres de l'OOB ont pris soin de fédérer les recherches littorales entreprises par le laboratoire Arago (notamment les travaux effectués sur le couplage benthopélagique).

Ce développement d'une démarche systématique d'observation des milieux littoraux est donc issu d'initiatives locales, fondées sur des opportunités et sur une tradition de culture scientifique (Réseau des Stations et Observatoires Marins). C'est dans cet esprit que le Service d'Observation en Milieu Littoral a été mis en place en 1995, et labellisé par l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS en 1996. Ce service regroupe actuellement neuf stations marines.

Contact : Pascal Conan, pascal.conan@obs-banyuls.fr

Des recherches scientifiques pluridisciplinaires sur l'environnement côtier

Le « Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens » (UMR CEFREM – UPVD, CNRS) s'intéresse depuis longtemps à l'environnement côtier, ce qui le rapproche des problématiques socioéconomiques liées aux usages de ce milieu. Son activité de recherche est focalisée sur le thème des transferts de matière et d'énergie aux interfaces du système côtier, ce qui comprend les échanges physiques des masses d'eau, des particules et des éléments, en particulier du carbone, dans le *continuum* continent-océan.

Toute cette activité se déroule dans le cadre de programmes internationaux, nationaux et régionaux. Créé en 1963 autour d'un noyau de géologues et de sédimentologues, le laboratoire initial s'est progressivement

ouvert à la pluridisciplinarité pour évoluer jusqu'à devenir, en 1997, « le CEFREM ». L'équipe actuelle comprend sédimentologues, géochimistes, biologistes et physiciens.

En collaboration avec l'Ifremer et Météo France, et afin d'observer sur le long terme les effets du changement climatique et ceux induits par les activités anthropiques en Méditerranée Nord-occidentale, le CEFREM participe au SOERE MOOSE* (2010-2020), un réseau d'observation multi-site et intégré.

L'objectif premier de ce programme est de pérenniser les séries temporelles, d'harmoniser les stratégies d'observations entre les laboratoires, de mettre en œuvre des moyens de mesures modernes et automatisés pour une observation couplée océan-atmosphère, ainsi que d'augmenter significativement le flot de données en temps réel

afin de mieux contraindre les modèles climat-océan et ceux liés à l'océanographie opérationnelle.

Enfin, avec l'aide des modèles, MOOSE doit apporter les données indispensables à l'établissement de scénarios « du futur » qui permettront d'explorer l'évolution de la Méditerranée en réponse au changement climatique et aux pressions anthropiques, et donc de proposer des adaptations. ●●●

* Le programme d'observation MOOSE (*Mediterranean ocean observing system on environment*), labellisé SOERE (« Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche sur l'Environnement ») en 2010, doit permettre de répondre aux demandes sociétales actuelles sur les contaminants et la biodiversité.

Rôle des formations d'eau dense hivernale dans l'évolution spatio-temporelle du fonctionnement de l'écosystème pélagique sous l'influence du changement climatique

Le changement climatique pourrait provoquer une augmentation de la stratification des eaux de surface en mer Méditerranée, une acidification et une oligotrophisation progressives mais rapides et importantes à l'échelle biologique, avec des impacts majeurs sur les organismes planctoniques marins. Il est impératif d'identifier les processus clés qui influencent les changements de régime hydrologique et de fonctionnement des écosystèmes marins. Dans ce sens, le processus de formation des eaux denses (qui ventile les eaux profondes tout en exportant efficacement la matière organique vers les profondeurs et qui contribue significativement à la recharge en sels nutritifs des eaux de surface) pourrait être altéré de manière non négligeable. Un étroit couplage entre l'expérimentation et la modélisation est nécessaire pour aborder la complexité de ces processus et leurs conséquences sur les organismes marins.

Une telle approche a été mise en place dans le cadre du programme MermEX, dont un volet traite de l'impact des changements hydrodynamiques sur les budgets biogéochimiques en Méditerranée et qui implique, entre autres, les UMR LOMIC et CEFREM.

Une série de campagnes en mer « DeWEX 2013 » a été conduite en Méditerranée Nord-occidentale. Un premier leg (février 2013) a permis de prospecter un réseau de stations disposées en étoile autour de la zone de formation des eaux denses (42°N-5°E), cela en hiver, durant la phase de plongée des eaux denses. Un deuxième leg (avril 2013) a permis d'échantillonner le bloom printanier et de suivre la propagation des eaux denses formées pendant l'hiver. Ces campagnes étaient intégrées dans un vaste plan d'implémentation au

cours de l'hiver 2012-2013. Des campagnes océanographiques plus légères ont échantillonné la phase automnale de pré-conditionnement des eaux denses, puis la phase estivale stratifiée. Un intense réseau d'observation par plateformes autonomes ainsi que l'imagerie satellitale sont venus compléter cette phase d'observation. Un effort important de modélisation a été fait d'abord pour la coordination, puis pour le lien entre ces opérations, et enfin pour l'exploitation des données.

Cette opération, soutenue par le programme MISTRALS (*Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales*), a fédéré l'action de plus d'une centaine de scientifiques rattachés à des laboratoires français tels que les UMR LOMIC, CEFREM, MIO, CEREGE, LOV, etc.* Elle a également reçu un soutien financier de programmes européens (PERSEUS, GROOM, JERICO**) et nationaux (EQUIPEX-NAOS et ANR ASICS-MED***) notamment en ce qui concerne les plateformes autonomes et la modélisation.

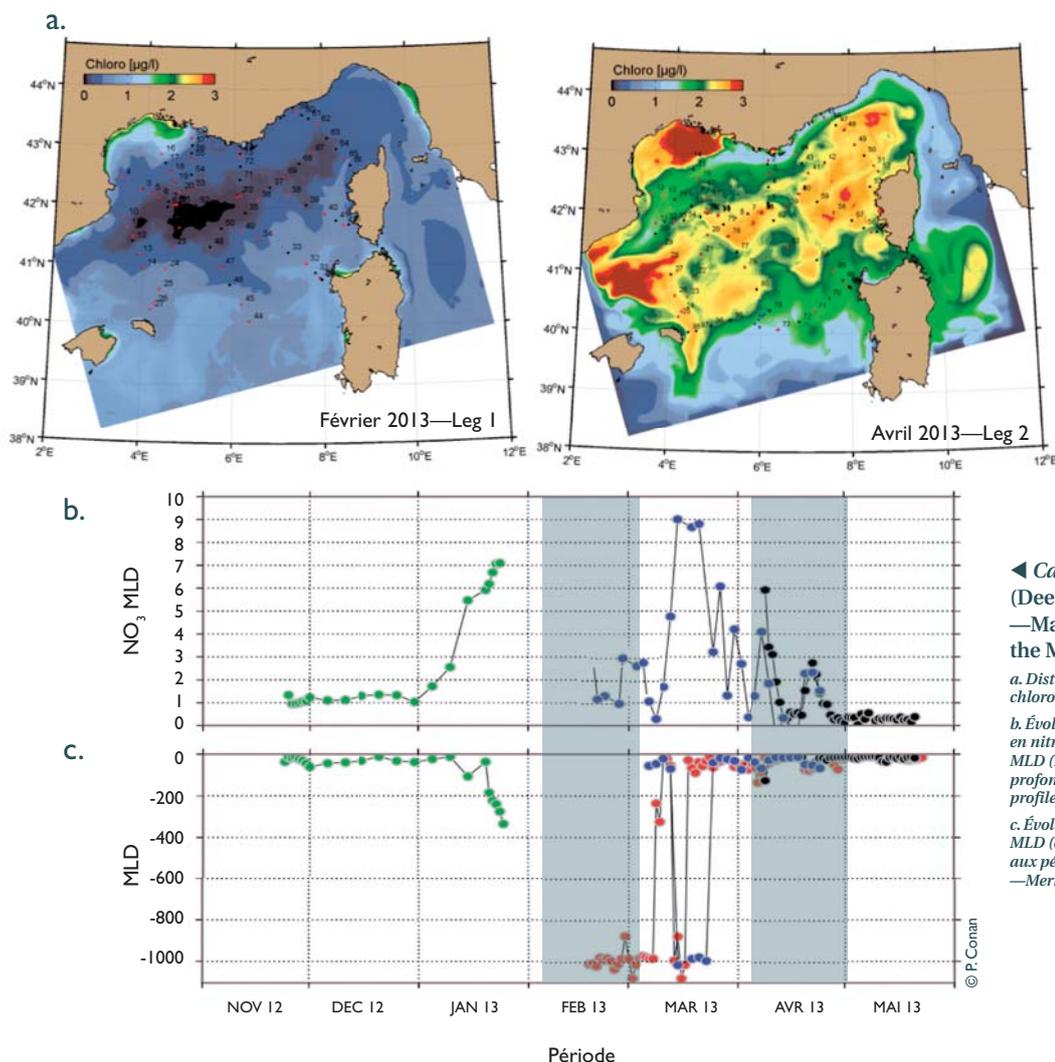
Contact : Pascal Conan, pascal.conan@obs-banyuls.fr

Pour plus d'informations : www.insu.cnrs.fr/environnement/dewex-impacts-of-deep-water-formation-on-mediterranean-pelagic-ecosystems-mermex

* MIO : Institut Méditerranéen d'Océanologie ; CEREGE : Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement ; LOV : Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer.

** PERSEUS : Projet Étudiant de Recherche Spatiale Européen Universitaire et Scientifique ; GROOM : Gliders for Research, Ocean Observation and Management ; JERICO : Joint European Research Infrastructure for Coastal Observatories.

*** EQUIPEX : Équipements d'Excellence ; NAOS : Novel Argo Ocean observing System ; ASICS-MED : Air-Sea Interaction and Coupling with Submesoscale structures in the Mediterranean.



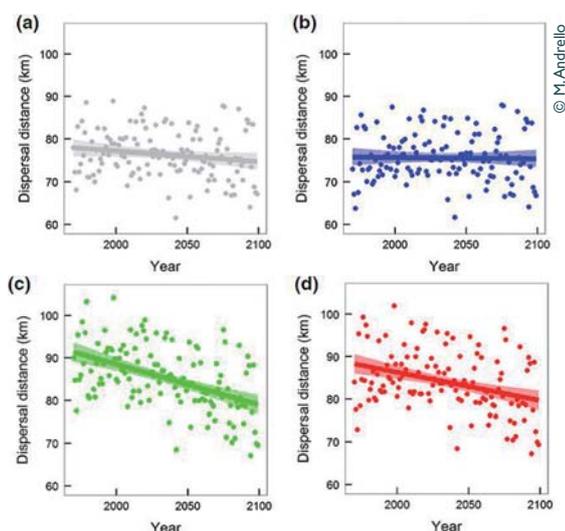
◀ Campagnes DeWEX - MermEX (Deep Water formation Experiment — Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment).

a. Distribution des concentrations moyennes en chlorophylle de surface (µg.l⁻¹).

b. Évolution temporelle des concentrations en nitrate (µM) mesurées au niveau de la MLD (Mixed Layer Depth, correspondant à la profondeur de la couche de mélange) par les profileurs PROVOR.

c. Évolution temporelle de la profondeur de la MLD (en mètres). Les zones grisées correspondent aux périodes des campagnes-bateaux « DeWEX —MermEX ».

Le changement climatique va diminuer la capacité des aires marines protégées à essaimer des larves de poissons vers les zones exploitées



© M. Andreillo

La mer Méditerranée compte plus d'une centaine d'aires marines protégées (AMP) qui doivent assurer le maintien des espèces exploitées sur l'ensemble du plateau continental. La connectivité des populations, garantie notamment par la dispersion des larves en fonction des courants, est un élément essentiel de l'efficacité du réseau d'AMP car vecteur d'essaimage vers les zones exploitées.

Dans une étude publiée dans la revue *Diversity and Distribution* et financée par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité et par la Fondation TOTAL, des chercheurs de l'UMR MARBEC associés à d'autres partenaires (IRD, Aix-Marseille Université, UM, CNRS, Météo-France) ont montré que le changement climatique (+ 2,8°C à la fin du 21^e siècle) affecterait le degré de connectivité des populations de poissons en Méditerranée. En particulier, la distance de dispersion des larves devrait diminuer de 10 % (ce qui équivaut à 9 km en moyenne), provoquant une réduction de 3 % (soit environ 27 000 hectares) des surfaces exploitées qui seront essaimées par le réseau d'AMP. En effet, l'augmentation de température diminue la durée de vie larvaire — et donc les distances parcourues au gré des courants — alors que les modifications de courantologie attendues en mer Méditerranée vont affecter les trajectoires de ces larves. Ce travail démontre les impacts conjugués, physiques et biologiques, liés au changement climatique sur l'efficacité des réseaux d'AMP.

▲ Les effets de différents processus sur la distance de dispersion larvaire au cours du siècle.

En gris (a), effets des seuls changements de vitesse et de direction de courants marins (changements hydrodynamiques) ; en bleu (b), effets des changements hydrodynamiques et du changement de la saison de reproduction des adultes ; en vert (c), effets des changements hydrodynamiques et du changement de la durée de vie larvaire ; en rouge (d), les trois effets combinés.

Contact : David Mouillot, mouillot@univ-montp2.fr

Concilier exploitation et conservation des écosystèmes marins

L'UMR « Biodiversité marine, exploitation et conservation » (MARBEC – IRD, Ifremer, UM, CNRS) étudie la biodiversité marine des écosystèmes lagunaires, côtiers et hauturiers à différents niveaux d'intégration, depuis les aspects moléculaires, individuels, populationnels et communautaires, jusqu'aux usages de cette biodiversité par l'homme.

Présente sur trois sites en France métropolitaine (Sète, Montpellier, Palavas-les-Flots) ainsi que dans l'océan Indien, en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud, l'UMR concentre ses efforts sur trois objectifs principaux :

- décrire la biodiversité marine, comprendre sa dynamique et le fonctionnement des écosystèmes marins ;

- analyser l'impact des pressions anthropiques sur ces écosystèmes et développer des scénarios de réponses aux changements globaux ;
- mieux concilier l'exploitation et la conservation de ces écosystèmes.

Pour aborder ces défis, l'unité s'est structurée en huit thèmes de recherche :

- ① écologie évolutive et adaptation ;
- ② individus, populations et habitats ;
- ③ dynamique et fonctionnement des communautés ;
- ④ microorganismes et interactions avec les macroorganismes ;
- ⑤ contaminants : devenir et réponses ;
- ⑥ aquacultures durables ;
- ⑦ systèmes littoraux d'usages multiples ;
- ⑧ approche écosystémique des pêches.

L'étude des impacts des changements globaux sur la biodiversité marine est présente dans chacun de ces thèmes.

Les structures principales

UMR LOMIC
Laboratoire d'Océanographie
Microbienne
(UPMC/CNRS)
12 scientifiques

UMR MARBEC
Marine Biodiversity, Exploitation
and Conservation
(IRD/Ifremer/UM/CNRS)
121 scientifiques

UMS MEDIMEER
Centre d'écologie marine expérimentale
de l'OSU OREME
(UM/CNRS/IRD)
2 scientifiques

USR LBBM
Laboratoire de Biodiversité et
Biotechnologies Microbiennes
(UPMC/CNRS)
20 scientifiques

Vulnérabilité et préservation des écosystèmes méditerranéens marins, littoraux et de grande profondeur

Les recherches du « *Laboratoire d'Écogéochimie des Environnements Benthiques* » (UMR LECOB – UPMC, CNRS) s'intéressent aux fonctions et à la vulnérabilité des écosystèmes des fonds marins et de leurs interfaces.

Du littoral méditerranéen aux grandes profondeurs, les modèles étudiés par l'institut sont des environnements fortement dynamiques et soumis à des pressions anthropiques multiples : habitats rocheux, embouchures

de fleuves, canyons sous-marins, sources hydrothermales. Ces habitats sensibles sont aussi des *hot-spots* de biodiversité et de productivité qui font l'objet de mesures de conservation.

Les recherches du LECOB visent à :

- mieux comprendre les réseaux d'interactions dynamiques qui lient les communautés benthiques marines et leurs fonctions aux propriétés de l'environnement ;
- modéliser ces interactions pour prédire les relations entre diversité biologique, hétérogénéité de la ressource et fragmentation de l'habitat au travers d'approches métapopulations et métacommunautés ;

- intégrer ces connaissances dans des modèles prédictifs basés sur des scénarios climatiques ou de perturbations anthropiques directes ;
- mettre au point et évaluer des méthodes et outils permettant de tester l'efficacité de mesures de conservation ou la pertinence d'indicateurs de la qualité écologique du milieu.

En plus du soutien de ses organismes de tutelle, le LECOB bénéficie pour ses projets en cours de ceux de l'ANR, du programme LITEAU du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) et de la Fondation d'entreprise TOTAL. ●●●

Influences hydrodynamiques sur la conservation des coraux en contexte littoral et dans les canyons profonds

Les gorgonaires sont des espèces-ingénieures remarquables du littoral méditerranéen. Ils jouent un rôle essentiel pour la biomasse et la diversité des substrats rocheux. Pour évaluer l'impact de mesures de protection sur la distribution de ces espèces, le LECOB développe des modèles de connectivité, en simulant de la dispersion larvaire, qui combinent des études expérimentales du comportement de mobilité des larves et des simulations numériques de l'hydrodynamique. Ces estimations de la connectivité sont établies pour des métapopulations de différentes espèces de gorgonaires (dont le corail et les gorgones rouges et blanches), en mer Ligure dans le cadre d'une bourse doctorale européenne (MARES[®]) et dans le Golfe du Lion dans le cadre d'un projet LITEAU IV (RocConnect[™]).

Les coraux scléactiniaires jouent un rôle comparable en environnement profond. Particulièrement vulnérables aux impacts anthropiques (chalutage, déchets) et aux effets du changement global (réchauffement, acidification et modification de la circulation des masses d'eau), ils font également l'objet de mesures de protection au niveau international. Les ressources nutritives de certains canyons sous-marins, liées à des conditions hydrodynamiques particulières, en font des habitats privilégiés pour ces coraux. C'est le cas notamment du canyon Lacaze-Duthiers, au large de Banyuls, qui abrite

d'importantes populations de *Lophelia pertusa* et de *Madrepora oculata*, désormais intégrées dans le plan de gestion du Parc naturel marin du Golfe du Lion.

Afin d'évaluer la sensibilité de ces écosystèmes profonds aux changements climatiques, et notamment à l'influence d'événements météorologiques extrêmes, le LECOB a développé un programme de recherche dédié à la croissance et au rôle écologique de ces espèces-ingénieures, associant géochimie organique et écologie microbienne. Ces travaux s'inscrivent dans le programme de la chaire « Environnement marin extrême, biodiversité et changement global » mise en place par l'UPMC avec le soutien de la Fondation TOTAL. Ils ont été appuyés par le CNRS (Projet Exploratoire Pluridisciplinaire de l'Institut d'Écologie et Environnement) et font l'objet d'une collaboration avec la *Jacobs International University* de Brême (Allemagne).

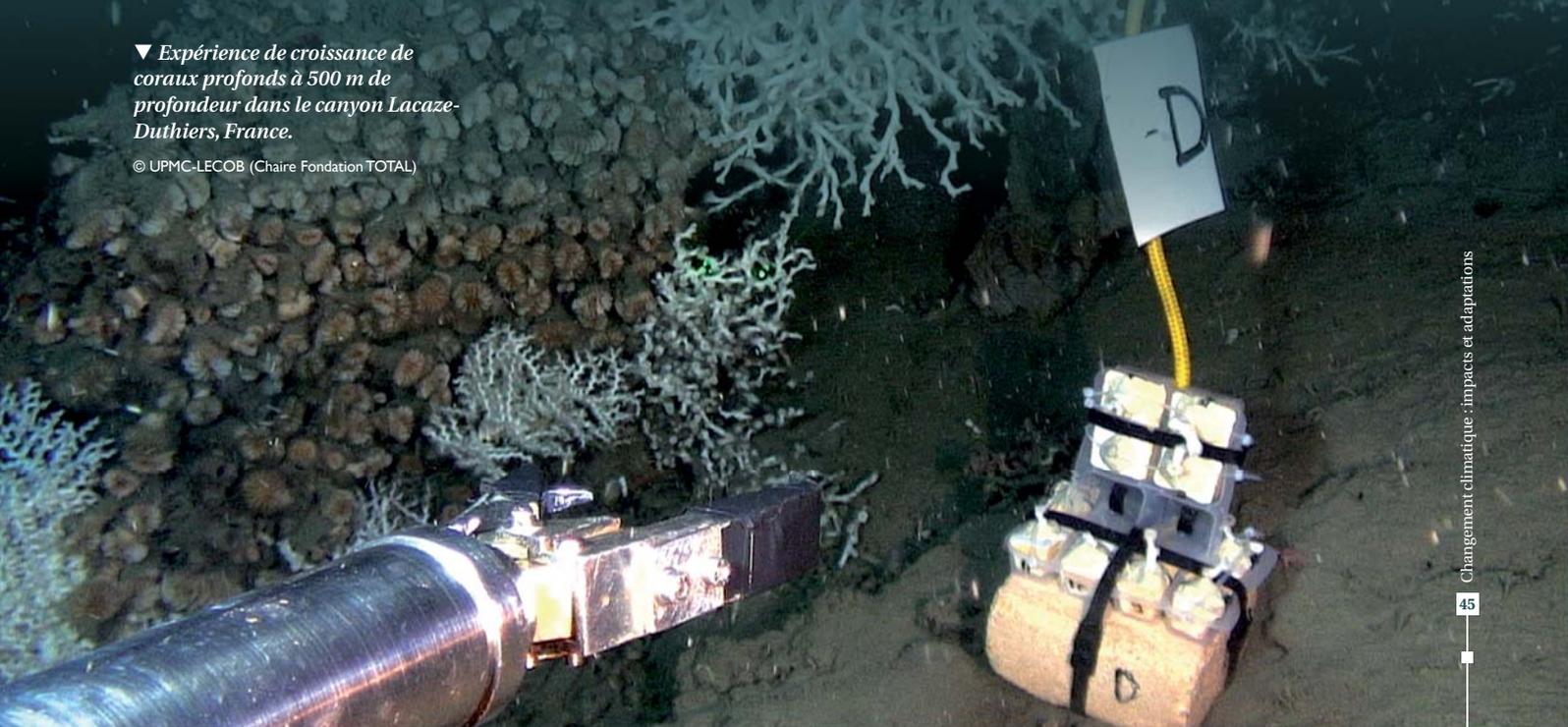
**Contacts : Katell Guizien, katell.guizien@obs-banyuls.fr
Franck Lartaud, franck.lartaud@obs-banyuls.fr
& Nadine Le Bris, lebris@obs-banyuls**

* *Marine Ecosystem Health and Conservation.*

** Connectivité des populations de l'habitat rocheux fragmenté du Golfe du Lion.

▼ *Expérience de croissance de coraux profonds à 500 m de profondeur dans le canyon Lacaze-Duthiers, France.*

© UPMC-LECOB (Chaire Fondation TOTAL)



Étude comparée de modèles d'organismes marins classiques et non conventionnels

La recherche menée par l'UMR « *Biologie Intégrative des Organismes Marins* » (BIOM – UPMC, CNRS) est essentiellement académique. Son projet scientifique est focalisé sur l'étude des mécanismes de développement et d'adaptation des organismes à travers une approche évolutive. Cet objectif est commun à de nombreux groupes de recherche, mais l'originalité de ce projet réside dans son utilisation de modèles d'organismes marins non conventionnels, dans le cadre d'études comparatives et complémentaires avec celles menées sur des organismes modèles plus établis et plus traditionnels.

L'approche utilise les deux concepts opposés mais complémentaires de la vie — la grande diversité du vivant et son unité fondamentale, la cellule — ce qui permet de réaliser des comparaisons pertinentes entre des organismes pourtant phylogénétiquement éloignés. Ce type d'approche a souvent permis d'accomplir, dans des domaines biologiques variés, une percée significative conduisant à trouver des réponses à certaines questions biologiques fondamentales.

Le projet global de BIOM s'inscrit dans la lignée traditionnelle de ceux des stations marines : il consiste en l'étude de la biologie des organismes marins, à la fois pour explorer leur fantastique diversité (19 phylums métazoaires sur 36 sont exclusivement marins) et pour

utiliser et étudier cette diversité en tant que modèles biologiques potentiels, en complémentarité avec les modèles conventionnels. Dans ce contexte global, les deux principaux axes de recherche de BIOM sont la biologie du développement et l'étude des mécanismes d'adaptation, en utilisant à la fois les organismes modèles unicellulaires et multicellulaires.

L'intérêt de l'unité BIOM pour l'adaptation aux changements climatiques peut être illustré par l'exemple du projet SalTemp. Plus globalement, les études menées au sein de l'unité sur l'adaptation des organismes marins aux changements environnementaux incluent les changements climatiques.

Projet SalTemp : réchauffement global et adaptation à la migration chez le saumon Atlantique de rivière longue, l'axe Loire-Allier



M. Caunt © Shutterstock

La température intervient avec les cycles de lumière/obscurité pour contrôler le déclenchement de la migration du saumon vers la mer. Mais comment ? Comment capte-t-il l'information « température » et quels messages hormonaux élabore-t-il en réponse ? Par ailleurs, s'adaptera-t-il au réchauffement climatique en cours ?

À toutes ces questions, le projet SalTemp, coordonné par l'équipe « Facteurs du Milieu et Mécanismes Adaptatifs » de l'UMR BIOM, ambitionne de trouver des réponses. L'objectif est de comprendre comment lumière et température interagissent pour contrôler le déclenchement de la migration du saumon. Cette information est en effet cruciale pour sa survie, laquelle dépend des températures que le poisson rencontre sur son parcours. C'est pourquoi les conséquences du réchauffement climatique sur ces processus seront également étudiées.

La température est un effecteur majeur du métabolisme, de la physiologie et du comportement des poissons. Chacun possède sa fenêtre physiologique au-delà de laquelle — températures trop basses ou trop élevées — la survie est compromise.

Il s'agit dans ce projet d'étudier chez le saumon du bassin Loire/Allier :

- les mécanismes de la thermoréception ;
- l'impact de cette thermoréception sur la production rythmique (journalière et saisonnière) de la mélatonine ;
- le rôle de la mélatonine sur les sécrétions hormonales hypophysaires qui interviennent dans le déclenchement de la migration vers l'océan.

L'équipe étudie *in vivo* et *in vitro* comment photopériode et température interagissent dans le contrôle du rythme de production de la mélatonine (hormone « donneuse de temps ») et dans celui de l'axe neuroendocrine hypothalamo-hypophysaire impliqué dans le contrôle de la migration vers l'océan. Une autre hypothèse sera également testée, selon laquelle tout ou partie des effets de la température passe par des canaux membranaires perméables au calcium agissant au niveau de l'organe pinéal et de l'axe neuroendocrine.

Une expérimentation sera mise en œuvre pour étudier l'impact d'un réchauffement de 5°C sur l'activité locomotrice et le comportement de dévalaison, mais aussi sur les mécanismes moléculaires, endocriniens et physiologiques qui les contrôlent. L'ensemble des résultats permettra de comprendre et de prédire l'impact de l'élévation de température et de son décalage avec la photopériode sur la migration. Les conséquences sur la survie de la population et la durabilité des actions de repeuplements seront également examinées.

Contact : Jack Falcón, falcon@obs-banyuls.fr

Effets du réchauffement climatique sur le déclenchement des blooms phytoplanctoniques marins : photopériodisme, composition et adaptation

Le réchauffement des océans est le principal facteur responsable des changements globaux de productivité, biomasse et phénologie (moment des blooms) des communautés phytoplanctoniques. Dans les océans tempérés, l'abondance et la diversité du phytoplancton augmentent de façon considérable entre l'hiver et le printemps. Ces blooms résultent vraisemblablement d'une combinaison de paramètres physiques (lumière, température), chimiques (nutriments) et écologiques (interactions avec les bactéries, prédation). La vie de la plupart des organismes vivants est régie par le cycle jour/nuit (photopériode) qui régule des processus saisonniers (photopériodisme). La température est un facteur important contrôlant la physiologie du phytoplancton ; la photopériode est, elle, susceptible de contrôler le moment des blooms.

Dans le cadre du projet PHOTO-PHYTO (ANR 2014-2017) des chercheurs du LOMIC, de l'UMR MARBEC et de l'OOB, en partenariat avec l'entreprise Metabolium de Romainville, étudient le rôle et la hiérarchie de facteurs environnementaux fluctuants (comme la température) et intrinsèques (comme l'horloge

circadienne contrôlant le photopériodisme) dans l'initiation des blooms printaniers. Ce projet propose de développer une approche pluridisciplinaire combinant des expertises uniques en océanographie, écologie microbienne, génomique fonctionnelle et évolution expérimentale sur la picoalgue modèle *Ostreococcus tauri*.

Les questions explorées sont les suivantes :

- 1 Quels sont les principaux facteurs *in situ* contrôlant les blooms phytoplanctoniques printaniers ?
- 2 Comment la température et la photopériode interagissent-elles pour déclencher les blooms printaniers ?
- 3 L'adaptation au réchauffement affecte-t-elle le photopériodisme et les interactions trophiques ?
- 4 Quel est l'effet du réchauffement sur les communautés microbiennes naturelles ?

Contact :
François-Yves Bouget, francois-yves.bouget@obs-banyuls.fr



◀ *Simulateur de lumière en microplaques permettant de reproduire de multiples conditions d'intensité, de qualité et de photopériode lors de la culture d'espèces phytoplanctoniques.*

Ce dispositif permet également de mesurer l'expression de paramètres de luminescence pour suivre l'impact des paramètres environnementaux (lumière, nutriments) et anthropiques (polluants) sur l'expression de gènes rapporteurs.

Adaptation des micro-organismes marins aux changements globaux

L'objectif général du « *Laboratoire d'Océanographie Microbienne* » (UMR LOMIC – UPMC, CNRS)

est d'étudier les interactions réciproques entre un milieu changeant et varié — l'océan — et les microorganismes qui l'habitent, de manière intégrative, du gène à l'écosystème. Pour cela, le LOMIC rassemble des compétences dans les domaines de la biogéochimie marine, de l'écologie microbienne, de la génomique fonctionnelle et de l'écotoxicologie. Cette pluridisciplinarité permet d'aborder des questions aux frontières de la science.

La recherche au sein du LOMIC est structurée autour de quatre axes thématiques :

- la régulation des fonctions microbiennes par la lumière et les nutriments ;

- la réactivité de la matière organique et la diversité microbienne ;
- les processus microbiens et la biogéochimie des océans ;
- l'écotoxicologie et l'ingénierie métabolique microbienne.

Ces thématiques concernent à la fois des questions de recherche fondamentale (réponses des microorganismes aux changements globaux des océans, par exemple) et de recherche appliquée (valorisation des microalgues, biodégradation de plastiques...) qui sont élaborées en partenariat avec des industriels (Mycrophyt, Metabolium, etc.).

Les approches mises en place au LOMIC sont diversifiées, allant d'expériences sur des microorganismes modèles (par exemple *Ostreococcus tauri* ou *Photobacterium angustum*) jusqu'à des études de terrain lors de campagnes océanographiques, en passant par des expériences sur des communautés microbiennes en conditions contrôlées.

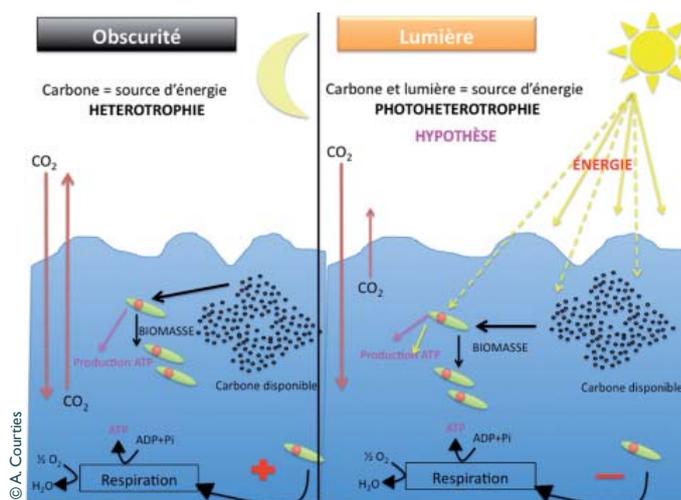
Le LOMIC s'intéresse, entre autres, à l'étude de la réponse et de l'adaptation des microorganismes marins autotrophes et hétérotrophes aux changements climatiques. C'est une question clé pour analyser les conséquences des modifications environnementales à l'échelle planétaire. Ces microorganismes sont en effet essentiels à la vie sur terre, et leurs métabolismes très diversifiés leur permettent de réaliser de multiples étapes dans les cycles biogéochimiques.

Le LOMIC est rattaché à l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS, mais est aussi thématiquement en interaction forte avec l'Institut d'Écologie et de l'Environnement et l'Institut des Sciences Biologiques du CNRS. Il est par ailleurs impliqué dans différents projets de recherche en mer Méditerranée et dans les océans Austral, Arctique et Pacifique. ●●●

Comprendre les déterminants de l'activité et la diversité des microorganismes dans les environnements aquatiques

Les activités du « *Laboratoire de Biodiversité et Biotechnologies Microbiennes* » (USR LBBM – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS) portent sur la connaissance de la biodiversité et du rôle fonctionnel des microorganismes dans l'environnement en se focalisant sur les systèmes aquatiques (marins, maritimes, continentaux). Pour cela, le LBBM fédère des compétences en écologie microbienne, en microbiologie, en écologie chimique, en biotechnologie et en pharmacologie exploratoire.

L'objectif de l'unité est de mieux comprendre comment les facteurs biotiques et abiotiques régulent l'activité et la diversité des microorganismes dans les environnements aquatiques. Une part importante de son activité est également dédiée à la valorisation des connaissances issues de ces recherches (potentiel biotechnologique de sa collection de microorganismes, développement d'outils de diagnostic).



◀ **Modes de vie hétérotrophe et photohétérotrophe.**
À gauche, le carbone organique est transformé en biomasse cellulaire ou utilisé pour produire de l'énergie cellulaire via la respiration.
À droite, pour un nombre équivalent de cellules, la respiration est en théorie moins nécessaire et la production de dioxyde de carbone réduite.

Les missions du LBBM sont de :

- développer, dans le domaine de l'écologie microbienne des milieux aquatiques, une recherche de pointe s'appuyant sur l'étude de la diversité des microorganismes, sur la connaissance de leurs propriétés génétiques et physiologiques, et sur celle des molécules qui leur permettent d'interagir ou d'agir sur leur environnement ;
- soutenir et promouvoir l'innovation scientifique à l'interface santé-environnement par des actions collaboratives permettant de répondre aux grands défis sociétaux (traitement des cancers, impact et devenir des

contaminants chimiques et biologiques dans l'environnement, compréhension des possibles effets du changement climatique sur les microorganismes) ;

- transmettre les connaissances au travers de la formation des étudiants et de jeunes chercheurs.

La recherche au sein du LBBM est organisée en trois thématiques majeures : « Omique environnementale et mécanismes de régulation des communautés naturelles », « Biodiversité microbienne et biomolécules » et « Contaminants émergents dans les environnements aquatiques et santé ».

Affiner les prévisions climatiques à long terme, grâce à l'étude des effets de la lumière sur les bactéries à protéorhodopsine des océans



▲ **Photobioréacteurs utilisés dans le cadre du projet ANR RHOMEO pour des mesures de rendement en carbone dans différentes conditions d'éclairement.**

Le LBBM coordonne le projet RHOMEO (*ProteoRHO*dopsin-containing prokaryotes in Marine EnvirOnments), en collaboration avec l'UMR « Adaptation et Diversité en Milieu Marin » de la station biologique de Roscoff. L'objectif de ce projet est de combiner l'estimation de la diversité et de la dynamique spatio-temporelle des bactéries photohétérotrophes marines avec des études physiologiques en photobioréacteurs ciblant des souches isolées.

Des techniques moléculaires de pointe sont mobilisées pour déterminer la diversité des bactéries contenant des protéorhodopsines (à l'aide de pompes à protons lumino-dépendantes permettant d'utiliser la lumière comme source d'énergie) dans trois sites contrastés : en mer Méditerranée, dans la Manche et dans l'océan Arctique. Les études physiologiques utilisent des photobioréacteurs ainsi que des souches microbiennes modèles pour évaluer les effets de la lumière sur le rendement de croissance de ces organismes dans différentes conditions de lumière et de qualité de substrats.

Ces expérimentations conduiront à déterminer la quantité de carbone produite grâce à l'utilisation de l'énergie lumineuse chez les photohétérotrophes. Ces résultats permettront de lier l'utilisation de sources de carbone spécifiques et la physiologie de souches modèles représentatives de l'environnement. La combinaison des expérimentations *in situ* et des expérimentations physiologiques permettra d'estimer les effets de la lumière sur le métabolisme de ces organismes aux sites échantillonnés. Ces résultats contribueront à affiner la compréhension des prévisions climatiques à long terme, en tenant compte de ces organismes qui constituent une composante très importante des communautés microbiennes des océans.

Contact : **Marcelino Suzuki**, suzuki@obs-banyuls.fr

Pour plus d'informations : www.obs-banyuls.fr/rhomo



▲ Mésocosmes in situ de MEDIMEER immergés dans la lagune de Thau (Méditerranée Nord-occidentale, France).
Le volume d'eau de chaque mésocosme est de 2 m³ et leur profondeur de 2 m.

© B. Mostajir

Expérimentations en conditions contrôlées en milieux marins

Le « *Centre d'écologie marine expérimentale* » (plateforme MEDIMEER de l'OSU OREME – CNRS, UM, IRD), basé à la Station Méditerranéenne de l'Environnement Littoral à Sète, propose à la communauté scientifique nationale et internationale une expertise scientifique de pointe dans la réalisation d'expérimentations en conditions contrôlées (mésocosme) en milieux marins.

Un « mésocosme » est une enceinte expérimentale, isolant un volume d'eau supérieur à 1 m³ avec des conditions proches du milieu naturel, dans laquelle les facteurs environnementaux (température, lumière, CO₂, éléments nutritifs, etc.) peuvent être manipulés de façon réaliste. C'est un outil puissant

faisant le lien entre l'observation du milieu et les études en laboratoire à petite échelle.

Les objectifs de MEDIMEER sont d'offrir aux groupes de recherche nationaux et internationaux à la fois :

- une expertise dans le domaine de l'écologie marine expérimentale axée sur l'expérimentation en mésocosme ;
- et une large gamme de facilités expérimentales. MEDIMEER possède des mésocosmes *in situ* immergés dans la lagune de Thau (mais pouvant être transportés et déployés sur d'autres sites), des mésocosmes à terre en attente d'installation, ainsi que trois plateformes (observation, analyse et logistique) et un parc instrumental. Cet ensemble d'infrastructures permet d'étudier, en conditions contrôlées, l'impact de forçages naturels et anthropiques sur le fonctionnement des écosystèmes

marins (production, diversité, flux de matière, résistance, résilience, etc.).

MEDIMEER apporte également un soutien à des activités de recherche plus appliquées comme la gestion durable des ressources, la remédiation des écosystèmes dégradés, la production de biomasse à des fins industrielles (biocarburant, bioénergie), et l'écotoxicologie (dans les mésocosmes à terre).

Les recherches effectuées à MEDIMEER permettront de quantifier et de qualifier les effets de forçages physiques, chimiques et biologiques locaux et globaux sur la diversité des organismes aquatiques, sur leurs physiologies et leurs interactions et, enfin, sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. ●●●



© UPMC - OOB

EMBRC, l'un des plus grands dispositifs européens de recherche sur la biodiversité

Les trois stations marines de Banyuls-sur-Mer, Roscoff et Villefranche-sur-Mer, placées sous la co-tutelle de l'UPMC et du CNRS, ont uni leurs forces au sein du « *Centre national de ressources biologiques marines* » (EMBRC-France) dans l'objectif d'approfondir la connaissance de la biodiversité marine.

Les ressources biologiques marines et leurs applications potentielles à des domaines aussi variés que l'agriculture, la santé ou la cosmétique, restent en effet encore peu explorées. Or, avec 11 millions de kilomètres carrés, la France possède la deuxième zone économique exclusive (ZEE) au monde et, répartie sous tous les climats, cette ZEE offre

une biodiversité d'une richesse considérable.

Point d'entrée de l'exploration des bio-ressources marines sur le territoire, EMBRC-France bénéficie dans sa gouvernance du soutien du programme « Investissements d'avenir », de l'implication forte des régions Bretagne, Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur, ainsi que de celle des pôles de compétitivité « Mer Bretagne Atlantique » et « Mer Méditerranée ».

■ Dans un contexte régional et national, EMBRC-France et plus particulièrement l'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer (OOB), offre aux entreprises et aux scientifiques académiques un accès simplifié aux écosystèmes, ressources biologiques marines et à des plateformes scientifiques de pointe. Par l'accueil sur place

ou les prestations à distance, EMBRC-France lève ainsi le verrou du difficile accès aux ressources biologiques marines et met à disposition un outil majeur pour l'exploration et l'exploitation de la biodiversité marine, de l'échelle moléculaire aux écosystèmes.

■ Dans un contexte plus large, l'EMBRC a été sélectionné en 2009 par le Forum stratégique européen pour les infrastructures de recherche (ESFRI) pour devenir l'un des futurs grands dispositifs européens de recherche. Avec une mise en œuvre prévue pour 2016, ce centre européen de ressources biologiques marines reliera les principales stations de biologie marine européennes et il en sera bientôt l'un des leviers pour l'innovation. ■



▲ À bord du navire de station « Nereis II » : chercheurs posant une ligne verticale de trappes afin de piéger les particules qui sédimentent.

© P. Lebaron

