



HAL
open science

Les sciences de l'Ecologie et de l'Environnement, actrices du développement durable - La mer

Denis Allemand, Bruno David, Jean-Pierre Féral, Nadine Le Bris, Marc
Trousselier, Frederique Viard

► **To cite this version:**

Denis Allemand, Bruno David, Jean-Pierre Féral, Nadine Le Bris, Marc Trousselier, et al.. Les sciences de l'Ecologie et de l'Environnement, actrices du développement durable - La mer. Prospective de l'Institut Ecologie et Environnement du CNRS, 2013, pp.173-182. 10.5281/zenodo.12783305 . hal-04654353

HAL Id: hal-04654353

<https://hal.science/hal-04654353>

Submitted on 19 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Allemand (D.), David (B.), Féral (J.-P.), Le Bris 'N.), Trousselier (M.), Viard (F.) 2013 Les sciences de l'Ecologie et de l'Environnement, actrices du développement durable - La mer. Prospective de l'Institut Ecologie et Environnement du CNRS, Avignon, 24-25 Mai 2012, CNRS-INEE : Paris, pp. 173-182

doi : 10.5281/zenodo.12783305

Les Cahiers Prospectives



Prospective de l'Institut écologie & environnement du CNRS

COMPTE-RENDU DES JOURNÉES DES 24 ET 25 OCTOBRE 2012, AVIGNON

HORS-SÉRIE



www.cnrs.fr



**Les sciences
de l'écologie et
de l'environnement
actrices du
développement
durable**



LA MER

Coordinateurs : Denis Allemand, Bruno David, Sylvie Dufour, Jean-Pierre Féral, Nadine Le Bris, Marc Troussellier, Frédérique Viard

Contributeurs : Sylvain Lamare, Guillaume Lecointre, David Mouillot, Nathalie Niquil, Eric Thiébaud et tous les participants de l'atelier « Mer » d'Avignon

On a pu s'étonner d'un exercice de réflexion et de prospective dédié à la mer. En effet les concepts et cadres théoriques qui fondent les recherches en écologie, systématique, évolution et sciences de l'environnement sont les mêmes pour le domaine marin et le domaine continental. De surcroît, le cadre général (changement global) est similaire. Au-delà du fait que les agrosystèmes, les forêts, les montagnes, les zones tropicales bénéficient de réflexions individualisées, en France et à l'étranger, et que la mer ne doit pas faire exception, l'INEE bien qu'abritant un nombre significatif de laboratoires développant des recherches en mer doit encore consolider sa position. Il s'agissait donc de faire une synthèse des potentiels de l'institut et d'en évaluer le futur. L'intention n'était pas de distinguer les recherches d'écologie marine de celles menées sur les autres écosystèmes mais de donner l'occasion aux équipes « marines » de l'INEE de pouvoir faire connaître leurs priorités actuelles et à venir tel que le font les communautés des autres organismes de recherche travaillant dans le milieu marin.

La richesse des compétences présentes dans les unités de l'INEE travaillant sur le domaine marin a conduit à identifier une grande diversité de problématiques et de pistes de recherche ayant trait aux écosystèmes marins, à leur connaissance et à leur devenir¹. Le présent document a pour objectif de dégager quelques axes prospectifs synthétiques pour une vision à moyen terme (de l'ordre de cinq ans), qui pourra être prolongée si besoin est, mais ils ont vocation à être revisités régulièrement (tous les deux ou trois ans) pour s'ajuster aux avancées nouvelles et aux évolutions rapides du domaine, notamment celles liées aux technologies « omiques » et aux capteurs.

Ce document de synthèse prospective condense des informations issues de plusieurs sources : les travaux menés par le groupe de réflexion « Mer » au cours de l'année 2012, les discussions qui ont eu lieu au sein de l'atelier « Mer » lors du colloque de prospective INEE en Avignon et les contributions du CSI de l'INEE. Les priorités exposées ici sont des indications résumées, elles ne prétendent pas être exhaustives et sont volontairement hétérogènes. Ainsi, soit ces axes mettent en avant des transversalités entre communautés et approches, soit ils sont centrés sur un objet d'intérêt. La liste aurait pu être beaucoup plus longue, mais elle aurait alors débordé du cadre de ce chapitre dont l'objectif est de mettre en avant quelques priorités.

1 - Un autre cahier de prospective de l'INEE est entièrement dédié à la mer.



Les trois axes mis en exergue lors des discussions d'Avignon sont les suivants :

- **l'intégration terre-mer,**
- **les interactions du vivant avec l'environnement marin,**
- **la connectivité.**

Les deux premiers sont typiquement marins et ont été discutés en priorité lors de l'atelier prospective d'Avignon. Les questions relatives à la connectivité prennent une résonance particulière dans le milieu marin et ont également fait l'objet d'une discussion approfondie.

Cette liste a été élargie à d'autres points d'intérêt, tout aussi importants, qui avaient été soulevés lors de la phase préparatoire aux prospectives, ou pro parte évoqués en Avignon, parmi lesquels :

- les transitions d'échelle,
- changement global et adaptations,
- modéliser pour scénariser et prévoir,

considérés comme transversaux, ont été traités en tant que tels dans d'autres ateliers de la prospective.

Les besoins et les moyens requis, largement discutés, recoupent tous les axes et ils font l'objet d'une présentation distincte.

L'intégration terre-mer

La compréhension d'un grand nombre de crises environnementales, la prédiction du devenir des systèmes marins côtiers, la préservation de la biodiversité et des services rendus passent par une meilleure compréhension du fonctionnement du *continuum* terre-mer² et de ses interfaces. Les très grands enjeux de différentes natures qui sont associés à ces écosystèmes d'interface sont reconnus, mais les connaissances en sont encore fragmentaires et ne sont pas toujours en mesure de fournir des aides satisfaisantes pour assurer leur durabilité en regard des pressions anthropiques subies et à venir. Ce besoin de recherches se confirme concernant un des « nouveaux biomes » déjà mis en exergue lors des prospectives de Rennes en 2009 : le littoral. Plusieurs unités de recherche ont été créées depuis, ou renforcées dans leurs activités et missions sur cette interface terre-mer (LIENS³ sur l'Atlantique, l'IMBE⁴ et ECOSYM⁵ sur la Méditerranée), d'autres explorent ces couplages en amont, des bassins versant aux estuaires (SISYPHE⁶), ou au-delà de la zone côtière, des marges continentales aux débris végétaux transportés vers le milieu abyssal (LECOB⁷, SAE⁸).

En termes d'organisation de la science, il s'agit

d'encourager l'interdisciplinarité et d'accroître les interfaces avec les différents acteurs et usagers (société sensu lato qui est en attente de plus en plus pressante de réponses scientifiques). Au sein de l'INEE, ce sont l'ensemble des piliers de compétences (écologie, évolution, interactions hommes-milieus) qui vont contribuer à cette organisation.

C'est aussi le lieu où l'un des objectifs de l'INEE, « rapprocher les connaissances de l'action », prend une résonance particulière car les questions de l'exploitation des ressources (aujourd'hui essentiellement les stocks sauvages et le pétrole, mais aussi de plus en plus de nouvelles ressources biotechnologiques et minières), du poids grandissant de l'aquaculture côtière dans la production de protéines, mais aussi de la production d'énergie impactent directement les écosystèmes marins et impliquent le développement de recherches en amont et en aval des procédés utilisés.

Plus spécifiquement, une attention particulière devra être apportée aux items qui suivent :

- Les spécificités biologiques et les capacités adaptatives des organismes, des populations et des communautés qui vivent aux

2 - Le domaine spatial considéré s'étend de la partie inférieure des bassins versants (grand fleuves) et les rivières côtières jusqu'à la zone d'influence directe des milieux terrestres en mer (e.g. ruissellements, aérosols), parfois matérialisée par le rebord du plateau continental. 3 - LIENSs : UMR 7226, Littoral, environnement et société, La Rochelle. 4 - IMBE : UMR 7263, Institut Méditerranéen de la Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale, Marseille. 5 - ECOSYM : UMR 5119, Ecologie des systèmes marins côtiers. 6 - SISYPHE : UMR 7619, Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux, Paris. 7 - LECOB : UMR 8222, Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques, Banyuls sur Mer. 8 - SAE : UMR 7138, Systématique, Adaptation, Evolution, Paris

interfaces : quels en sont les mécanismes et les limites ?

- Les réponses des composantes des systèmes écologiques à la multiplicité et l'ampleur des pressions d'origine locale et globale : comment l'écologie expérimentale peut-elle contribuer à déconvoluer et/ou reconstituer ces pressions multiples pour en comprendre les effets ?

- Les conséquences de l'artificialisation (ports, aménagements littoraux, fermes et éoliennes offshores...) et des mesures de conservation ou de protection : comment évaluer les effets positifs comme négatifs de ces deux processus pour les articuler au mieux ?

- Les rôles de l'hétérogénéité, de la variabilité, de la complexité des environnements littoraux dans les capacités de résistance et de résilience des systèmes biologiques et socio-écologiques et de leurs composantes : quels sont les processus à l'œuvre et les modèles

conceptuels/numériques sous-jacents ?

- L'identification et l'étude des propriétés des systèmes fragiles (e.g. îles) et des systèmes plus résilients (e.g. lagunes) ou ceux dont la résilience est encore peu connue comme les écosystèmes profonds: quels indicateurs pertinents proposer ?

- La qualification et surtout la quantification des interactions et rétroactions entre les systèmes continentaux, côtiers et hauturiers, tant benthiques que pélagiques : quelles sont les échelles pertinentes et les modèles associés à développer en priorité ?

Ces points doivent aussi prendre en compte, pour y répondre, les recommandations européennes concernant les habitats, l'eau et le bon état écologique. Les laboratoires de l'INEE y sont naturellement impliqués.

Les interactions du vivant avec l'environnement marin

Les interactions et rétroactions biosphère – géosphère sont reconnues dans leurs grands principes depuis fort longtemps. Néanmoins, le développement de moyens techniques plus performants (notamment capteurs⁹) permet, depuis quelques années, de replacer les aspects biologiques au centre de la question des interactions entre l'océan, dans ses dimensions physico-chimiques, et le vivant. En effet, ce dernier impacte de façon très significative de nombreux processus et, globalement, il conditionne les capacités tampon de l'océan tant vis-à-vis des pressions locales (e.g. eutrophisation) que globales (e.g. fixation du CO₂). La pluridisciplinarité est aussi à la base des avancées attendues dans la compréhension de ces interactions. Les biologistes sensu lato doivent s'associer plus particulièrement aux géologues et géochimistes dès lors que l'on considère le rôle des interfaces benthiques et pélagiques, aux atmosphériques et hydrodynamiciens pour comprendre les mécanismes d'échanges entre atmosphère et océan, ou aux biogéochimistes pour comprendre le fonctionne-

ment des cycles de la matière. Comme en écologie terrestre, ces compétences sont parfois rassemblées, au sein des unités notamment grâce à l'intégration de spécialistes en sciences de l'environnement (physique, chimie, géochimie), ou dans des structures et programmes à plus larges échelles (ZA¹⁰, OHM¹¹, PIRE) favorisant le développement de ces interfaces.

Parmi les questions scientifiques plus générales associées à la question des interactions, celle de la maîtrise des transferts d'échelle est centrale : comment passer du satellite et du global/régional à des échelles locales et comment passer de l'expérimental à échelle très réduite (e.g. microfluidique, approches à l'échelle cellulaire « single cell biology » ou de son expression moléculaire « protéomique/métabolique ») aux assemblages complexes que forment les communautés et les écosystèmes ou métaécosystèmes ? Il s'agit aussi de pouvoir articuler dynamique du vivant et dynamique de l'environnement dans des modèles intégratifs.

9 - cf. JF Le Galliard, JM Guarini et F Gaill [eds] Sensors for ecology, towards integrated knowledge of ecosystems. 10 - cf. ZA Brest - Iroise, <http://www-ieum.univ-brest.fr/zabri/fr> et ZA Terres australes et antartiques, <http://za-antartique.univ-rennes1.fr>. 11 - cf. OHM littoral méditerranéen, <http://www.ohm-inee.cnrs.fr/spip.php?rubrique115>

D'autres questions, plus spécifiques, doivent faire l'objet d'investigations soutenues :

- Quels effets induits de l'évolution de la composition et de la structure des communautés (e.g. sur les cycles biogéochimiques) ? On pourra par exemple considérer ici les macro-organismes calcifiants et le cycle du carbone. Parmi les questions centrales : quelles sont les rétroactions majeures sur la pompe biologique à carbone induites par des modifications de la biodiversité planctonique, elles-mêmes provoquées par le réchauffement, l'acidification, la stratification ou l'oligotrophisation de l'océan ? Comment élargir cette approche de la question à d'autres orga-

nismes qui peuplent également de vastes étendues, notamment le benthos côtier, en particulier les organismes contribuant à édifier des habitats (e.g. herbiers, coralligène, mangroves, récifs coralliens...) ?

- Quelle est l'importance de la chimiosynthèse dans les cycles du carbone, de l'azote et d'autres processus de régulations majeurs des écosystèmes, comme lors de phénomène d'anoxie et d'eutrophisation ? Quels sont les traits de l'évolution et du fonctionnement des communautés qui dépendent de ce mode de fixation du carbone ? Quel rôle jouent les écosystèmes profonds chimiosynthétiques sur la biogéochimie de l'océan et les écosystèmes pélagiques ?

La connectivité

La connectivité cristallise des questionnements scientifiques à la confluence entre sciences fondamentales (e.g. paradoxe de l'adaptation dans des environnements diffusifs ou encore des réponses biologiques anisotropes dans un milieu isotrope) et sciences appliquées (e.g. schéma de mises en réserves et de protection des écosystèmes). Les questions de connectivité touchent également des aspects sociaux (e.g. partage de pratiques) comme économiques (e.g. transport maritime). De ce fait, le terme de connectivité utilisé dans différents contextes disciplinaires avec des sens divers mérite d'être clarifié pour éviter des incompréhensions entre les acteurs des différents domaines scientifiques qui utilisent ce terme. Pour dépasser les limites méthodologiques et conceptuelles propres à chacune des disciplines scientifiques, il sera nécessaire de soutenir des réseaux d'acteurs, par exemple par des programmes scientifiques dédiés (e.g. PEPS, ANR).

De façon globale, les flux de gènes, d'individus et d'espèces qui définissent les échanges entre habitats et milieux se réalisent à différentes échelles spatiales et temporelles et ils ne peuvent être pleinement compris et pris en compte que par un couplage des modèles physiques et biologiques, mais aussi par d'autres approches transdisciplinaires, par exemple des approches bio-géo-chimiques. Les efforts

initiés dans ce domaine associant les compétences des équipes de l'INEE et des autres instituts/organismes devront être poursuivis. La plupart des recherches en macroécologie et notamment celles visant à anticiper les modifications de répartition des espèces sont dépendantes des progrès réalisés dans la compréhension et la prise en compte des mécanismes de connectivité y compris sur le temps court.

Concernant les processus biologiques, les questions se posent en termes disciplinaires ou interdisciplinaires ou encore au titre d'organismes ou d'écosystèmes peu étudiés sous l'angle de la connectivité :

- Le concept de connectivité prend en milieu marin des éclairages spécifiques selon les champs disciplinaires qui s'y intéressent (écologie, évolution, sciences sociales). Peut-on et comment réaliser une intégration disciplinaire autour de la connectivité ? Quels seraient les chantiers « idéaux » pour réaliser cette intégration ?
- Quelle utilisation des concepts de la biologie évolutive, et notamment de la génétique et de la génomique, privilégier pour cerner les questions de connectivité dans tous les compartiments de la biodiversité marine du nano- au méga- et du pélagos au benthos ? Auparavant cette question de connectivité concernait surtout des espèces mobiles d'assez grande taille

(notamment approchées par des techniques de Capture-Marquage-Recapture). La banalisation des outils génétiques et génomiques permet désormais une ouverture à toutes les espèces marines, y compris celles composant les communautés de microorganismes, et à toutes les questions liées à la connectivité.

● Comment intégrer les connaissances obtenues dans le domaine de l'écophysiologie (ex. variation des traits d'histoire de vie en fonction des conditions du milieu) dans les modèles de dispersion, en particulier ceux intégrant les paramètres physiques (hydrologiques) ?

● Comment mieux articuler les études fondamentales de la connectivité avec les problématiques de conservation (liens avec les AMPs, les invasions biologiques, la trame bleue, etc.), par exemple pour aller

vers une génétique de la conservation en milieu marin.

● Dans certains écosystèmes, comme ceux des grandes profondeurs, les questions de connectivité se posent avec une acuité particulière avec d'une part un environnement globalement stable et vaste, mais à relativement faible densité de peuplement et d'autre part avec des situations à forte instabilité temporelle et spatiale pour les communautés associées aux suintements hydrothermaux, aux carcasses de grands cétacés, ou aux bois coulés... Dans d'autres écosystèmes marins aux interfaces avec le continent, ce sont notamment les questions de l'impact plus ou moins simultané des aménagements et de l'artificialisation des littoraux, de l'exploitation des ressources ou de l'accroissement du trafic maritime sur les flux d'espèces qui doivent être analysés.

Autres items d'intérêt

Les interactions

Elles sont à la base de la quasi-totalité des équilibres et sont de tous ordres : biologique-biologique, sociologique-sociologique, environnementales-environnementales ou croisées. Abordées au niveau strictement biologique les interactions ouvrent sur les questions de productivité, de réseaux trophiques, de symbioses, de relations hôtes pathogènes, etc., autant de sujets dont la connaissance en domaine marin est encore trop fragmentaire, notamment à l'échelle des microorganismes dont on commence à peine à percevoir la richesse et la complexité (entre autres grâce aux premiers résultats de l'expédition TARA). En général ces questions ouvrent naturellement sur les interactions organismes-environnement, les adaptations ou associa-

tions d'organismes reflétant généralement une réponse optimisée aux facteurs de stress ou ressources disponibles. Mais les interactions doivent aussi être déclinées dans d'autres domaines (e.g. conflits d'usages pour l'accès aux ressources) et surtout entre domaines: interactions entre milieu et biodiversité, entre usages anthropiques et biodiversité, etc. C'est avec ce type d'approche, intégrant écologie, biologie de l'évolution, sciences humaines et sociales, qualifiée d'écologie globale, que l'INEE apporte toute son originalité. L'identification de nouveaux Sites d'Etude en Ecologie Globale (SEEG), outil interdisciplinaire de l'institut, pourra être envisagée pour répondre à des questionnements propres à des systèmes marins ou littoraux.

Changement global et adaptations du monde marin

Le siècle dernier a vu s'accélérer des changements environnementaux sans précédents, notamment en relation avec l'accroissement de la démographie et des activités humaines (artificialisation des milieux, introductions d'espèces, pêche, changements climatiques, etc.). Ils modi-

fient en profondeur l'ensemble du système mer dans ses composantes biotiques et abiotiques comme sociologiques ou économiques. Ceci pose la question de l'adaptation à différents niveaux d'intégration: organismes, espèces, systèmes écologiques et systèmes anthropiques à



des échelles de temps pertinentes. Des progrès importants sont ainsi attendus dans le domaine de la dynamique des génomes, des études des mécanismes de l'adaptation et de la physiologie des organismes qui sont des champs de connaissance fondamentaux à approfondir pour élaborer des scénarios pertinents. Quelles

réponses et à quel rythme ? Comment apprécier et analyser la complexité de pressions anthropiques croisées, s'additionnant ou se contrariant ? Comment déconvoluer des signaux d'origines diverses ? Comment se structurent des circuits d'inter-relations entre systèmes naturels et anthropiques ? Quelle est leur dynamique ?

La dynamique évolutive et la structure des génomes

Les dix dernières années ont témoigné d'une accélération sans précédent de connaissances sur la structure et la diversité des génomes marins dans le cadre de programmes Nationaux et Européens (e.g. Marine Genomics Europe, Oceanomics) qu'il convient de pérenniser et pour laquelle une démocratisation des outils est encore nécessaire. Ces premiers résultats offrent des outils pour mieux décrire la diversité (e.g. meta-barco-

ding) et pour aborder de nouvelles questions de recherche ou aborder différemment des questions encore mal élucidées dans le domaine marin. Il s'agit par exemple de la définition d'écotypes, de l'analyse des mécanismes d'isolement reproducteur ou encore de la relation phénotype-génotype. Ces recherches ouvrent également la voie vers une meilleure intégration des mécanismes épigénétiques dans les recherches éco-évolutives.

Modéliser pour scénariser et prévoir ?

Ce triptyque est désormais au centre de nombreuses approches que ce soit pour des systèmes à dominante naturelle et des questions fondamentales d'écologie, de phylogéographie ou d'écorégionalisation, comme pour des systèmes à dominante anthropiques et des questions d'impacts, de gestion des territoires... Les obstacles à surmonter sont du même ordre: quelles approches développer ? Comment intégrer le vivant et les processus associés dans les modèles globaux avec l'objectif d'accroître la fiabilité des prédictions ? Comment calibrer, transmettre et rendre acceptable l'incertitude ? Comment intégrer des paramètres sociaux et économiques aux bases biologiques et environnementales ? Les demandes qui émanent de

la société via diverses instances européennes (e.g. Marine knowledge 2020), nationales (e.g. celles du MEDDE), locales, institutionnelles, comme citoyennes sont de plus en plus nombreuses, tout spécialement lorsqu'il s'agit d'entrevoir des évolutions à venir. Les scientifiques sont confrontés à une situation paradoxale: d'un côté des questions pressantes, en attente de réponses de plus en plus précises, de l'autre des systèmes hautement complexes requérant l'acquisition de connaissances fondamentales qui font largement défaut (e.g. dispersion larvaire pour de nombreuses espèces) et des analyses lourdes, souvent longues. Une collaboration est, entre autre, nécessaire avec des laboratoires de l'INSHS.

Les transitions d'échelles

Toutes les sciences pratiquées dans le cadre de l'institut INEE supposent de savoir basculer entre différentes échelles tout en maintenant une cohérence d'approche. En soi cette question est très vaste et elle n'est ni neuve, ni spécifique à la mer. Néanmoins, dans le monde marin où les interconnexions sont facilitées par la densité du milieu, comment se font les transitions d'échelle ? C'est-à-dire comment une

somme d'effets locaux parvient à un impact global ? Comment identifier des patrons macro-écologiques qui signaleraient des systèmes perturbés à large échelle ? Quels mécanismes sont impliqués dans de telles transitions scalaires en domaine marin ? On aborde ici de plain-pied la problématique des effets de seuil. A noter que ceci suppose de disposer de séries temporelles bien documentées.

Les indicateurs

Dans le contexte de la mise en place de directives internationales, notamment Européennes (type DCH, DCE, DCSMM), de la montée en puissance de questionnements de la société civile et des collectivités sur l'état écologique, la restauration et l'ingénierie écologique associée, l'appréciation des compensations, les services écosystémiques... la nécessité de disposer d'indicateurs est cruciale. Il faut impérativement qu'ils soient forgés sur des

bases scientifiques robustes et il est nécessaire et urgent d'avoir une recherche amont, expérimentale autant que théorique, qui fournisse ces bases. La validation de ces indicateurs passe *pro parte* par la mise en place d'expérimentations de grande ampleur en utilisant les installations des laboratoires marins (aquariums d'étude, viviers), des mésocosmes ou encore des aménagements que représentent les parcs nationaux, réserves, AMPs, etc.

Entre généralité et spécificités

En ce qui concerne les axes prioritaires moins spécifiquement marins évoqués ci-dessus (e.g. transferts d'échelle, réponses aux changements globaux, scénariser), il convient de souligner qu'il existe des spécificités à la fois dans les forçages que subissent les systèmes marins et dans leurs réponses aux changements globaux.

Ainsi le déplacement des organismes marins par des voies naturelles ou artificielles (e.g. eaux de ballast) est plus facile qu'en milieu terrestre ce qui peut conduire à une homogénéisation biologique plus forte et plus rapide et à très grande échelle spatiale, les barrières naturelles originelles (e.g. équateur) devenant alors perméables. Les réponses des écosystèmes marins à l'accroissement des pressions anthropiques comme celle des flux de nutriments présentent des spécificités comme le développement de zones eutrophes ou anoxiques, ou le développement massif de microorganismes qui produisent des composés toxiques pour les espèces précédemment installées, et parfois aussi pour l'Homme. L'acidification des océans est également une réponse spécifique à l'accroissement de la pression partielle en CO₂ dont on connaît encore très mal les conséquences sur le vivant, dans toute sa complexité écologique, c'est-à-dire en prenant en compte les mécanismes de régulation des organismes et associations d'organismes jusqu'aux écosystèmes. Une des pressions les plus spécifiques que subissent les écosystèmes marins est l'exploitation des ressources qui a concerné et concerne encore aujourd'hui des stocks

d'organismes sauvages et qui sont pour beaucoup des prédateurs supérieurs. Enfin, le statut juridique des eaux marines (eaux internationales, domaine public maritime...) n'a pas d'équivalent continental et constitue un cadre particulièrement délicat pour assurer une durabilité des services écosystémiques, ce d'autant plus que l'exploitation des ressources en haute mer s'accélère et ne va aller qu'en s'accéléralant (énergie, minerais).

Les besoins et les moyens requis

Inventaires

De nombreuses thématiques portées au sein des laboratoires de l'INEE reposent sur la réalisation d'inventaires. Comment ? Pour quoi faire ? Par exemple, inventorier la biodiversité sous tous ses aspects (génétique, spécifique ou fonctionnelle) est une question qui se pose à nouveau de manière aiguë et totalement renouvelée à la lumière de deux changements récents :

- La prise de conscience que, dans la classique distinction entre known, unknown et unknowable, la part estimée de l'inconnu est beaucoup plus vaste qu'envisagée, notamment dans le domaine des microorganismes.
- Le développement accéléré des moyens d'investigation. Dans ce double cadre, la proportion du unknown s'accroît au fur et à mesure que, les techniques se développant, elles nous révèlent la diversité et la complexité de la vie marine, d'autant que s'y ajoute une érosion de l'expertise taxonomique dans

les laboratoires. Paradoxalement, plus on découvre de nouvelles entités génétiques, spécifiques ou fonctionnelles, plus on réalise que nos connaissances sont lacunaires.

La caractérisation moléculaire de la biodiversité marine est une voie privilégiée pour échapper à différents écueils méthodologiques d'estimation de la diversité du vivant à toutes les échelles. Cette caractérisation nécessite le maintien de moyens d'observation et d'accès aux écosystèmes marins (voir ci-dessous) et l'amélioration des infrastructures qui gèrent les référentiels de noms (les collections), la réorganisation des métiers et des infrastructures de séquençage massif face aux nouvelles technologies, en particulier en termes de capacités de calcul, et le soutien pérenne de la taxonomie et de l'anatomie qui donnent sens aux séquences produites (voir ci-dessous le paragraphe consacré à l'archivage).

Suivis/observations

Devant l'obligation de répondre aux recommandations et directives internationales (type DCH, DCE, DCSMM) et devant l'importance que prennent les séries d'observations pour répondre à des enjeux de recherche finalisée et fondamentale, comment mettre en place des moyens opérationnels permettant aussi bien des observations à court terme, mais à haute fréquence, que des suivis à long terme et comment apprécier l'efficacité des actions entreprises (suivis) ? Dans ces suivis, la place du biologique reste encore très limitée. Il est urgent que se mettent en place des observatoires de la diversité marine en s'appuyant notamment sur des protocoles dédiés aux observations éco-évolutives et pouvant en outre bénéficier de nouveaux outils omiques (e.g. méta-barcoding et méta-génomique environnementale) en étroite relation avec les stratégies expérimentales en écologie. Plus généralement, la question de l'archivage des données actuelles

et anciennes et de leur valorisation doit être traitée sans délais et il faut se donner les moyens de surmonter la contradiction entre une politique de projets à court terme, et le besoin d'études à long terme, autant qu'anticiper l'intégration de données de différents domaines disciplinaires sur des échelles représentatives des systèmes écologiques pas toujours équivalentes à celles du suivi des masses d'eau.

Ces observations et ces suivis des laboratoires marins adaptés aux problématiques de l'INEE sont nécessaires pour contribuer à la compréhension des effets du réchauffement global en cours, de l'acidification prévue des mers, des variations probables du niveau marin, de l'hypoxie et des changements de la biodiversité sur les écosystèmes. Ils permettent aussi de prendre des décisions concernant leur conservation et leur restauration, tout en permettant la valorisation des biens et services qui leur sont imputables.

L'archivage

La question de l'archivage est double. Elle concerne tout autant l'archivage *in silico* de bases

de données de tous ordres (concernant les habitats, taxons, actions anthropiques, impacts,

indicateurs de vulnérabilité...) que l'archivage physique de spécimens sous différentes formes (types, tissus, ADN). Ce second aspect est souvent peu débattu en regard de l'archivage numérique des données mais est tout aussi important dans le cadre des études à base d'inventaire, de suivi ou rétrospectives où ces spécimens et échantillons servent de référence. Une difficulté attendue est celle des espaces dédiés au stockage, car la place est comptée et les besoins de stockage sont augmentés et diversifiés par des exigences nouvelles en termes de nombre et formes de spécimens à conserver. Contrairement à une première idée assez répandue, une collection n'est pas remplaçable : il ne suffit pas de retourner sur le terrain pour ramener ce qui a été perdu. Une collection est aussi un référentiel de temps : tel échantillon a été trouvé à *tel endroit à tel moment*. Et puis la variabilité des populations, des espèces, des habitats... est telle qu'on ne recapture jamais deux fois la « même » chose. Contrairement à une deuxième idée reçue, une

collection ne doit pas être vue comme statique et improductive, une collection a une vie propre : il faut l'entretenir, l'incrémenter, organiser sa gestion. Ces activités demandent un certain degré d'expertise dans le champ des objets conservés et la description de ces archivages doit faire l'objet du même soin que celui apporté à la genèse des couches de métadonnées. Contrairement à une troisième idée reçue, spécifique à la biodiversité, l'identification moléculaire des organismes n'empêchera pas une érosion des connaissances liée à l'absence de systématiciens (même si des efforts de mise en commun internationale des compétences est un palliatif). Pour qu'un nom attaché à une séquence d'ADN ait une valeur, il faut que ce nom soit lui-même attaché à un spécimen-type validé par un taxonomiste.

Il y a donc lieu de développer et de promouvoir l'interopérabilité et le libre accès à l'abondance et à la variété de plus en plus grande de résultats d'observations et de données concernant les sciences de la mer.

Le développement des laboratoires marins

Bien que représentant une communauté très significative au sein de l'INEE, les unités marines doivent gagner en visibilité tout en développant les synergies nécessaires avec les autres instituts (INSHS, INSU, INSB, INC) / organismes (Ifremer, MNHN). Ces collaborations sont une réalité vécue et revendiquée par la très grande majorité des équipes travaillant sur des questions environnementales, mais qui ressentent sans les comprendre les rivalités pouvant exister entre organismes et/ou instituts. Des solutions devront être proposées et testées (e.g. programmes inter-organismes) pour optimiser du « bas en haut » de l'échelle les collaborations sur un mode gagnant-gagnant.

Structurellement, si l'INSU a « ses » observatoires marins, qui intègrent souvent des unités INEE, l'INEE n'est l'institut de rattachement principal que d'un seul de ces ensembles. Les stations marines, quelles que soient leurs tutelles,

souvent multiples, sont les grands équipements nécessaires à la recherche en écologie marine telle que souhaite le développer l'INEE. La question se pose de la création de nouvelles infrastructures dans ce paysage, mais il est évident que des outils mieux adaptés aux problématiques en écologie marine doivent être mis en place, sous la responsabilité de l'INEE ou en partenariat avec d'autres instituts à l'instar de ce que propose EMBRC-France. Ainsi, les laboratoires marins d'écologie doivent maintenir des passerelles ouvertes vers les thématiques INSB, tant pour travailler sur des espèces (modèles) marines vivantes, à des fins de physiologie, de biologie cellulaire ou de biologie du développement que pour sensibiliser d'autres partenaires à des problématiques écologiques. Cette ouverture, les rendraient encore plus attractifs en les positionnant comme « centres de ressources ».

Les moyens à la mer

Au même titre que pour les communautés scientifiques des autres organismes, les équipes marines de l'INEE ont besoin de pouvoir disposer de moyens (personnels et équipements) d'accès aux écosystèmes marins (plongée scientifique, navires côtiers et hauturiers) et aux déve-

loppements technologiques associés (e.g. ROV, capteurs, enregistreurs...). Les flottes océanographiques françaises hauturières et côtières sont d'ores et déjà largement sollicitées pour des campagnes impliquant des unités INEE. Cette pression devrait encore s'accroître no-

tamment pour des approches pluridisciplinaires permettant d'apporter simultanément des données sur les différentes composantes des systèmes marins et sur leur fonctionnement, mais aussi favorisant le développement de thématiques d'interface entre disciplines.

Compte tenu des pressions croissantes sur les systèmes littoraux et côtiers, il est essentiel

que la recherche en écologie bénéficie d'un accès élargi à ces moyens, indépendamment des missions purement océanographiques de la flotte côtière. La création de l'UMS Flotte Océanographique Française à laquelle l'INEE participe (comité de direction) aux côtés de l'Ifremer, de l'INSU, de l'IPEV et de l'IRD devrait favoriser cette évolution.

Moyens expérimentaux

La question du développement des moyens expérimentaux est récurrente. Les stations marines doivent être équipées de salles d'aquariums alimentées en eau de mer naturelle courante pour l'acclimatation comme pour l'expérimentation dans des conditions strictement contrôlées. Les besoins existent à différentes échelles, du micro au mésocosme, jusqu'aux sites d'expérimentation en écologie qui permettent de centraliser sur un ensemble d'écosystèmes interconnectés des approches expérimentales. Une seule des Stations d'Ecologie Expérimentale de l'institut est exclusivement dédiée à des écosystèmes marins. Elle intègre essentiellement des équipements permettant de traiter de questions relatives aux écosystèmes pélagiques côtiers. La plupart des infrastructures expérimentales en écologie benthique restent à développer, de même que les dispositifs entièrement régulés de type ECOTRON. Des équipements lourds permettant d'instrumenter

des sites naturels, en zone littorale à l'interface terre-mer autant qu'en milieu profond sont plus que jamais indispensables pour étudier la réponse d'écosystèmes modèles aux perturbations. Les moyens les plus coûteux devront être partagés et être attractifs pour la communauté nationale et internationale.

A côté de l'avantage de développer des liens interdisciplinaires (INEE, INSU, INSB), de faire croître la notoriété de ces laboratoires marins grâce à leur positionnement dans d'autres domaines que l'écologie et l'environnement, une telle situation de collaboration permet d'obtenir des matériels, au moins mi-lourds, que des activités exclusivement « écologiques » ne permettraient pas d'avoir. Ce serait aussi le moyen le plus sûr pour ces laboratoires de rejoindre des réseaux internationaux de type « centre de ressources » (Marine Biological Resource Centre), qui seront sollicités pour répondre à des requêtes comme celles qui émaneront de l'IPBES.

Personnels

Des personnels dédiés (observation, suivi et inventaires) sont indispensables. Ces tâches impliquent le maintien de professionnels détenant des capacités d'études sur le terrain ainsi que dans le domaine de l'expertise taxonomique. Elles impliquent aussi le soutien actif du CNRS à de grandes infrastructures comme les collections d'histoire naturelle et les stations marines, dont plusieurs demeurent

ou sont en passe de devenir orphelines d'experts en dépit de leur qualité internationale. Une solution ambitieuse serait de mettre en place, à l'instar de ce qui existe dans le domaine des sciences de l'univers avec le corps des astronomes et physiciens, un corps spécialement affecté aux questions de suivi de la biodiversité et des écosystèmes tant terrestres que marins.