

Fronts de sciences 2019

Conseil scientifique
de la Fondation pour la recherche
sur la biodiversité



Nous tenons à remercier l'ensemble des membres
du Conseil scientifique de la FRB à savoir :

François Sarrazin (Sorbonne université – Président du CS)
Sébastien Barot (IRD – Vice-président du CS)
Luc Abbadie (Sorbonne université)
Cécile Albert (CNRS)
Isabelle Arpin (Sorbonne université)
Anne Charmantier (CNRS)
Sabrina Gaba (Inra)
Nicolas Gaidet-Drapier (Cirad)
Philippe Grandcolas (CNRS)
Philippe Gros (retraité Ifremer)
Jean-François Guégan (Inra - Cirad)
Hervé Jactel (Inra)
Line Le Gall (MNHN)
Philippe Le Prestre (Université Laval)
Harold Levrel (AgroParisTech)
Jean-Louis Morel (Université de Lorraine)
Jean-Louis Pham (IRD - Agropolis Fondation)
Guillaume Sainteny (GS Conseil)
Éric Thybaud (Ineris)
Sarah Vanuxem (Université de Nice Sophia Antipolis)

ainsi que :

Denis Couvet (MNHN)
Olivier Duron (CNRS)
Thierry Heulin (CNRS)
Romain Julliard (MNHN)
Anne-Caroline Prévot (CNRS)
Marc-André Selosse (MNHN)

Direction de la publication : Hélène Soubelet
Coordination éditoriale : Aurélie Delavaud
Coordination artistique : Pauline Coulomb
Conception graphique : François Junot

Crédits photographiques :

Couverture – © Adobe Stock, © IRD / Thibaut Vergoz,
© Alexandra Ter Halle / IMRCP / CNRS Photothèque
Page 6 – © Marine Gabillet
Page 7 – © Marine Gabillet
Page 8 – © IRD / Thibaut Vergoz
Page 10 – © Adobe Stock
Page 12 – © Alexandra Ter Halle / IMRCP / CNRS Photothèque
Page 13 – © Axel Magalon / LCB / CNRS Photothèque
Page 15 – © François Leulier / CNRS Photothèque
Page 16 – © Inge van Halder (Inra)
Page 18 – © Alamy Stock Photo / Marek Stepan

© FRB 2019
ISBN 979-10-91015-39-4

FRONTS DE SCIENCES 2019

Conseil scientifique
de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité



Fronts de sciences 2019

1. Sciences participatives et conservation de la biodiversité : structuration, pratiques, effets..... 6
2. Satellites, mégadonnées et biodiversité marine : vers une quantification de la pression de pêche..... 8
3. Prédire et modéliser la dynamique de la biosphère à larges échelles..... 10
4. Microbiotes, holobiontes et réseaux microbiens : la revanche d'une biodiversité invisible 12
5. Invasions biologiques et biodiversité : prévenir et guérir..... 16
6. Impact des organismes et des écosystèmes sur le climat : comprendre et prédire..... 18

Introduction

Dans le cadre de ses missions de prospective et de conseil stratégique auprès de la FRB, le conseil scientifique a conduit depuis 2016 un travail de réflexion et d'expertise sur les « fronts de sciences » dans le champ de la recherche sur la biodiversité.

Le travail présenté ici fait suite aux fronts de sciences publiés en 2018 et permet de faire le point sur l'évolution du paysage de la recherche depuis les prospectives réalisées par le CS et publiées en 2009 et 2015. Ces deux rapports, qui ont marqué les premières années de la FRB, dressaient un tableau d'ensemble des grands enjeux et chantiers scientifiques dans le domaine de la biodiversité.

Tout en s'inscrivant dans le prolongement de ces travaux structurants, le conseil scientifique souhaite mettre en lumière les évolutions parfois très rapides de la science dans certains domaines. Il s'agit donc d'analyser l'état de la recherche sur certains « fronts de sciences » qui ont émergé depuis, qui ont progressé rapidement, ou qui pourraient prendre de l'ampleur dans les années à venir.

Ce travail, qui se poursuit chaque année, ne prétend ni à l'exhaustivité, ni à orienter les stratégies de recherche. Il vise avant tout à donner un aperçu de quelques sujets en plein développement ou d'enjeux appelant de nouvelles connaissances, ainsi qu'à éclairer l'actualité de la recherche sur la biodiversité pour un public non spécialiste.

Certains des sujets choisis s'inscrivent clairement dans des enjeux et débats de société, mais d'autres relèvent de problématiques conceptuelles et méthodologiques de nature plus fondamentale.

Méthodologie

Les « fronts de sciences », peuvent relever :

- d'un obstacle épistémologique sur lequel bute la recherche actuelle,
- d'une « brèche » en train de s'ouvrir, suite à une avancée conceptuelle ou méthodologique,
- d'un angle mort ou d'un point aveugle, un domaine délaissé ou jamais véritablement exploré.

Les sujets retenus collectivement par les membres du conseil scientifique ont fait l'objet d'une fiche de description courte et standardisée, comprenant une brève bibliographie. Chaque fiche a été préparée par un ou deux membres du conseil avant une relecture par l'ensemble du conseil.

1. Sciences participatives et conservation de la biodiversité : structuration, pratiques, effets



Un participant au programme *Propage*, de VigieNature, qui permet un suivi des populations de papillons de jour par les gestionnaires.

Présentation du sujet

Les sciences participatives (*Citizen science* en anglais) impliquent dans la production scientifique des personnes dont ce n'est pas le métier. Ces sciences sont en plein essor dans le monde entier et dans de nombreux domaines, dont celui de la biodiversité. En cours de structuration et d'institutionnalisation, elles constituent une manière de faire de la science marquée par une grande hétérogénéité, dont la signification, les effets et la portée sont encore difficiles à saisir. Elles font l'objet de débats dans la communauté académique qui étudie la biodiversité, entre promoteurs, convaincus de son utilité scientifique et sociale, et sceptiques voire détracteurs. Ces débats invitent à en faire un objet de recherche, pour analyser

en profondeur : 1/ la diversité des formes qu'elles revêtent, 2/ les pratiques qu'elles recouvrent, 3/ leurs effets sur la biodiversité et sa conservation, comme discipline scientifique et comme pratique, mais aussi sur les trajectoires et les identités professionnelles et personnelles des participants et des promoteurs des programmes et sur la société de manière plus générale.

Nature du front de science

Si la plupart des travaux les concernant mettent en avant leur intérêt ou au contraire leurs limites, l'engouement, les institutions, les discours et les pratiques que les sciences participatives suscitent ont été relativement peu étudiés.

Par ailleurs, elles donnent lieu à une production scientifique dont une part n'est pas publiée dans des revues indexées. Les techniques scientométriques classiques ne suffisent donc pas à les analyser et doivent être complétées par d'autres outils et méthodes d'analyse. Il y a là un verrou méthodologique à lever.

Axes de questionnement

Plusieurs axes de questionnement peuvent être proposés, dont : ❶ Qui sont les acteurs des sciences participatives sur la biodiversité – tant les acteurs académiques qui les promeuvent que ceux, non académiques, qui y participent – et comment sont-ils structurés, spatialement et socialement ? Quels acteurs déjà présents s'en sont saisis, lesquels restent à l'écart et lesquels émergent avec elles ? Comment se caractérisent les programmes de sciences participatives sur la biodiversité du point de vue des déontologies, des pratiques de production, d'analyse, de diffusion et de valorisation des données ? ❷ Quels sont les éléments qui expliquent l'émergence ou la réémergence des sciences participatives ? Parmi les hypothèses à creuser, citons : le contexte de crise socio-écologique ; le contexte d'austérité budgétaire ; la complexité de l'objet étudié et l'urgence qui demandent des méthodes inédites ou en tout cas inhabituelles ; la part de la demande sociale de participation qui embarquerait le chercheur dans ces dynamiques et la part de l'injonction institutionnelle, académique ou politique ; les motivations à la participation à la co-construction

d'un bien commun et les liens aux désengagements démocratiques. ❸ Quel est le potentiel transformateur des programmes de sciences participatives ? Dans quelle mesure modifient-ils la connaissance et la conservation de la biodiversité et la biodiversité elle-même ? Contribuent-ils au développement et à la valorisation des connaissances, des compétences et de la relation à la nature et à la culture scientifique des participants, dans leur diversité ? À quelles conditions peuvent-ils permettre de repenser les rapports entre la société et la nature à travers la mise en capacité d'agir des participants et le rôle des sciences dans ces rapports ? ❹ Comment analyser, de manière critique, une production scientifique peu publiée et difficile à saisir par les méthodes scientométriques classiques ?

Éléments de bibliographie

- HECKER S. *et al.* (2018). *Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy* (1^{re} éd.). Londres, Angleterre: UCL Press. <https://doi.org/10.14324/111.9781787352339>
- HEIGL F. *et al.* (2019). Opinion: Toward an international definition of citizen science. *PNAS* 116(17), 8089-8092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1903393116>.
- STRASSER B. J. *et al.* (2018). «Citizen Science»? Rethinking Science and Public Participation. *Science & Technology Studies*, 32(2), 52-76. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:100156>
- STRASSER B. J. *et al.* (2017). Big data is the answer... But what is the question? *Osiris*, 32, 328-345.



Séance de formation à l'identification des papillons.



Séance de formation à l'identification des papillons.

2. Satellites, mégadonnées et biodiversité marine : vers une quantification de la pression de pêche



Débarque de thon congelé à bord d'un thonier-senseur industriel dans le port de pêche de Victoria aux Seychelles. Toute la pêche est destinée à la mise en boîte dans l'usine Thaï Union de Victoria, l'une des plus grandes du monde.

Présentation du sujet

La pêche est la plus ancienne pression anthropique exercée sur la biodiversité marine. Répondant à l'enjeu global de sécurité alimentaire, la pêche maritime fournit 100 millions de tonnes par an de poissons, crustacés et mollusques pour la consommation humaine.

L'impact le plus connu de la pêche sur la biodiversité est la surexploitation chronique d'un tiers des principaux stocks halieutiques mondiaux. La cause première est établie : de nombreuses flottes de pêche ont la capacité d'exploiter les stocks plus vite qu'ils ne peuvent se reproduire. En faisant obstacle à la préservation des ressources et de la biodiversité marine, en entravant la performance économique et les retombées sociales des activités de pêche, en menaçant la

durabilité de l'approvisionnement en poisson, la crise duale **surcapacité**-surexploitation fragilise le secteur de la pêche, un socio-écosystème complexe.

Le défi – qui mobilise chercheurs, gestionnaires, pêcheurs, ONG et autres parties concernées – est de concilier la **capacité de capture** des flottes avec des critères de viabilité écologique (ajuster le volume des prises au potentiel de renouvellement des stocks, maintenir le « bon état » des populations-cibles et de leurs écosystèmes), tout en considérant : le changement global (demande alimentaire croissante, commerce mondialisé) ; les modifications rapides de l'océan (réchauffement, désoxygénation, acidification, baisse de la production primaire, etc.) ; la variété des réponses adaptatives de la biodiversité marine ; l'appropriation sociale et politique des objectifs de développement durable (ODD)

de l'Agenda 2030 des Nations-Unies (spécialement l'ODD14) ; les choix concertés des mécanismes de la régulation des pêcheries mondiales.

À l'interface entre exploitation et écosystèmes, la « pression de pêche » est un concept-clé qui englobe : d'abord, la « capacité de capture » des flottes, définie par les caractéristiques des navires (*a minima* nombre, tonnage, puissance motrice) et des engins de pêche ; ensuite, la durée du déploiement opérationnel de la capacité, ou « effort de pêche » (effort = capacité × temps de pêche) ; enfin, la capture résultante d'espèces-cibles et non-cibles.

Nature du front de science

Il s'agit d'une avancée méthodologique pour quantifier la pression de pêche. L'objectif est de caractériser, à l'échelle globale, l'activité des navires de pêche en analysant leurs communications avec le transpondeur AIS (*automatic identification system*, dispositif international de sécurité adopté en 2000) ou le système VMS (*vessel monitoring system*). Ainsi, en disséquant à l'aide d'algorithmes d'apprentissage profond le flux massif des messages AIS, l'association *Global Fishing Watch* (GFW) élabore et consolide une base de données publiques à haute résolution des mouvements individuels des navires de pêche. Dès lors, plusieurs équipes de recherche exposent, dans une quinzaine d'articles récents, des éléments de réponse à la question : où, quand, pendant combien de temps chaque navire déploie quel engin de capture, et quelles sont les prises afférentes ?

Axes de questionnement

Une telle avancée vers la quantification géolocalisée de la pression de pêche est décisive pour l'enrichissement substantiel des réponses aux questions qui suivent. ❶ Quelle est l'empreinte écologique de la pêche dans l'océan ? L'enjeu est d'approfondir, de la côte au large, la connaissance des dynamiques couplées de la pression de pêche et de la biocapacité des « espaces productifs ». L'analyse du cycle de vie précisera la contribution spécifique du bilan de carbone à l'empreinte (dépenses d'énergie au cours des étapes de capture, transformation et commercialisation du poisson), ainsi que les performances écologiques et économiques des différentes catégories de navires et engins de pêche. ❷ Comment mieux concilier exploitation et conservation de la biodiversité ? L'analyse conjointe des données satellitaires de télémétrie de la mégafaune marine (poissons, cétagés, oiseaux, tortues) et de l'activité des navires de pêche – accueillant si possible des observateurs à bord – ouvre des perspec-

tives d'optimisation de l'élaboration de réseaux évolutifs d'aires marines protégées (AMP), aussi bien en haute mer que dans les eaux sous juridiction des États côtiers. ❸ Quels atouts pour l'expertise en appui à la puissance publique ? L'accès à l'information de l'activité des flottes offre un moyen efficace de contrôler le respect des restrictions d'usage dans les zones protégées, et au-delà, de lutter contre la pêche illégale (détection des navires et du transbordement en mer des captures illicites). En termes de maintien des pêcheries sur des trajectoires soutenables, connaître l'évolution de l'effort de pêche et des coûts associés, ainsi que des captures (en termes de volume, de valeur et de composition, rejets inclus) est un enjeu crucial.

Éléments de bibliographie

- DUREUIL M. *et al.* (2018). Elevated trawling inside protected areas undermines conservation outcomes in a global fishing hot spot. *Science*, 362, 1403-1407. <https://doi.org/10.1126/science.aau0561>.
- KROODSMA D. A. *et al.* (2018). Tracking the global footprint of fisheries. *Science*, 359, 904-908. <https://doi.org/10.1126/science.aao5646>.
- QUEIROZ N. *et al.* (2019). Global spatial risk assessment of sharks under the footprint of fisheries. *Nature*, 572, 461-466. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1444-4>.
- SALA E. *et al.* (2018). The economics of fishing the high seas. *Science Advances* 4(6). eaat2504. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2504>.
- TACONET M. *et al.* (2019). *Global atlas of AIS-based fishing activity. Challenges and opportunities*. (1^{re} éd.). Italie, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), ISBN: 978-92-5-131964-2

Glossaire

Capacité de capture (ou capacité de pêche) – la quantité de poisson qu'une flotte est capable de pêcher en conditions de ressources données. La capacité d'une flotte englobe le nombre et la taille de ses navires. Le tonnage et la puissance motrice définissent la « capacité nominale ». La « capacité effective », difficile à estimer, inclut aussi : les caractéristiques des engins de pêche et les techniques qui augmentent leur efficacité ; l'électronique embarquée ; les volumes de stockage, congélation ou surgélation, et le traitement à bord des captures ; les bases avancées et les navires d'appui logistique ; l'expérience et la qualification des équipages.

Surcapacité – le principal moteur de la surexploitation, comme l'a clairement illustré en 2006 la « crise du thon rouge » en Méditerranée : la capacité de capture déployée équivalait à trois fois le quota préconisé par les scientifiques pour une exploitation soutenable.

3. Prédire et modéliser la dynamique de la biosphère à larges échelles



Vue depuis l'espace de la forêt amazonienne et du bassin de l'Amazone qui débouche sur l'océan Atlantique. La plus grande forêt pluviale du monde est menacée par la déforestation et le changement climatique. La perte de biodiversité afférente est certaine. Comment prédire le devenir de la biodiversité en combinaison avec le fonctionnement des écosystèmes à une large échelle ?

Présentation du sujet

La modélisation mathématique, statistique et informatique est reconnue comme un outil indispensable en écologie pour synthétiser les connaissances et/ou prédire des trajectoires. La modélisation à petites échelles ou se focalisant sur certains mécanismes ou compartiments de la biodiversité est aujourd'hui bien développée. Cependant, trop peu de modèles cherchent à prédire le devenir de la biodiversité en combinaison avec le fonctionnement des écosystèmes à des échelles larges, des grandes régions mondiales à la biosphère en prenant en compte à la fois des compartiments de

la biodiversité et des mécanismes écologiques très variés. À l'inverse, cette culture de modélisation à grande échelle est très présente dans les sciences du climat qui développent des modèles biogéochimiques de la dynamique de la production primaire continentale (modèles de dynamique de la végétation DGVM) et océanique couplés à des modèles climatiques. Mais, dans ces modèles, la représentation de la biodiversité et des mécanismes écologiques par lesquelles les espèces interagissent entre elles et avec leur environnement physico-chimique est extrêmement simplifiée. Pour les sciences de la biodiversité, développer des modèles à grande échelle spatiale et temporelle correspond à un

triple enjeu : 1/ comprendre comment les dynamiques écologiques observées et modélisées à petites échelles (quelques hectares et quelques dizaines d'années) se répercutent à grandes échelles (de la région à la terre entière, de la centaine d'année à quelques millénaires) ; 2/ explorer les liens entre activités humaines, gestion de la biodiversité, décisions politiques et état de la biodiversité, prédire le devenir de ces interactions sociétés humaines - biosphère, voire évaluer la possibilité d'un effondrement ; 3/ participer à l'amélioration des modèles climatiques en y intégrant mieux la biodiversité et les processus écologiques fondamentaux.

De tels modèles de la biosphère nécessiteront une base écologique solide. Ils devront intégrer une représentation explicite, taxonomique ou fonctionnelle, de la biodiversité et des processus écologiques les plus importants : relations trophiques, recyclage des nutriments, niches écologiques des organismes, impacts du forçage climatique, etc. L'analyse de ces modèles permettra aussi d'évaluer l'influence respective des différents processus et compartiments de la biodiversité sur les variables de sortie étudiées et de déterminer les échelles spatiales à prendre en compte. Selon les questions posées, ces modèles devront aussi prendre en compte, plus ou moins finement, la dynamique des pressions anthropiques (usages des sols, pollutions, etc.) et donc se baser sur des travaux de scénarisation.

Nature du front de science

Ce front de science est lié à des obstacles techniques et méthodologiques. En effet, modéliser la biosphère et sa biodiversité requiert à la fois le développement des modèles eux-mêmes mais aussi la mise au point de méthodes de paramétrisation et de validation de ces modèles qui nécessitent un usage intensif des bases de données de biodiversité – y compris celles incluant toutes les variables décrivant le fonctionnement des écosystèmes (physico-chimiques, grands flux, pressions anthropiques, etc.). Ce front de science correspond aussi à des obstacles épistémologiques : il est nécessaire de faire converger d'une part différents domaines des sciences de la biodiversité – écologie des communautés, écologie des écosystèmes et écologie fonctionnelle – et, d'autre part, les approches de modélisation à grande échelle des sciences du climat. Il s'agit probablement d'une brèche en train de s'ouvrir dans la mesure où des travaux commencent à être développés dans cette direction.

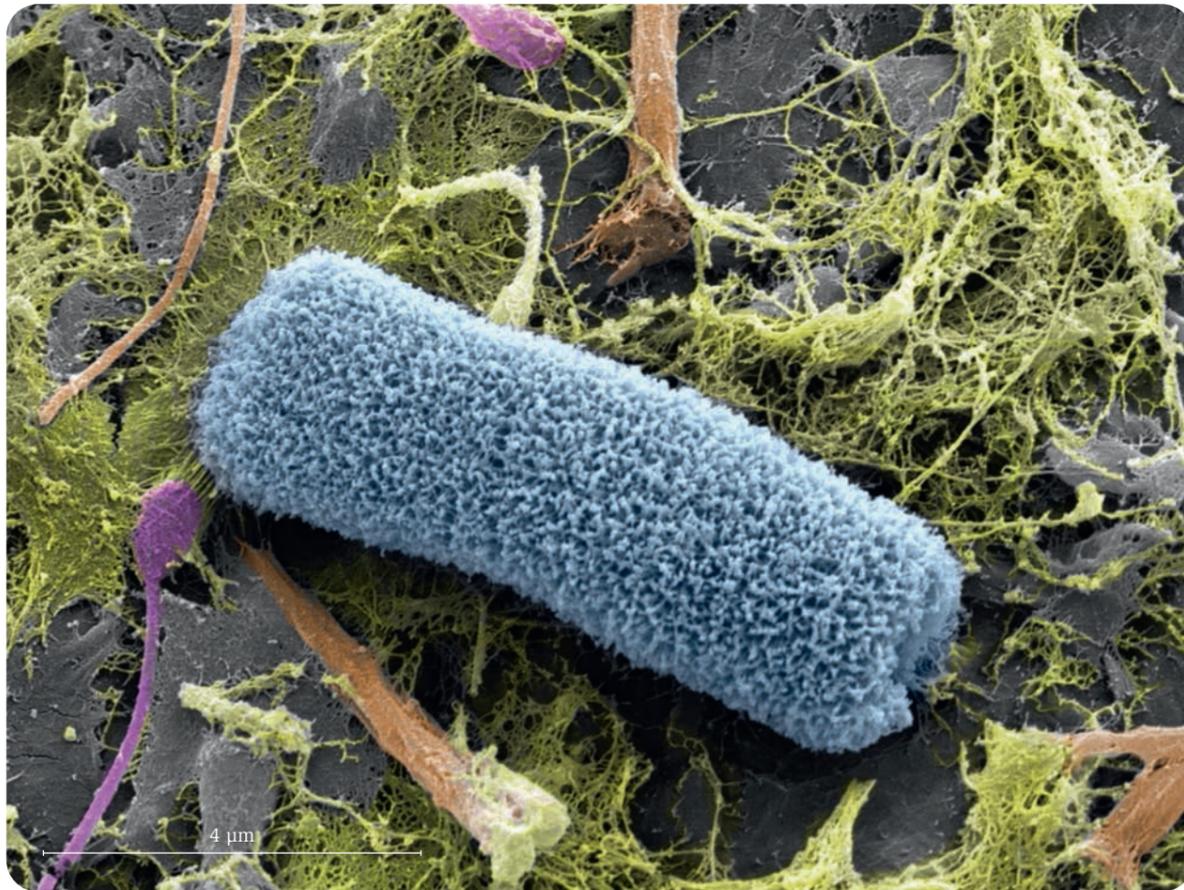
Axes de questionnement

On peut distinguer différents axes de travail liés aux grandes étapes de développement de la modélisation de la dynamique de la biosphère. ❶ Il faut, en particulier, déterminer la façon dont la biodiversité est représentée dans le modèle, par exemple décider des groupes fonctionnels à intégrer. ❷ Il s'agit également de choisir les mécanismes écologiques à appréhender ainsi que la forme des relations à intégrer, notamment lors de la prise en compte d'interactions. ❸ Enfin, il faut mettre au point des méthodes de paramétrisation, de validation et de comparaison de ces modèles. ❹ Cela pose, d'une manière générale, la question des bases de données nécessaires à paramétrer et valider ces modèles, ainsi que la montée en puissance de ces bases de données de biodiversité (de la description des communautés d'organismes aux flux de matière). Ces aspects techniques représentent en eux-mêmes des axes de recherche et impliquent d'accéder à un grand nombre de données, dont la disponibilité ou l'existence peuvent être des facteurs limitants. De nombreuses questions scientifiques pourront alors être en partie traitées grâce à ces modèles.

Éléments de bibliographie

- MOORCROFT P. R. (2006). How close are we to a predictive science of the biosphere? *Trends in Ecology and Evolution* 21, 400-407.
- PURVES D. (2013). Time to model all life on Earth. *Nature*, 493, 295-297.
- HARFOOT M. B. J. *et al.* (2014). Emergent global patterns of ecosystem structure and function from a mechanistic general ecosystem model. *PLoS Biology*, 12(4), e1001841.
- BONAN G. B. *et al.* (2018). Climate, ecosystems, and planetary futures : The challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 359(6375), eaam8328. <https://doi.org/10.1126/science.aam8328>.
- LOTZE H. K. *et al.* (2019). Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. *PNAS*, 116(26), 12907-12912. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900194116>.
- HELLWEGER F. L. (2019). Combining molecular observations and microbial ecosystem modeling: A practical guide. *Annual Review of Marine Science*, 12(1.1-1.23). <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010829>.

4. Microbiotes, holobiontes et réseaux microbiens : la revanche d'une biodiversité invisible !



Microplastique collecté dans l'Atlantique nord, recouvert d'un biofilm (communauté bactérienne se développant sur les débris de plastique, ici en jaune) et d'une bactérie isolée (en bleu). Certains de ces microorganismes pourraient être pathogènes, bénéficier de transports à large échelle et générer des effets en cascade dans la chaîne alimentaire.

Présentation du sujet

Des études récentes montrent le rôle structurant des microorganismes parasites et mutualistes dans l'équilibre et la dynamique des communautés animales et végétales : en leur absence, les macroorganismes ne pourraient probablement pas survivre et, face à leur déclin, les réseaux trophiques se simplifient, les écosystèmes apparaissent beaucoup plus fragiles, moins résilients aux perturbations. Opérant à une autre échelle d'organisation du vivant, les **microbiotes** vi-

raux, bactériens ou fongiques interagissent avec leurs organismes hôtes dans des réseaux d'interactions qui déterminent toutes les fonctions physiologiques. Ce constat pourrait avoir demain des incidences importantes en agriculture dans la compréhension de la dispersion de nouveaux agents infectieux. Les caractéristiques observables des plantes et des animaux résultent presque toutes des microorganismes qui les habitent, ce qui a conduit au concept d'**holobionte**. Aspirer à une compréhension systémique du vivant impose d'étudier non seulement les interactions au

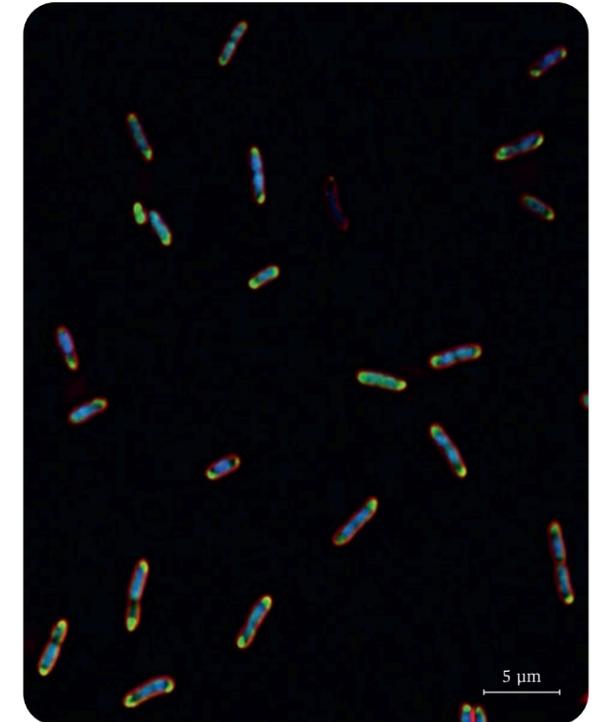
sein du microbiote (notamment par échange de matériels génétiques), mais aussi entre ce microbiote et les organismes hébergeurs. Au-delà, la coexistence entre macroorganismes et microorganismes, au sein de l'holobionte, conduit à de nouvelles interprétations du vivant et de son évolution : plantes, animaux – dont humains – embarquent tous des « passagers » invisibles, et c'est sur ces passagers que s'est appuyée l'évolution de leurs traits morphologiques, physiologiques, immunologiques ou comportementaux. En somme, tous ne forment pas des entités simples et isolées, mais des relations complexes. La biodiversité visible est, elle-même, dépendante d'une biodiversité invisible, démultipliée et interactive. Cela pose de nombreuses questions tant sur le plan fondamental et théorique que sur le plan des champs d'applications tels la santé humaine, l'agriculture et l'agroalimentaire.

Nature du front de science

Ce front de science relève d'une brèche qui s'ouvre à la suite d'une avancée conceptuelle et de nouvelles techniques. Avec l'essor du séquençage d'ADN et d'ARN à haut débit, et la baisse des coûts d'analyse, la recherche actuelle révèle l'extraordinaire diversité microbienne contenue dans les organes des plantes, des animaux et des humains. Auparavant, l'obtention des séquences constituait le goulet d'étranglement, aujourd'hui, c'est le traitement de cette information et la formalisation des questionnements qui limitent le déploiement de cette thématique. Ces études servent, en général, à décrire des espèces ou des groupes microbiens présents (*métabarcoding*). Elle offre la possibilité de découvrir de nouveaux taxa microbiens, « la matière noire » du vivant. Elles interrogent aussi sur la complexité des interactions microorganismes × microorganismes, microorganismes × hôtes et microorganismes × hôtes × environnement, mais révèlent, au final, le manque criant d'équipes aptes à comprendre et interpréter les résultats élaborés issus de ces développements, et à passer au niveau fonctionnel.

Axes de questionnement

Les interfaces entre microbiologie végétale, animale et humaine, physiologie, immunologie et écologie des communautés n'ont jamais été aussi flagrantes, sous un même paradigme qui met les interactions écologiques à la base du fonctionnement de chaque macroorganisme. Ceci offre de nouveaux questionnements de recherche, et positionne l'écologie des communautés et l'écologie fonctionnelle comme piliers fondamentaux de la biologie. ❶ Quels sont les effets



Des chercheurs étudient la bactérie *Escherichia coli* espérant trouver une explication à la manière dont ces bactéries s'adaptent à des environnements variés et changeants tel que celui rencontré par le microbiote intestinal chez l'homme.

des changements environnementaux globaux sur la biodiversité observable, mais aussi sur cette biodiversité invisible? Et quels sont les effets en cascade sur la biodiversité et les grandes fonctions des écosystèmes? Il convient de développer des recherches en micro-, mésocosmes et *in natura* (systèmes micro-insulaires) permettant de comprendre l'évolution de communautés végétales et animales axéniques (dépourvues de germes) et non-axéniques; et, en parallèle, de modéliser sous la forme de scénarios les différentes hypothèses de coexistence et les différentes trajectoires possibles dans le cadre du changement global, en particulier climatique. ❷ Côté santé et sécurité sanitaire : quelles peuvent être les conséquences des pollutions actuelles (métaux lourds, perturbateurs endocriniens, hydrocarbures aromatiques polycycliques, médicaments, phytosanitaires, etc.) des habitats et des écosystèmes sur les dynamiques des microbiotes et des holobiontes animaux, humains ou végétaux, et leur évolution (au sens darwinien)? Quelles seront les nouvelles interrelations établies entre microorganismes symbiotiques, mutualistes et pathogènes, et leurs incidences sanitaires pour les

plantes, les animaux et l'humain? ⑧ Les secteurs agricoles et agroalimentaires sont également concernés: quels rôles jouent les méthodes de pasteurisation et d'asepsie dans l'organisation et les dynamiques des microbiotes et des holobiontes et dans la viabilité des organismes soumis à ces formes de pression – en particulier en agroalimentaire? Quelles sont les relations entre microbiotes et holobiontes végétaux, animaux et humains, et les interdépendances qui existent avec les différents modes d'agriculture et d'élevage, la nutrition animale et humaine, la sélection variétale et animale et ses effets sur la physiologie, la viabilité, la qualité et l'appétence des produits qui en sont issus? De quelles possibilités disposons-nous pour améliorer les relations entre agriculture et biodiversité? ④ Enfin, au niveau social et politique: comment mieux évaluer, notamment *via* les protocoles d'évaluation des méthodes d'inoculation de microorganismes (inoculum microbien pour le sol, probiotiques humains et animaux), en vue d'une réglementation de ces méthodes? Comment faire prendre conscience du rôle de ces interactions écologiques, et comment mobiliser les acteurs publics et privés pour prendre en compte cette « biodiversité invisible » dans les politiques publiques sanitaires, agricoles et environnementales? Comment sensibiliser le monde académique, les décideurs et les citoyens aux enjeux de recherche sur les interactions entre micro et macroorganismes? Quels sont les leviers pour encourager les filières de formation scientifiques, médicales, vétérinaires et agronomiques à ces approches et à cette compréhension?

Éléments de bibliographie

- POUR LA SCIENCE (2016). Le nouveau monde des microbes, Paris, France: Groupe *Pour la Science*, 469, 42 p.
- KIM H. J. *et al.* (2018). Fragile skin microbiomes in megacities are assembled by a predominantly niche-based process. *Science Advances*, 4, e1701581.
- SELBER-HNATIW S. *et al.* (2017). Human Gut Microbiota: Toward an Ecology of Disease. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1265.
- SELOSSE M.-A. (2017). *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations* (1^{re} éd.). France, Actes Sud
- FAURE D. *et al.* (2018). Holobiont: a conceptual framework to explore the eco-evolutionary and functional implications of host-microbiota interactions in all ecosystems. *New Phytologist*, 218, 1321-1324.

Glossaire

Microbiote – Ensemble des microorganismes vivant dans un environnement spécifique (ou microbiome) chez un individu hôte animal, végétal ou humain, une matière ou un produit d'origine animale ou végétale, ou encore un milieu (aérien, aquatique).

Holobionte – Ensemble composé par un organisme animal, humain, ou végétal et les microorganismes qu'il héberge. Les microorganismes habitant l'hôte (animal, humain ou végétal) constituent le microbiote. Voir *Pour La Science* (2016).



Bactérie probiotique *Lactobacillus plantarum* (en bleu), retrouvée dans l'intestin et les fèces d'une femelle drosophile adulte, à la surface de ses œufs fraîchement pondus et dans l'intestin de ses descendants encore au stade larvaire. Après six jours de culture sur un milieu nutritif carencé, les larves colonisées par *Lactobacillus plantarum* (intestins colorés en bleu) sont significativement plus avancées dans leur croissance que les individus de la même fratrie n'ayant pas été colonisés (intestins non colorés). Ces résultats suggèrent que le microbiote intestinal joue un rôle dans le contrôle de la croissance de son hôte.

5. Invasions biologiques et biodiversité : prévenir et guérir



Punaise américaine des pins (*Leptoglossus occidentalis*). Elle a envahi l'ensemble de l'Europe en moins de 15 ans, provoquant de fortes mortalités de cônes et graines de pin.

Présentation du sujet

Longtemps, les invasions biologiques ont été le résultat d'introductions intentionnelles d'organismes exotiques – non indigènes – pour les besoins des humains : chasse, pêche, agriculture, aquaculture, foresterie. Ces espèces se sont répandues, acclimatées, intégrées dans les paysages et l'alimentation, au point que le grand public ignore souvent l'origine exogène du faisan et de la carpe commune, de la tomate et de la pomme de terre, du sapin de Douglas, parmi de nombreux exemples. En Europe, beaucoup de ces importations ont eu des effets bénéfiques pour l'économie mais négatifs pour la biodiversité en réduisant le nombre d'espèces indigènes par effet de compétition ou de substitution, avec un risque de transfert de parasites et de pathogènes.

Les introductions d'espèces exotiques envahissantes sont aussi, et pour la plupart, accidentelles et associées au commerce international. La mondialisation des échanges de biens et produits manufacturés et l'amplification accélérée des moyens de transport (voir les Nouvelles Routes de la Soie) entraînent une augmentation rapide globale des invasions biologiques, sans signe de ralentissement. L'océan n'échappe pas au transfert d'organismes hors de leur aire de répartition naturelle, notamment *via* leur transport dans les eaux de ballast des navires de commerce et l'expansion de l'aquaculture marine.

Les invasions biologiques ont un impact majeur sur la biodiversité indigène et les services écosystémiques. Les conséquences demeurent d'autant moins bien évaluées qu'elles ne sont pas systématiquement néfastes (le phénomène d'hybridation aurait contri-

bué à restaurer une biodiversité après les cinq grandes extinctions en masse). Quant au débat public sur les invasions biologiques, il demeure contaminé par des polémiques d'ordres idéologique et sociologique.

Nature du front de science

Ce front de science est aussi bien épistémique que technologique. Il appelle à des recherches multidisciplinaires – associant écologues, biologistes, physiciens, mathématiciens, économistes, anthropologues, etc. – pour explorer des questions fondamentales et appliquées.

Axes de questionnement

Un premier front de science sur la relation entre biodiversité et invasions biologiques s'impose : ❶ l'analyse approfondie des impacts. D'un point de vue écologique, il s'agit de mieux quantifier les conséquences sur différentes fonctions jusque-là peu étudiées, telles que la pollinisation ou l'activité biologique des sols. D'un point de vue socio-économique, voire anthropologique, il convient de mieux évaluer l'effet des introductions d'organismes exotiques sur les services écosystémiques, au sens large, mais aussi de leur perception par les humains, ainsi que le consentement de ceux-ci à entreprendre des mesures rationnelles de lutte. Ces études devraient nourrir une véritable science de l'analyse du risque invasif.

Selon l'adage qu'il vaut mieux prévenir que guérir, les programmes de lutte contre les invasions biologiques insistent en majorité sur la détection précoce des espèces exotiques afin d'augmenter les chances de succès des programmes d'éradication. ❷ De plus en plus d'organismes invasifs étant introduits *via* le transport de marchandises, de nouveaux capteurs doivent être inventés pour détecter la présence d'organismes vivants exotiques, notamment dans les containers. Les espèces transportées vivantes émettent en effet des signaux chimiques (ex. O₂, CO₂), thermiques (ex. chaleur), olfactifs (ex. composés volatils), ou physiques (ex. stridulation) qui pourraient être identifiés à l'aide de procédés innovants couplant enregistrement automatique et intelligence artificielle.

Cependant toutes les invasions ne pourront être prévenues. Augmenter la résistance des écosystèmes à l'invasion reste donc primordial. Des travaux pionniers – aussi bien théoriques qu'appliqués aux écosystèmes prairiaux – ont montré une corrélation négative entre biodiversité et invasibilité. Les communautés les plus riches en espèces résisteraient mieux à l'implantation d'une espèce exotique (moins de niches écologiques vacantes, régulations trophiques). Pourtant, certaines régions où la biodiversité autochtone est très élevée sont également celles où l'on observe un grand nombre d'espèces exotiques, peut-être en raison d'un effet positif de l'hétérogénéité du milieu sur toutes les espèces, qu'elles soient locales ou exotiques : ❸ des recherches en écologie fondamentale doivent donc être entreprises pour résoudre ce paradoxe : à quelles échelles spatiales opèrent les effets positifs et négatifs de la biodiversité sur la résistance à l'invasion ? Quels sont les processus biotiques et abiotiques impliqués, mais aussi quels sont les effets de la biodiversité sur la résilience aux introductions d'espèces exotiques envahissantes ? D'un point de vue de l'aménagement des espaces cultivés : ❹ quel choix des espèces à associer dans les communautés pour accroître leur résistance aux invasions ? C'est un enjeu majeur, notamment pour les écosystèmes faiblement anthropisés. Ces connaissances sont nécessaires pour faire de la conservation de la biodiversité une méthode de lutte contre les invasions biologiques.

Éléments de bibliographie

- Guo Q. *et al.* (2019). Tree diversity regulates forest pest invasion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 116(15), 7382-7386.
- OJAVEER H. *et al.* (2018). Historical baselines in marine bioinvasions: Implications for policy and management. *PLoS ONE* 13(8), e0202383.
- SEEBENS H. *et al.* (2017). No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nature Communications*, 8, 14435.
- SIMBERLOFF D. *et al.* (2013). Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(1), 58-66.
- TOMASETTO F. *et al.* (2019). Resolving the invasion paradox: pervasive scale and study dependence in the native-alien species richness relationship. *Ecology Letters*.

6. Impact des organismes et des écosystèmes sur le climat : comprendre et prédire



Le changement climatique modifie le fonctionnement global de l'écosystème forestier et influe sur le devenir des arbres, comme c'est le cas dans la sierra de los Filabres (Espagne).

Présentation du sujet

Les organismes subissent les changements globaux et, parmi eux, ceux des changements climatiques (augmentation du CO₂ atmosphérique, eutrophisation des eaux et des sols, réchauffement climatique, etc.) : cela suscite de nombreuses recherches pour connaître et comprendre l'impact de ces changements sur les populations, les communautés d'organismes ou le fonctionnement des écosystèmes. On sait aussi que les écosystèmes influencent le climat en produisant plus ou moins de gaz à effet de serre (tels que méthane CH₄, dioxyde de carbone CO₂, protoxyde d'azote N₂O) ou en stockant une part plus ou moins importante du CO₂ émis par les activités humaines. Les changements

climatiques sont donc influencés par la réponse des écosystèmes aux changements climatiques : cela crée une boucle de rétroaction. Cette boucle n'a jusqu'à présent pas été étudiée systématiquement en prenant en compte des mécanismes écologiques de nature très variée. Il convient d'analyser, en détail, comment les différents aspects des changements globaux impactent la physiologie, la croissance des organismes (par **plasticité phénotypique**) et leur démographie, comment cela modifie les réseaux d'interactions écologiques, les communautés d'organismes et le fonctionnement des écosystèmes, et comment cela rétroagit sur le climat. Ce champ de recherche n'est pas vierge mais, trop souvent, ce type de question n'est pas abordé d'une manière intégrée : par exemple, dans le cas des éco-

systèmes terrestres, la réponse des sols – et des microorganismes – et celle de la végétation sont souvent étudiées de façon séparée. La réponse de la faune du sol n'est pas intégrée, l'impact conjoint de tous ces mécanismes sur le climat n'est que rarement évalué. Un champ de recherche reste aussi complètement ouvert : les changements globaux représentent des pressions de sélection importantes qui conduisent à une évolution darwinienne des organismes ; cela modifie leurs caractéristiques fonctionnelles et donc potentiellement leur rétroaction sur le fonctionnement des écosystèmes et le climat !

Nature du front de science

Ce front de science relève d'un angle mort, d'un domaine insuffisamment exploré. Il est lié à la fois à des obstacles techniques et épistémologiques. Il est pertinent pour tous les types d'écosystèmes, aussi bien terrestres que marins et cela conduit à des recherches de natures différentes (par exemple parce que les producteurs primaires marins sont des organismes unicellulaires alors que ce sont des plantes sur les continents).

Il est possible de décomposer le questionnement en fonction du type de mécanismes sur lequel on se focalise (plasticité des organismes, évolution des organismes, populations, communautés, écosystèmes, etc.) mais la difficulté, à dépasser, reste bien de lier les différents types de mécanismes, d'évaluer leur influence relative sur le fonctionnement des écosystèmes et donc leur rétroaction sur le climat. Cela signifie donc que ce front de science doit être abordé en combinant des observations et suivis de terrain, des expériences et de la modélisation.

Axes de questionnement

Sur le plan épistémologique, augmenter notre capacité à prédire les rétroactions entre biosphère et climat demande un travail mobilisant différents champs de l'écologie – écologie des populations, écologie évolu-

tive, écologie des communautés et des écosystèmes – et de climatologie. Cela demande donc de ❶ développer de nouvelles approches conceptuelles et méthodologiques, de faire travailler ensemble des communautés de chercheurs très différentes. Ensuite, il y a de nombreux obstacles techniques qui touchent, en partie, aux limites mêmes de la science écologique : il faut réussir à ❷ séparer expérimentalement les effets passant par la plasticité et l'évolution des organismes, ceux passant par des changements dans la structure des communautés et ceux relevant des modifications des réseaux d'interactions écologiques. Il faut aussi ❸ parvenir, à partir d'expériences relativement courtes et à petite échelle, à faire des prédictions sur le long terme et à grande échelle spatiale. Enfin, il faut ❹ inclure tous ces résultats dans des modèles climatiques prenant actuellement peu en compte les processus écologiques, et intégrer les boucles de rétroaction dans les modèles écologiques.

Éléments de bibliographie

- BAROT S. *et al.* (2014). Nutrient enrichment and local competition influence the evolution of plant mineralization strategy, a modelling approach. *Journal of Ecology*, 102, 357-366.
- CHAPIN F. S. *et al.* (2008) Changing feedbacks in the climate-biosphere system. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6, 313-320.
- COX P. M. *et al.* (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187.
- FOLEY J. A. *et al.* (2003) Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1, 38-44.

Glossaire

Plasticité phénotypique – capacité d'un organisme à changer son apparence, sa physiologie, sa croissance en fonction des propriétés de son environnement tout en gardant le même génome.

La Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) a pour mission de soutenir et d'agir avec la recherche pour accroître et transférer les connaissances sur la biodiversité. Elle a été créée en 2008 à la suite du Grenelle de l'environnement, à l'initiative des ministères chargés de la recherche et de l'écologie et par huit établissements publics de recherche. Ceux-ci ont été rejoints depuis par LVMH, l'Ineris et l'Université de Montpellier.

L'originalité de la FRB repose sur son rôle d'interface entre la communauté scientifique, la société civile scientifique, la société civile et le monde de l'entreprise.

À ce jour, plus de 240 associations, entreprises, gestionnaires ou collectivités ont rejoint la FRB autour d'un but : relever ensemble les défis scientifiques de la biodiversité.

En 2018, le conseil scientifique de la FRB a proposé pour la première fois ces Fronts de sciences. Ce travail, qui se poursuit chaque année, vise avant tout à donner un aperçu de quelques sujets en plein développement, ainsi qu'à éclairer l'actualité de la recherche sur la biodiversité pour un public non spécialiste.

Certains des sujets choisis s'inscrivent clairement dans des enjeux et débats de société, mais d'autres relèvent de problématiques conceptuelles de nature plus fondamentale. Microbiomes, mégadonnées ou encore sciences participatives sont autant de sujets abordés.



Membres
Fondateurs
de la FRB :

