



Fronts de sciences 2021

Conseil scientifique
de la Fondation pour la recherche
sur la biodiversité



Nous tenons à remercier l'ensemble des membres
du Conseil scientifique (CS) de la Fondation pour la recherche
sur la biodiversité (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)
Didier Bazile (Cirad)
Philippe Billet (Université Lyon 3)
Nathalie Charbonnel (Inrae)
Anne Charmantier (CNRS)
Sabrina Gaba (Inrae)
Philippe Grandcolas (CNRS)
Philippe Gros (retraité Ifremer)
Hervé Jactel (Inrae)
Yann Laurans (ex-Iddri)
Line Le Gall (MNHN)
Harold Levrel (AgroParisTech)
Jean-Louis Morel (Université de Lorraine)
Jean-Louis Pham (IRD - Agropolis Fondation)
Guillaume Sainteny (GS Conseil)
Éric Thybaud (Ineris)

Ainsi que :
Jean-Marc Bonzom, Sylvain Gandon, Hélène Soubelet

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

Crédits photographiques :
Couverture – © Hervé Jactel / Mohamed Abdelghaffar
Page 6 – © Hervé Jactel
Page 11 – © Mohamed Abdelghaffar (pexels)
Page 12 – © Erich Westendarp (Pixabay)
Page 13 – © Anne Charmantier
Page 15 – © Anne Barca (Pexels)
Page 16 – © Stéphane Laurière
Page 17 – © Anne Charmantier
Page 19 – © Enric Cruz López (Pexels)
Page 20 – © Andre Moura (Pexels)
Page 23 – © Justus Menke (Pexels)
Page 24 – © Maurício Uchôa Bruttos (Pixabay)
Page 27 – © Silviarita (Pixabay)

© FRB 2021
ISBN imprimé : 979-10-91015-48-6
ISBN PDF : 979-10-91015-49-3

FRONTS DE SCIENCES 2021

Conseil scientifique
de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité



Fronts de sciences 2021

1. Érosion de la biodiversité des insectes : évaluer et éveiller pour atténuer.....	6
2. Quelle sélection variétale pour la transition agricole et alimentaire ?.....	8
3. Impact des pollutions sur la biodiversité : mesurer, comprendre et prédire.....	12
4. Confinement et recherche sur la biodiversité : impacts et opportunités.....	16
5. Comprendre les processus écologiques, évolutifs et sociaux à l'origine des zoonoses.....	20
6. Émergence de maladies infectieuses : des prédictions théoriques aux tests expérimentaux.....	24

Introduction

Dans le cadre de ses missions de prospective et de conseil stratégique auprès de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (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 2019. Il permet de faire le point sur l'évolution du paysage de la recherche depuis les prospectives réalisées par le Conseil scientifique 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. La pandémie mondiale à laquelle nous faisons face depuis début 2020 a de ce fait particulièrement influé sur cette édition des fronts de science.

Certains des sujets choisis s'inscrivent clairement dans ce type d'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 font 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. Érosion de la biodiversité des insectes : évaluer et éveiller pour atténuer



Présentation du sujet

Les grandes organisations internationales (Ipbès, UICN, etc.) alertent régulièrement l'opinion publique et les décideurs politiques sur l'érosion globale, massive et accélérée de la biodiversité terrestre. Récemment une attention particulière s'est portée sur le déclin de la biodiversité des insectes, avec notamment la parution de numéros spéciaux dans des revues scientifiques prestigieuses. Ce focus s'explique par un triple constat.

Le premier est le rôle éminent joué par les insectes dans le fonctionnement des écosystèmes et la fourniture de services écologiques, comme notamment la pollinisation des plantes cultivées pour l'alimentation humaine, le recyclage de la matière organique pour la fertilité des sols, l'équilibre des réseaux trophiques (par ex. la régulation des ravageurs), la production directe de biens (par ex. la soie ou le miel), ou la bio-inspiration.

Le deuxième élément est que les insectes apparaissent comme un groupe taxonomique emblématique des effets délétères de l'intensification

de la production agricole pour la biodiversité, avec un impact direct des pesticides et indirect du changement d'usage des terres. Les craintes pour la santé humaine rendent les consommateurs particulièrement sensibles à ces arguments, ce qu'indique également la montée en puissance des produits « bio ».

Le troisième constat est que l'exemple des insectes illustre bien la difficulté à quantifier rigoureusement la dynamique globale de la biodiversité à long terme, suscitant doutes et polémiques. Le risque est donc qu'à l'heure où la fiabilité des informations est mise à mal par des publications scientifiques biaisées, par des lobbyistes de l'agro-industrie ou par un usage dévoyé des réseaux sociaux, ces incertitudes sur la réalité du déclin des espèces entraînent l'immobilisme des gestionnaires et des politiques face à un problème pourtant avéré.

Nature du front de science

Les causes de l'érosion de la biodiversité des insectes sont bien cernées en général : dégradation des

habitats, pollutions (notamment par les insecticides), changements climatiques, espèces exotiques envahissantes. Il reste nécessaire d'une part d'en détailler la magnitude et les mécanismes sous-jacents dans différents écosystèmes et pour différents groupes fonctionnels, et d'autre part de mieux comprendre les interactions entre ces différentes pressions. Au-delà de ces aspects, ce qui apparaît d'autant plus urgent est de développer des recherches interdisciplinaires pour disposer de méthodes et données permettant de produire des informations fiables et précises sur l'état et l'évolution de la biodiversité des insectes de manière plus détaillée, afin de disposer de repères indiscutables pour l'aide à la décision. Un enjeu majeur connexe réside dans la compréhension, l'interprétation, l'usage et enfin le partage de ces données de dynamique de la biodiversité, notamment pour un groupe taxonomique mal connu ou mal perçu par le grand public et les décideurs. Le second enjeu est de transmettre les connaissances scientifiques aux décideurs, voire de les impliquer plus concrètement dans les recherches.

Axes de questionnement

1. Le premier axe de recherche devrait concerner l'élaboration d'une stratégie de suivi temporel à moyen ou long terme (plusieurs années) de la biodiversité des insectes, dans des écosystèmes plus ou moins perturbés. En particulier, une réflexion doit être menée sur les métriques de diversité les plus appropriées (par ex. abondance, richesse, diversité génétique, phylogénétique ou fonctionnelle), sur l'intérêt d'indicateurs d'état ou de pression, sur les méthodes d'échantillonnages standardisés. Il conviendrait également de mobiliser les innovations technologiques de recensement (capteurs, imagerie), d'identification (métabarcoding ou ADN environnemental, reconnaissance d'images, intelligence artificielle) et d'analyse de mégadonnées. Ces séries chronologiques bien documentées devraient être utilisées pour évaluer et comprendre la résilience des communautés d'insectes aux grandes perturbations. Elles devraient également bénéficier de la définition de points de référence pour les états antérieurs de la biodiversité, notamment grâce à l'analyse de données muséales.

2. Mais il peut être vain d'accumuler tant d'information si elle n'est pas perçue comme utile ou signifiante par les parties prenantes, du gestionnaire au grand public. Il est en effet frappant de constater que les enjeux de pertes de biodiversité sont moins bien pris en compte que d'autres crises planétaires comme les changements climatiques par exemple.

Or, les interdépendances entre tous les changements globaux ne permettront pas de résoudre uniquement l'un d'entre eux (par ex. le climat), sans se préoccuper des autres (par ex. la perte de biodiversité). Il apparaît donc nécessaire de renforcer les recherches en sciences humaines et sociales (par ex. écologie sociale) pour interroger le rapport de la société avec la biodiversité et en particulier celle des insectes. Ce groupe taxonomique suscite souvent indifférence ou répulsion ; il conviendrait de savoir pourquoi à l'aide de recherches en social-écologie, pour comprendre la diversité des relations entre insectes et humains et comment ces relations sont affectées par les changements en cours mais aussi par l'imaginaire collectif ou l'empreinte socio-culturelle. Il serait également utile de comprendre les mécanismes sous-jacents au consentement à payer ou à se mobiliser pour la biodiversité des Insectes afin d'identifier et lever les obstacles à la prise de décision pour leur conservation (par ex. le travail de Camilla Léandro sur [la mise en lumière de ces verrous majeurs qui freinent la prise en compte efficace d'une part significative de la biodiversité](#), récompensée par la LPO et Eiffage).

Éléments de bibliographie

- Cardoso, P., Barton, P. S., Birkhofer, K., Chichorro, F., Deacon, C., Fartmann, T., Fukushima, C. S., Gaigher, R., Habel, J. C., Hallmann, C. A., Hill, M. J., Hochkirch, A., Kwak, M. L., Mammola, S., Ari Noriega, J., Orfinger, A. B., Pedraza, F., Pryke, J. S., Roque, F. O., Samways, M. J. (2020). Scientists' warning to humanity on insect extinctions. *Biological Conservation*, 242, 108426. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108426>
- Jactel, H., Imler, J. L., Lambrechts, L., Failloux, A. B., Lebreton, J. D., Maho, Y. L., Duplessy, J. C., Cossart, P., Grandcolas, P. (2021). Insect decline : immediate action is needed. *Comptes Rendus. Biologies*, 343(3), 267-293. <https://doi.org/10.5802/crbiol.37>
- Sánchez-Bayo F., & Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna : A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>Seibold
- Seibold S., Gossner M. M., Simons N. K., Blüthgen N., Müller J., Ambarlı D., Linsenmair K. E. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers, *Nature*, 574(7780), 671-674. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3>
- Wagner, D. L. (2020). Insect Declines in the Anthropocene. *Annual Review of Entomology*, 65(1), 457-480. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025151>

2. Quelle sélection variétale pour la transition agricole et alimentaire ?



Sélection variétale - Mélanges de variétés de blé, projet ANR Wheatamix.

Présentation du sujet

La Révolution verte a promu un modèle d'agriculture intensive basé sur la mécanisation et l'usage de semences de variétés végétales sélectionnées pour leurs hauts rendements. Cela a permis d'accroître fortement la production de certaines espèces dans certains systèmes agricoles basés sur un recours important aux pesticides et engrais. Mais son coût écologique, sanitaire et social est avéré.

Ce système agricole et alimentaire doit être repensé pour développer une agriculture durable, émettant moins de gaz à effet de serre, préservant la biodiversité

et la fertilité des sols tout en assurant une alimentation saine et de qualité et des revenus aux agriculteurs. Ces changements devront aussi permettre d'assurer la sécurité alimentaire mondiale. C'est pourquoi, même si la durabilité de l'agriculture passera nécessairement par une diminution du gaspillage alimentaire et de la consommation de viande, compte tenu de la démographie humaine et de la disponibilité en terres arables, ces changements doivent permettre de maintenir des rendements suffisants.

Un des leviers pour une agriculture basée sur les principes de l'agroécologie est la diversification des plantes cultivées au sein de l'agroécosystème. Cette

diversification peut se faire en augmentant le nombre d'espèces cultivées ou le nombre de variétés cultivées à l'échelle de la parcelle, de la succession culturale ou du paysage. La diminution de l'usage des intrants chimiques et l'utilisation d'associations d'espèces ou de variétés passent par la création de nouveaux types variétaux avec des caractéristiques particulières leur permettant d'être performants dans le contexte de ces nouvelles pratiques agricoles. Les variétés actuellement cultivées ont été sélectionnées pour les conditions de l'agriculture à haut niveau d'intrants. Elles ne sont pas nécessairement adaptées dans des conditions de réduction des intrants.

Ainsi, de nouvelles variétés doivent être conçues, en tenant compte des nouvelles conditions agronomique et sociale associées à la mise en œuvre des pratiques agricoles innovantes qui prennent des formes variées (ex. agriculture biologique, agriculture de conservation des sols, agriculture à bas niveau d'intrants). La conception de ses nouvelles variétés doit également assurer une production stable dans un contexte incertain lié aux changements globaux. Par ailleurs, la transition agricole et alimentaire passera par des systèmes agricoles rendant d'autres services écosystémiques que le seul service d'approvisionnement. Ceci nécessite des variétés avec des caractéristiques originales qui n'ont probablement jamais été sélectionnées dans le passé. Enfin, la reterritorialisation de l'économie agricole et alimentaire est une composante forte de la transition. Elle offre la possibilité d'engager les agriculteurs dans le processus de sélection des variétés pour mieux les adapter aux contextes écologiques locaux et à leurs pratiques.

Nature du front de science

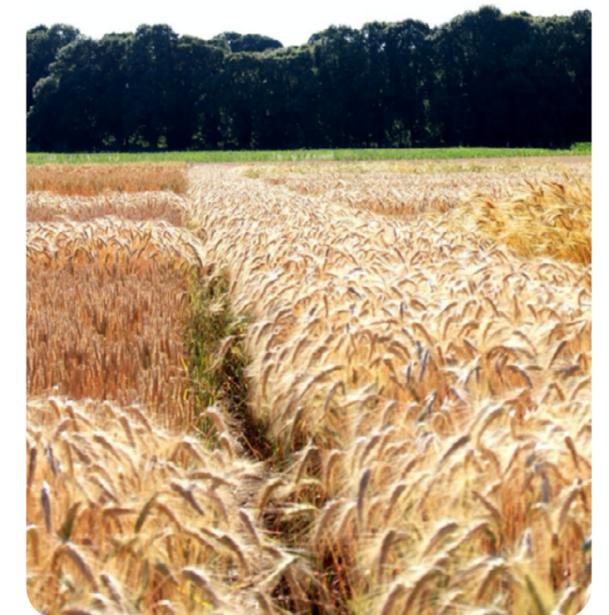
La conception de nouvelles variétés nécessite de répondre au moins à cinq interrogations : Quels critères de sélection ? Quelle structure génétique des variétés ? Quelle diversité mobiliser pour les construire ? Quelles méthodes de sélection utiliser ? Quels acteurs ? Si ces interrogations sont celles qui fondent la sélection variétale en général, les défis spécifiques de la transition agroécologique et alimentaire en font un front de science. Ce front est ouvert depuis une dizaine d'années, mais l'accélération de la perte de biodiversité, l'augmentation de la population humaine, les conséquences du dérèglement climatique accroissent la nécessité de renforcer des recherches de nature transdisciplinaire et devant engager tous les acteurs.

Certaines méthodes éprouvées de sélection restent pertinentes pour atteindre les objectifs de création

variétale, tels que l'adaptation à des bas niveaux d'intrants ou à des stress abiotiques. Ces méthodes ont trouvé des sources de progrès notamment grâce au génotypage-séquençage, au phénotypage à haut-débit et à l'intégration de ces données.

Cependant, des développements conceptuels et méthodologiques sont aussi nécessaires. Ainsi la sélection devra déboucher sur des variétés adaptées à une culture en mélanges variétaux et aux conditions de culture locales. Ces variétés devront également favoriser la fourniture simultanée de services écosystémiques ciblés en assurant des interactions particulièrement favorables avec certains organismes (pollinisateurs, vers de terre, micro-organismes des sols, etc.). Ceci requiert des recherches à l'interface entre écologie fonctionnelle, (éco-)physiologie végétale et génétique. Les nouvelles approches de sélection variétale doivent également s'inscrire dans le cadre de « l'agriculture darwinienne » qui ambitionne de prendre en compte au mieux les connaissances issues des sciences de l'évolution pour les appliquer à l'agriculture.

Enfin, la question de la sélection variétale doit également être étudiée du point de vue de ses implications sociale, politique et économiques. Ces dernières décennies, les agriculteurs ont cessé d'être les acteurs principaux de la création variétale (acteurs qu'ils avaient été pendant des millénaires depuis la domestication) au profit de la recherche publique et surtout de l'industrie semencière.



Axes de questionnement

Ce front de science se décline en 4 axes de recherche principaux :

1. Afin de définir critères et méthodes de sélection variétale, il faut comprendre les mécanismes favorisant :

- les interactions entre biodiversité cultivée et sauvage, en particulier celles à la base de la fourniture de services écosystémiques,
- la productivité et sa stabilité dans une culture en mélange (d'espèces, de variétés ou de génotypes),
- la fourniture de services écosystémiques autre que les services d'approvisionnement.

2. Identifier les sources de matériel génétique permettant d'atteindre les objectifs de sélection présentés ci-dessus. Il est possible que les variétés sélectionnées pour l'agriculture intensive aient perdu une partie de leur capacité à développer des interactions positives avec la biodiversité sauvage, ou à être cultivées en mélange. Il se peut que la diversité nécessaire pour développer ces caractères ait été perdue beaucoup plus tôt dans l'histoire des plantes cultivées, dès la domestication. Des enseignements seront à tirer de l'étude des variétés paysannes encore cultivées en agriculture familiale et des espèces sauvages apparentées aux espèces cultivées. Certaines espèces sous-utilisées ou négligées évoluent au sein d'un pool d'apparentées sauvages et pourront servir de plantes modèles à étudier.

3. Identifier et analyser les compromis (*trade-off*) écologiques et génétiques ainsi que les contraintes agronomiques et sociales contraignant la sélection variétale. Ce dernier point est crucial parce qu'il détermine le champ des possibles. Jusqu'à quel point les variétés sélectionnées peuvent-elles être utilisées dans des contextes variés ? Et inversement, jusqu'à quel point la sélection peut-elle viser le développement de variétés adaptées à un environnement et des systèmes de culture locaux ? Le processus de sélection doit-il produire des variétés capables d'évolution permanente, sous contrôle de la sélection paysanne ?

4. Développer une gamme de méthodologies de sélection variétale pour atteindre les objectifs ci-dessus reposant sur :

- l'implication des agriculteurs dans la co-conception avec les chercheurs des objectifs et critères de sélection variétale ainsi que du processus à mettre en place pour les atteindre,
- la mise au point avec les agriculteurs de matériel génétique à haute diversité génétique permettant de poursuivre leur sélection localement et au sein de réseaux d'agriculteurs.

La mise au point méthodologique impliquera celle de dispositifs participatifs permettant la concertation multi-acteurs et la co-conception des innovations avec les agriculteurs.

Éléments de bibliographie

- Denison, R., Kiers, E., & West, S. (2003). Darwinian Agriculture: When Can Humans Find Solutions Beyond The Reach of Natural Selection? *The Quarterly Review of Biology*, 78(2), 145-168. <https://doi.org/10.1086/374951>
- Lammerts Van Bueren, E. T., Østergård, H., Goldringer, I., & Scholten, O. (2008). Plant breeding for organic and sustainable, low-input agriculture: dealing with genotype–environment interactions. *Euphytica*, 163(3), 321-322. <https://doi.org/10.1007/s10681-008-9731-4>
- Litrico, I., & Violle, C. (2015). Diversity in Plant Breeding: A New Conceptual Framework. *Trends in Plant Science*, 20(10), 604-613. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.07.007>
- McCouch, S. (2004). Diversifying Selection in Plant Breeding. *PLoS Biology*, 2(10), e347. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020347>
- Montazeaud, G., Rousset, F., Fort, F., Violle, C., Fréville, H., & Gandon, S. (2020). Farming plant cooperation in crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1919), 20191290. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1290>
- Østergård, H., Finckh, M. R., Fontaine, L., Goldringer, I., Hoad, S. P., Kristensen, K., Lammerts Van Bueren, E. T., Mascher, F., Munk, L., & Wolfe, M. S. (2009). Time for a shift in crop production: embracing complexity through diversity at all levels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(9), 1439-1445. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3615>
- Rouillé D'Orfeuille, H., Divay, V., & Dupraz, S. (2018). La transition agricole et alimentaire, troisième révolution agricole et revanche des territoires. *Pour*, N° 234–235(2), 245. <https://doi.org/10.3917/pour.234.0245>
- Vincent, H., Wiersema, J., Kell, S., Fielder, H., Dobbie, S., Castañeda-Álvarez, N. P., Guarino, L., Eastwood, R., Leon, B., & Maxted, N. (2013). A prioritized crop wild relative inventory to help underpin global food security. *Biological Conservation*, 167, 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.08.011>



3. Impact des pollutions sur la biodiversité : mesurer, comprendre et prédire



Les pollutions chimiques telles que les pesticides menacent gravement la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes.

Présentation du sujet

Les pollutions menacent gravement la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes et, *in fine*, les biens et services que les humains en retirent. Elles sont très diverses, peuvent être chimique (ex. métaux, pesticides, perturbateurs endocriniens) et physique (ex. sonore, lumineuse, rayonnements ionisants, microplastiques) et affectent l'ensemble des écosystèmes de la Planète (ex. sols, zones humides, rivières, océans, montagnes, zones polaires, déserts, forêts). Les pollutions s'ajoutent aux autres facteurs globaux, qui contribuent aussi au déclin de la biodiversité : destruction des habitats, surexploitation des espèces vivantes, espèces envahissantes et changements climatiques.

Ce sont surtout des événements de pollutions catastrophiques comme les marées noires, l'usage intensif de pesticides ou encore la dispersion de métaux lourds qui ont été à l'origine de la prise de conscience des effets délétères sur la biodiversité

de certaines activités humaines. Plusieurs pays ont depuis mis en place des politiques pour diminuer la pollution environnementale, mais aussi pour mieux évaluer les risques écologiques et sanitaires associés aux polluants.

Pour continuer à éclairer les décideurs chargés des politiques relatives à la biodiversité et au développement durable, mais aussi pour répondre aux questions et aux inquiétudes des citoyens, il faut encore améliorer l'évaluation et la prédiction de l'impact des pollutions sur la biodiversité et, *in fine*, sur les services que l'Homme en retire. Il faut également proposer des critères de protection de l'environnement. En effet, malgré les évolutions réglementaires, les réponses technologiques et les changements de pratiques, la diversité des pollutions et des pressions et la complexité des écosystèmes font que le défi est immense pour appréhender les risques écologiques, par exemple dans le cas des pollutions chimiques chroniques à des niveaux très bas.

Nature du front de science

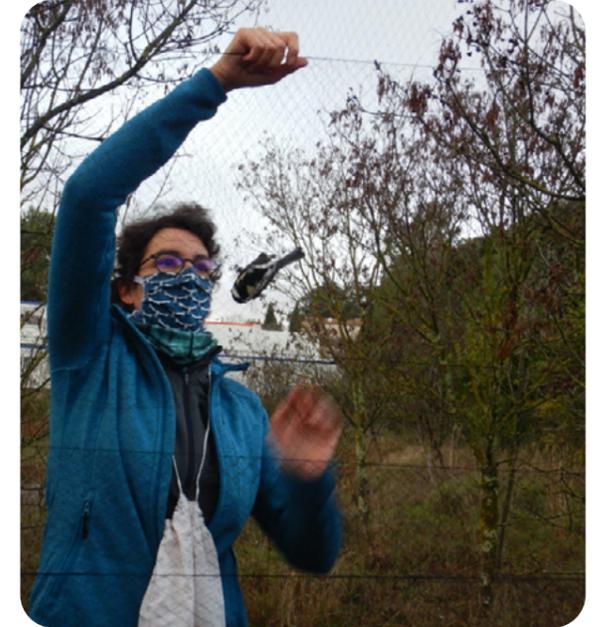
Pour relever le défi : *mesurer, comprendre et prédire l'impact des pollutions sur la biodiversité*, plusieurs obstacles doivent être franchis. Il existe d'abord un obstacle **épistémologique** lié à la nature interdisciplinaire du sujet d'étude (ex. écotoxicologie, toxicologie et chimie environnementale, biogéochimie, écophysiologie, physique, modélisation, écologie moléculaire comportementale, des populations, des communautés, fonctionnelle, évolutive, des paysages, santé humaine, biologie du développement), qui appelle à un renforcement des interactions entre les chercheurs de différents horizons scientifiques.

Ensuite, l'étude de l'impact de pollutions massives sur la biodiversité à différents niveaux des chaînes trophiques a focalisé pour l'essentiel sur les effets écotoxiques des fortes concentrations des polluants. Au contraire, la connaissance de l'écotoxicité chronique, des interactions engendrées par les « cocktails » des **faibles niveaux de pollution** a moins progressé, en raison notamment de la multiplicité des facteurs qui interagissent. Cette lacune amène bien souvent à une vision biaisée de l'incidence des pollutions sur la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes, et sur les santés environnementale et humaine.

De plus, tous les écosystèmes n'ont pas bénéficié de la même attention vis-à-vis des pollutions. Par exemple, si l'impact de certaines pollutions, notamment chimiques, sur de nombreux milieux aquatiques est relativement bien appréhendé, les connaissances sont plus limitées pour l'**environnement terrestre**, notamment pour le sol, la flore et la faune.

Enfin, l'évaluation du risque écologique repose en très grande partie sur des tests mono-spécifiques réalisés au laboratoire dans des conditions standardisées. S'ils constituent une première approche de l'évaluation du danger, ils ne constituent pas un outil suffisamment pertinent pour prédire l'**ensemble des effets d'une pollution sur les écosystèmes**, car le fonctionnement des écosystèmes dépend de processus en œuvre à différents niveaux d'organisation biologique, ceux des individus et les impacts sur la fitness (c'est-à-dire la capacité à se reproduire) des populations, des communautés et de l'écosystème.

Le **front de science** concerne ainsi l'**effet des pollutions chroniques à de faibles niveaux** (ex. non létaux dans un laps de temps relativement court) sur la biodiversité et les différents niveaux d'organisation des écosystèmes, dans un contexte de stress multiples d'origine anthropique (exposome). Les besoins se situent en grande partie au niveau des outils et méthodes d'évaluation des effets des pollutions sur la biodiversité et les écosystèmes. Il demeure enfin de grandes interrogations sur les **seuils « acceptables »** des pollutions dans les écosystèmes.



Confinement 2021 : une chercheuse en écologie démaillant un oiseau.

Axes de questionnement

Plusieurs axes de recherche doivent être suivis et, pour certains, monter en puissance.

1. Comment identifier avec précision les moments de rupture de la stabilité des écosystèmes soumis à une ou plusieurs pollutions ? Comment les changements globaux, en particulier les modifications climatiques vont interférer avec les pollutions et influencer les trajectoires évolutives structurelles et fonctionnelles des écosystèmes ? Peut-on déterminer des valeurs seuils qui garantissent le bon état écologique de tous les écosystèmes ? Autrement dit, comment déterminer les valeurs seuils de pollution qui entraînent des réponses au niveau des populations, des communautés et des processus fonctionnels ? Comment prendre en compte la combinaison des concentrations faibles, de l'état chimique de certains polluants, des mélanges de polluants, des multi-expositions, des changements globaux ?

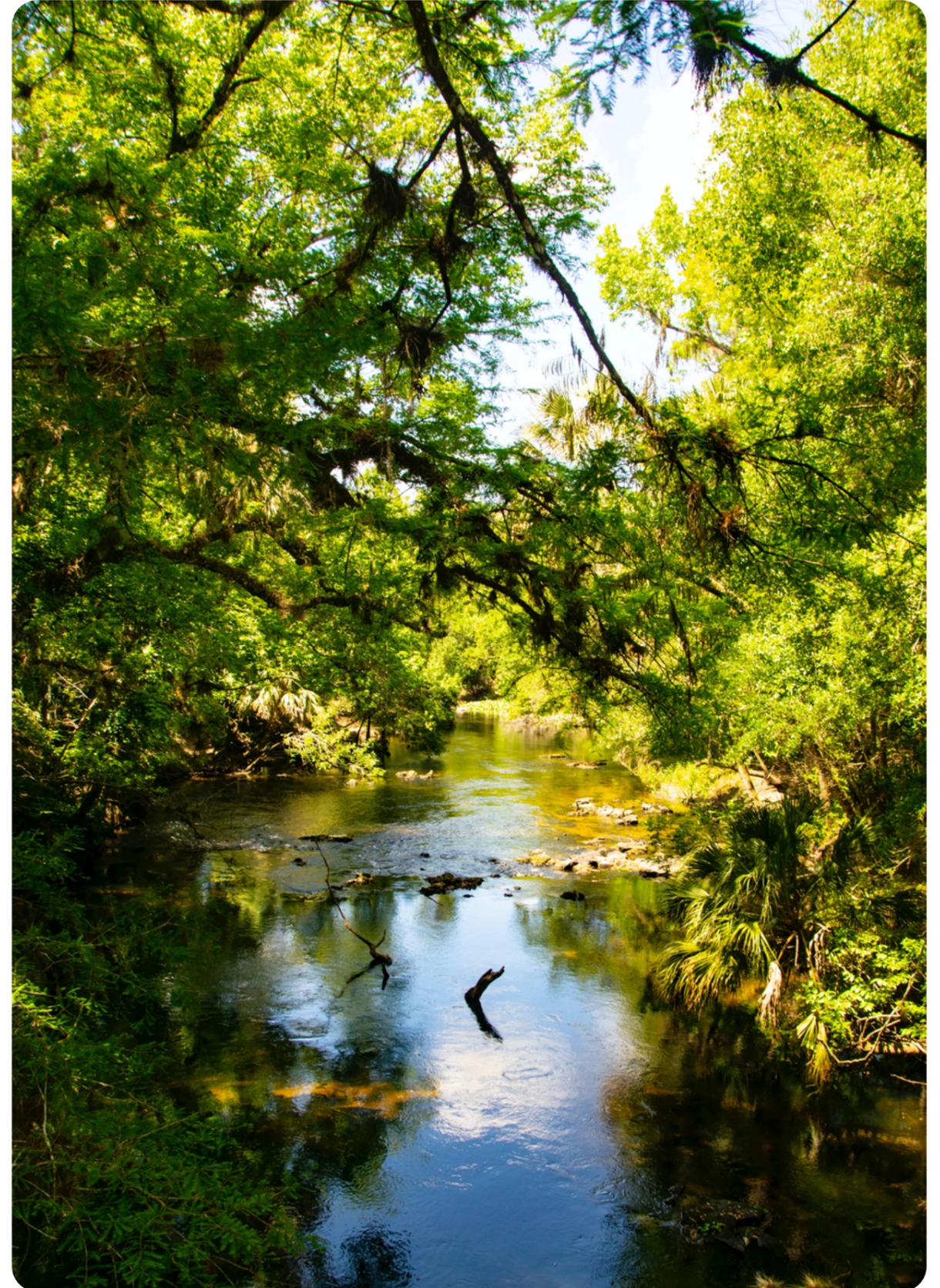
2. Les organismes vivants peuvent avoir un rôle sur le devenir de plusieurs polluants (ex. chimique, microplastiques). Quelles sont alors les contributions des assemblages et successions écologiques sur l'évolution des pollutions et leur toxicité ? Quelles sont les interactions et les boucles de rétroactions spatiales et temporelles en jeu entre les organismes vivants, le devenir et l'écotoxicité de certains polluants ? Les

pollutions peuvent aussi conduire à des phénomènes de résistance et d'adaptation génétique auxquels des coûts sont souvent associés (ex. diminution de la survie, de la fertilité, perte de diversité génétique, modification des réponses immunitaires). Cela peut se traduire, entre autres, par une plus forte vulnérabilité des populations face aux perturbations environnementales, qu'il est nécessaire de prendre en compte dans la démarche d'évaluation des risques écotoxicologiques.

3. Ces questions font nécessairement appel à des recherches interdisciplinaires sur le long terme pour aborder les effets des pollutions dans un contexte environnemental réaliste (ex. écosystème, changement climatique) sur la biodiversité et sur les effets de la biodiversité sur les pollutions (boucles de rétroactions). L'utilisation de zones et de sites ateliers et de dispositifs expérimentaux semi-naturels représentant des situations réelles de pollutions (ex. plateformes expérimentales de type micro- méso-macrocosmes) est une voie prometteuse et efficace à renforcer.

Éléments de bibliographie

- Beketov, M. A., & Liess, M. (2012). Ecotoxicology and macroecology – Time for integration. *Environmental Pollution*, 162, 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.11.011>
- Brady, S. P., Monosson, E., Matson, C. W., & Bickham, J. W. (2017). Evolutionary toxicology: Toward a unified understanding of life's response to toxic chemicals. *Evolutionary Applications*, 10(8), 745-751. <https://doi.org/10.1111/eva.12519>
- Côté, I. M., Darling, E. S., & Brown, C. J. (2016). Interactions among ecosystem stressors and their importance in conservation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1824), 20152592. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.2592>
- European Commission. (2020). *Biodiversity Strategy for 2030 - Bringing nature back into our lives*. <https://urlz.fr/eFPY>
- European Environment Agency. (2019). *The European environment - state and outlook 2020. Knowledge for transition to a sustainable Europe*. <https://www.eea.europa.eu/publications/soer-2020>
- IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*.
- Noyes, P. D., McElwee, M. K., Miller, H. D., Clark, B. W., van Tiem, L. A., Walcott, K. C., Erwin, K. N., & Levin, E. D. (2009). The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. *Environment International*, 35(6), 971-986. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.02.006>
- Rattner, B. A. (2009). History of wildlife toxicology. *Ecotoxicology*, 18(7), 773-783. <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0354-x>



4. Confinement et recherche sur la biodiversité : impacts et opportunités



Confinement 2020 : deux moineaux dans Paris désert

Présentation du sujet

Parmi les néologismes nés de la pandémie liée à la Covid-19, l'anthropause désigne la baisse drastique d'activité et de mobilité humaine durant le confinement, et les conséquences environnementales, sociales et biologiques de cette période exceptionnelle. Les changements soudains dans les niveaux de pollutions (aérienne, sonore, etc.), dans les déplacements et les activités humaines, dans la fréquentation et la gestion des espaces naturels, ont sans nul doute eu des effets sur la biodiversité.

L'anthropause représente une occasion sans précédent d'explorer les liens entre activités humaines et fonctionnement des écosystèmes d'une part, entre politiques publiques et conservation de la biodiversité d'autre part. Par ailleurs, cette situation a aussi souligné les attentes fortes et immédiates de la société civile vis-à-vis de la recherche et mis

en lumière une certaine forme de méconnaissance des sujets et processus de la recherche. Enfin, notre capacité à développer la recherche en temps de crise a été singulièrement mise à l'épreuve.

Dans de nombreux pays, dont la France, le confinement du printemps 2020 a paralysé les recherches scientifiques de terrain s'intéressant à la vie sauvage. Des suivis de terrain de plusieurs décennies ont été interrompus, faute d'autorisation pour les chercheurs de se rendre sur leurs sites d'étude. L'interruption de ces suivis, pour la plupart centrés sur le printemps qui correspond à la saison de reproduction des animaux et au pic végétatif pour bon nombre d'espèces végétales, a entraîné une perte irréversible de connaissances essentielles pour éclairer les politiques publiques et la société, face aux changements rapides des écosystèmes et des services associés. Quelles conséquences ont eues les caractéristiques uniques de ce printemps « silencieux » sur la biodiversité et particulièrement

sur le comportement des animaux, leur distribution ou encore la dynamique des populations ? Malheureusement, peu d'écologues, en France, peuvent apporter des éléments précis à ces questions. Seules quelques études très spécifiques ont pu voir le jour en réalisant des suivis et des mesures depuis le domicile des chercheurs, des naturalistes ou des volontaires (ex. le projet *Silent Cities* qui visait à caractériser les paysages sonores des villes pendant le confinement et lors du déconfinement). La poursuite de la collecte de données dans le cadre de certains projets (en particulier ceux des associations naturalistes) a apporté des éclairages opportuns sur l'impact des activités humaines sur le vivant. Dans la Baie de San Francisco, des chercheurs en écologie comportementale ont montré que la baisse du bruit de fond liée au confinement s'est accompagnée d'une grande flexibilité dans le chant des oiseaux : les bruyants, par exemple, ont retrouvé des fréquences vocales similaires à 1971 et multiplié par deux la portée de leur chant.

Nature du front de science

Ce front de science a une double nature. Tout d'abord l'anthropause associée au confinement offre une « opportunité » scientifique sans précédent pour explorer les effets de la réduction des activités anthropiques sur l'environnement, la biodiversité et sa conservation. Par ailleurs, d'un point de vue épistémologique, cette situation inédite à l'échelle mondiale permet d'analyser notre capacité de conduire la recherche sur la biodiversité en tant de crise et d'imaginer des solutions créatives et collaboratives pour améliorer sa résilience.



Deux chercheuses sur le terrain durant le confinement d'avril 2020.

Axes de questionnement

Les questionnements peuvent se décliner en trois volets selon la nature biologique et/ou épistémologique et sociétaux du front de science.

1. Quels sont les effets du confinement sur la biodiversité et les écosystèmes et comment se distribuent-ils dans l'espace et dans le temps (court-terme vs long-terme) ? Il est probable que la réduction de l'empreinte humaine sur certains environnements affecte de manière très rapide la croissance des organismes, les comportements des animaux, leur territorialité, leur reproduction, avec des conséquences à plus long terme sur la dynamique de ces populations et des écosystèmes. Dans certains milieux comme la ville, les suivis de la biodiversité effectués pendant le confinement pourraient permettre d'évaluer l'impact des facteurs qui ont été modifiés (en particulier perturbations liées à la présence d'humain, et aussi pollutions aérienne et sonore) par rapport aux facteurs d'artificialité qui sont restés identiques (ex. sol imperméable, fragmentation des habitats et pollution lumineuse). À l'inverse, dans certains espaces protégés, l'arrêt ou la relâche des mesures de protection liés au confinement pourraient permettre d'analyser la dynamique d'espèces envahissantes en l'absence de gestion et la conséquence de leurs proliférations sur les espèces natives.

2. Quels sont les effets du confinement sur la recherche sur la biodiversité ? Quelle priorité donner à cette recherche ? Comment maintenir pendant une telle période des études de terrain qui permettent de mieux comprendre les interactions entre les activités humaines et la biodiversité ? Comment réorganiser des programmes de recherche collaboratifs lorsque ces études de terrain ne sont plus possibles ? Comment maintenir une formation et des échanges scientifiques de qualité en écologie et en sciences de la conservation ?

3. Quels sont les effets du confinement sur les rapports de nos sociétés à la biodiversité ? Ces effets apparaissent complexes et contrastés : ont été notées une attention accrue à une faune devenue plus visible et plus audible ainsi qu'une prise de conscience de l'appartenance de l'humanité à une communauté de vivants. Simultanément, il a pu être observé une suspicion à l'encontre d'espèces sauvages accusées d'être à l'origine de la pandémie et des comportements destructeurs dans certains espaces protégés lors du déconfinement à la fin du printemps 2020. Seule une enquête à grande échelle permettrait de mieux connaître l'importance relative et la distribution de ces effets en fonction des territoires et des caractéristiques socio-économiques des acteurs.

Éléments de bibliographie

• Bang, A., & Khadakkar, S. (2020). Opinion: Biodiversity conservation during a global crisis: Consequences and the way forward. *PNAS*, 117(48), 29995-29999. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021460117>

• Bates, A. E., Primack, R. B., Moraga, P., & Duarte, C. M. (2020). COVID-19 pandemic and associated lockdown as a “Global Human Confinement Experiment” to investigate biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 248, 108665. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108665>

• Derryberry, E. P., Phillips, J. N., Derryberry, G. E., Blum, M. J., & Luther, D. (2020). Singing in a silent spring : Birds respond to a half-century soundscape reversion during the COVID-19 shutdown. *Science*, 370(6516), 575-579. <https://doi.org/10.1126/science.abd5777>

• Forti, L. R., Japyassú, H. F., Bosch, J., & Szabo, J. K. (2020). Ecological inheritance for a post COVID-19 world. *Biodiversity and Conservation*, 29(11-12), 3491-3494. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02036-z>

• Manenti, R., Mori, E., di Canio, V., Mercurio, S., Picone, M., Caffi, M., Brambilla, M., Ficetola, G. F., & Rubolini, D. (2020). The good, the bad and the ugly of COVID-19 lockdown effects on wildlife conservation: Insights from the first European locked down country. *Biological Conservation*, 249, 108728. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108728>

• Rutz, C., Loretto, M. C., Bates, A. E., Davidson, S. C., Duarte, C. M., Jetz, W., Johnson, M., Kato, A., Kays, R., Mueller, T., Primack, R. B., Ropert-Coudert, Y., Tucker, M. A., Wikelski, M., & Cagnacci, F. (2020). COVID-19 lockdown allows researchers to quantify the effects of human activity on wildlife. *Nature Ecology & Evolution*, 4(9), 1156-1159. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1237-z>



5. Comprendre les processus écologiques, évolutifs et sociaux à l'origine des zoonoses



Présentation du sujet

Le nombre d'épisodes épidémiques ne cesse d'augmenter depuis cinquante ans. Parmi les agents infectieux responsables de ces épidémies, certains, d'origine animale, entraînent des épidémies chez l'humain. On parle alors de zoonoses. La crise sanitaire de la Covid-19 a été l'occasion de mettre en avant les recherches sur ces zoonoses et l'analyse des causes profondes de leurs émergences.

Les liens entre biodiversité et zoonoses sont complexes. Par exemple, il est établi que le risque d'émergence zoonotique est important dans les régions de forêts tropicales, présentant une diversité élevée de mammifères, car celle-ci est elle-même associée à une forte diversité de micro-organismes (pathogènes ou non). Il est également démontré que l'accroissement du risque zoonotique est lié à l'érosion de la biodiversité induite par les pressions anthropiques. Pour ces régions à forte biodiversité, le risque zoonotique est modulé par différents facteurs anthropiques (destruction et fragmentation des

habitats, en particulier forestiers), pollutions, stress affectant les processus écologiques (réduction des régulations biologiques par prédation ou compétition), épidémiologiques (effets de dilution/amplification associés à la perturbation/réorganisation des communautés d'hôtes), évolutifs (rupture des liens co-évolutifs entre hôtes et pathogènes, érosion de la diversité génétique des populations et diminution du potentiel adaptatif face à de nouvelles infections) et sociaux (changements comportementaux, espèces sauvages synanthropiques c'est-à-dire vivant aux côtés des humains).

Des consensus se dégagent sur ces éléments mais les mécanismes liant les niveaux de diversité des hôtes, des micro-organismes dont les pathogènes, la prévalence de ceux-ci chez leurs hôtes et les risques de zoonoses doivent être étudiés plus en détails. Des connaissances restent donc à acquérir pour évaluer les conséquences, et en particulier les bénéfices, sanitaires de différentes stratégies de protection de la biodiversité sur les risques et les dynamiques des zoonoses.

Nature du front de science

Ce front de science relève à la fois d'**angles morts et des verrous méthodologiques**.

La prévention des épidémies, en particulier dans leur stade précoce, reste la solution la moins onéreuse humainement, socialement et économiquement. Suite à la pandémie de Sars-Cov2 en 2020, de nombreux travaux de recherche (travaux empiriques et méta-analyses) ont pu être relancés sur ce sujet. Cependant, certains domaines restent insuffisamment explorés et demeurent des **angles morts**. Il est donc nécessaire d'identifier les défis scientifiques posés par la caractérisation des déterminants favorables à l'émergence et les facteurs de l'environnement nécessaires pour son activation afin d'appuyer la détection précoce des émergences. Celles-ci doivent se baser sur :

i) une meilleure connaissance de la diversité des agents microbiens de la faune sauvage, des hôtes ou réseaux d'hôtes, et des mécanismes et facteurs impliqués dans le caractère pathogène de ces agents (y compris l'évolution vers des « variants » ayant une capacité d'infection de l'humain et de transmission entre humains) ;

ii) la surveillance des événements d'émergence de zoonoses et les caractéristiques de sa propagation ainsi que l'écologie des interactions et les dynamiques en jeu pour mieux aborder la complexité sous l'angle de la santé globale/planétaire ;

iii) l'analyse des liens entre biodiversité (richesse spécifique et diversité génétique) et risque zoonotique chez les vertébrés. Des analyses combinant les descripteurs de la biodiversité (ex. richesse, équitabilité, diversité fonctionnelle) et de la diversité génétique permettraient d'évaluer, dans des contextes diversifiés, l'hypothèse de l'effet dilution selon laquelle la propagation des agents pathogènes serait plus faible lorsque la diversité d'espèces hôtes est élevée ;

iv) le couplage des modèles climatiques, d'usage des sols et de dynamiques épidémiologiques des maladies zoonotiques permettrait d'appréhender la complexité des interactions entre l'humain et son environnement (incluant la biodiversité) tout en tenant compte des actions de gestion et des changements climatiques ;

v) l'évaluation de la vulnérabilité des populations humaines pour déterminer les caractéristiques des différents niveaux de sensibilité aux maladies zoonotiques de nature génétique, comportementale

(ex. induite par un mode de vie) ou environnementale (ex. lieu de vie). Les liens entre la diversité des différents microbiomes et la vulnérabilité humaine méritent d'être mieux compris.

Le **verrou méthodologique** le plus important réside dans la capacité de la communauté scientifique à mobiliser des études de cas dans lesquelles il sera possible de discriminer l'importance des différents facteurs de causalité, entre changements environnementaux globaux, perte de biodiversité et de services de régulation associés.

Au plan épistémologique, il est important de bien signaler la différence entre la notion de risque et de danger. Le risque infectieux est défini par trois composantes majeures : le danger, l'exposition et la vulnérabilité des populations. Aujourd'hui encore, les cartes de risques, ayant pour ambition de concourir à la prévention des épidémies, sont en réalité des cartes répertoriant les dangers ; cette situation doit donc être clarifiée afin de distinguer clairement entre les deux notions pour conduire une politique de prévention appropriée.

Enfin, parallèlement à l'acquisition de ces connaissances, il reste à conduire un important travail de pédagogie pour faire comprendre qu'une biodiversité élevée augmente le danger microbiologique (et la probabilité d'émergence), mais pas nécessairement le risque infectieux (et donc le phénomène épidémique).

Axes de questionnement

1. Afin de mieux prévoir l'émergence et la réémergence des zoonoses, il est nécessaire de **continuer à explorer les processus écologiques, évolutifs et socioéconomiques** à l'origine de l'émergence des maladies, en lien avec l'érosion de la biodiversité et dans un cadre EcoHealth tenant compte des interrelations entre compartiments animaux / micro-organismes / environnement / populations humaines.

2. Par ailleurs, une **meilleure compréhension des effets relatifs des différents facteurs de risques et de leurs interactions**, reste indispensable. Parmi ces principaux facteurs, l'influence des changements climatiques, des changements d'usage des sols (urbanisation, déforestation et intensification agricole, animale et végétale), et des contraintes socio-économiques (économie de la viande de brousse ou nouveaux animaux de compagnie, pratiques de lutte anti-vectorielle ou dératisation) devraient être analysées prioritairement. À terme, il serait intéressant d'établir des modèles prédictifs

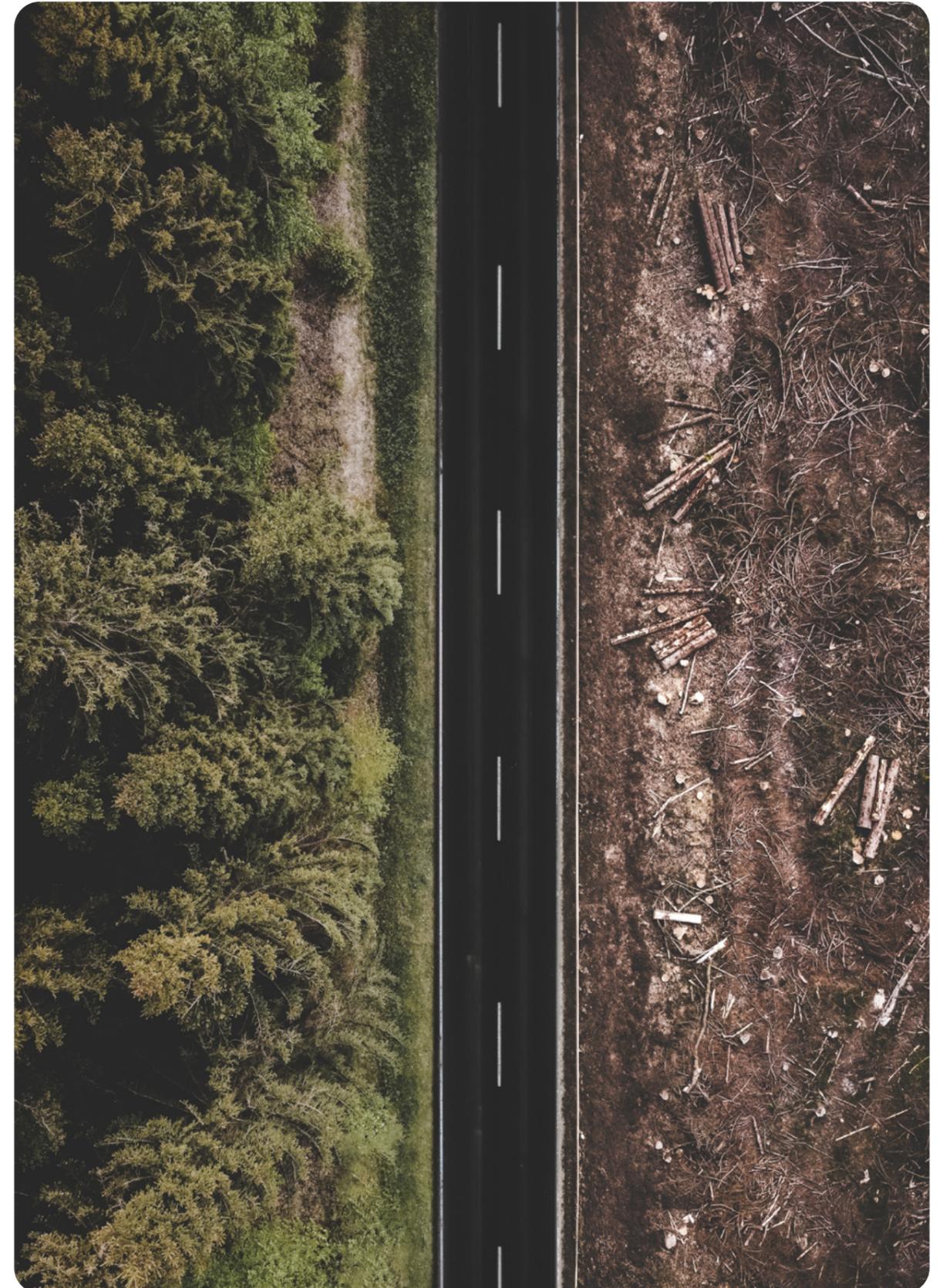
du danger zoonotique et du risque d'émergence, permettant de tester des scénarios de protection de la diversité par exemple. Quantifier la balance « coûts-bénéfices sanitaires » de la mise en place de différents types d'aires protégées pour les comparer à d'autres modes d'interventions en matière de santé publique, ou caractériser le service écosystémique de régulation des maladies infectieuses rendu par ces aires protégées apporterait de solides arguments en faveur des co-bénéfices entre la protection de la biodiversité et la santé.

3. Mieux comprendre les relations complexes et très diversifiées que les humains entretiennent avec la faune sauvage, en fonction de leur localisation, de leur culture et de leurs traditions permettra de mieux adapter la prévention des risques (ex. apprivoisement d'espèces sauvages, consommation des mêmes fruits domestiques et/ou sauvages, habitats partagés permettant la transmission par contacts avec des fluides corporels et excréta). Les travaux en anthropologie, sociologie et économie de la santé et en sciences politiques sur l'organisation des systèmes de santé (surveillance, soins, etc.) doivent être promus, notamment par des études comparatives pluridisciplinaires et plurisectorielles.

Éléments de bibliographie

- Allen, T., Murray, K. A., Zambrana-Torrel, C., Morse, S. S., Rondinini, C., di Marco, M., Breit, N., Olival, K. J., & Daszak, P. (2017). Global hotspots and correlates of emerging zoonotic diseases. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00923-8>
- Cunningham, A. A., Daszak, P., & Wood, J. L. N. (2017). One Health, emerging infectious diseases and wildlife: two decades of progress? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1725), 20160167. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0167>
- Daszak, P., Olival, K. J., & Li, H. (2020). A strategy to prevent future epidemics similar to the 2019-nCoV outbreak. *Biosafety and Health*, 2(1), 6-8. <https://doi.org/10.1016/j.bsheal.2020.01.003>
- Gibb, R., Redding, D. W., Chin, K. Q., Donnelly, C. A., Blackburn, T. M., Newbold, T., & Jones, K. E. (2020). Zoonotic host diversity increases in human-dominated ecosystems. *Nature*, 584(7821), 398-402. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2562-8>

- Guégan, J. F., Ayoub, A., Cappelle, J., & de Thoisy, B. (2020). Forests and emerging infectious diseases: unleashing the beast within. *Environmental Research Letters*, 15(8), 083007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8dd7>
- Halliday, F. W., Rohr, J. R., & Laine, A. (2020). Biodiversity loss underlies the dilution effect of biodiversity. *Ecology Letters*, 23(11), 1611-1622. <https://doi.org/10.1111/ele.13590>
- Hosseini, P. R., Mills, J. N., Prieur-Richard, A. H., Ezenwa, V. O., Bailly, X., Rizzoli, A., Suzán, G., Vittecoq, M., García-Peña, G. E., Daszak, P., Guégan, J. F., & Roche, B. (2017). Does the impact of biodiversity differ between emerging and endemic pathogens? The need to separate the concepts of hazard and risk. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1722), 20160129. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0129>
- Jørgensen, P. S., Folke, C., & Carroll, S. P. (2019). Evolution in the Anthropocene: Informing Governance and Policy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50(1), 527-546. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024621>
- Morand, S., & Figuié, M. (2018). Emergence of infectious diseases: Risks and issues for societies (1^{re} éd.). *Quae*.
- Narat, V., Alcayna-Stevens, L., Rupp, S., & Giles-Vernick, T. (2017). Rethinking Human-Nonhuman Primate Contact and Pathogenic Disease Spillover. *EcoHealth*, 14(4), 840-850. <https://doi.org/10.1007/s10393-017-1283-4>
- Rohr, J. R., Civitello, D. J., Halliday, F. W., Hudson, P. J., Lafferty, K. D., Wood, C. L., & Mordecai, E. A. (2019). Towards common ground in the biodiversity-disease debate. *Nature Ecology & Evolution*, 4(1), 24-33. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1060-6>
- Sandifer, P. A., Sutton-Grier, A. E., & Ward, B. P. (2015). Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation. *Ecosystem Services*, 12, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.12.007>



6. Émergence de maladies infectieuses : des prédictions théoriques aux tests expérimentaux



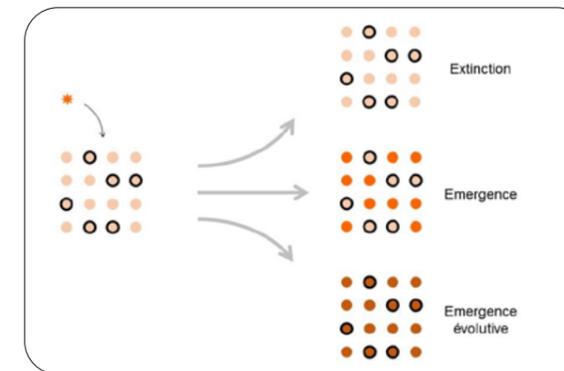
Présentation du sujet

La pandémie mondiale qui a engendré en 2020-2021 une crise sanitaire d'ampleur exceptionnelle est liée à la Covid-19, maladie infectieuse émergente apparue en novembre 2019 en Chine continentale. Cette crise nous a fait (re)prendre conscience que l'apparition et la propagation de nouveaux pathogènes est un problème majeur de santé publique. Problème qui peut, quand ces émergences affectent les plantes cultivées ou les animaux d'élevage, également menacer notre agriculture. Il est donc urgent de comprendre les facteurs qui favorisent ces émergences. Les modèles mathématiques prenant en compte l'épidémiologie et l'évolution des pathogènes peuvent nous aider à les étudier, mais il est souvent difficile de tester la validité des prédictions théoriques issues de ces travaux. Les études expérimentales s'appuyant sur des modèles biologiques microbiens permettent d'en tester le pouvoir prédictif : cette validation expérimentale est cruciale, car elle peut concourir à améliorer la théorie et ainsi à affiner les prédictions qui sont au cœur des stratégies de contrôle des maladies infectieuses.

Existe-t-il des conditions permettant de limiter le risque d'émergence ? Pour répondre à cette question il est essentiel de comprendre qu'une émergence résulte d'un processus stochastique, c'est-à-dire où le hasard joue un grand rôle. En effet, au tout début d'une épidémie, le nombre d'hôtes infectés est très faible et le risque d'extinction de la population de pathogènes est très important. Par exemple, dans les modèles les plus simples, la probabilité d'extinction d'un pathogène avec un taux de reproduction, R_0 , positif ($R_0 > 1$) est de $1/R_0$ quand on introduit un hôte infecté par ce pathogène dans une grande population. On s'attend donc à ce que, même s'il a un $R_0 > 1$, le nouveau pathogène n'arrive pas à émerger. Ensuite, la mutation du pathogène est un autre processus aléatoire qui peut influencer son adaptation à une nouvelle espèce d'hôte. L'acquisition de mutations adaptatives devrait permettre d'augmenter le taux de reproduction, R_0 , du pathogène, de diminuer le risque d'extinction initiale et donc d'augmenter la probabilité d'une émergence. On parle d'émergence évolutive quand c'est cette adaptation par mutation qui permet au pathogène d'échapper à l'extinction et d'engendrer une épidémie dans la population de ce nouvel hôte. Ainsi, prédire l'émergence de

nouveaux pathogènes nécessite de comprendre à la fois l'épidémiologie des maladies et leur évolution.

Ces prédictions théoriques ont besoin d'être validées expérimentalement pour pouvoir être révisées et gagner en précision. C'est par exemple la validation expérimentale qui a permis aux prédictions météorologiques de devenir si performantes. L'objectif est donc de générer un cadre théorique validé expérimentalement qui peut être utilisé pour faire des recommandations sur la gestion du risque d'émergence sur des systèmes sur lesquels il est impossible d'expérimenter. En effet, la nature stochastique des processus nécessite un grand nombre de répliques (par exemple pour évaluer une probabilité d'émergence), mais aussi un grand nombre de générations de pathogènes. Les modèles microbiens comme les bactériophages (virus infectant les bactéries) permettent de tester les prédictions sur l'influence de la diversité de la résistance des hôtes sur le risque d'émergence.



Émergence et émergence évolutive d'un pathogène dans une population d'hôte hétérogène.

L'introduction d'un pathogène (virus orange) dans une population composée d'un mélange d'hôtes sensibles (disques sans contour) et d'hôtes résistants (disques avec un contour noir) peut avoir trois issues : (1) l'extinction de l'épidémie, (2) l'émergence avec une épidémie de la souche ancestrale (en orange) touchant les hôtes sensibles, (3) l'émergence évolutive d'une nouvelle forme de la maladie (en marron) avec une épidémie touchant l'ensemble de la population suite à l'acquisition de mutations permettant de contourner la résistance des hôtes.

Nature du front de science

Ce front de science repose sur une approche qui tente de faire le lien entre (1) des développements théoriques récents afin de mieux comprendre la dynamique stochastique des pathogènes et (2) des

tests expérimentaux basés sur l'utilisation de modèles biologiques microbiens permettant de tester et donc de valider (ou réviser) ces prédictions théoriques. L'objectif est de prendre en compte de nombreuses composantes de l'écologie des maladies infectieuses (stochasticité démographique, environnementale, structure en âge, structure des communautés d'hôtes, dynamique intra-hôte, plasticité, etc.) pour mieux prédire les dynamiques et donc les risques épidémiques (émergences, évolution de la virulence et de la résistance aux médicaments et aux vaccins).

Axes de questionnement

Comprendre les facteurs influençant l'émergence de pathogènes nécessitera une interface entre des approches théoriques et expérimentales et entre des domaines variés, en particulier les mathématiques, l'épidémiologie, l'écologie et l'évolution. Les quatre pistes proposées ici ne sont qu'un aperçu de la grande diversité d'approches possibles.

1. L'analyse du comportement des modèles stochastiques soulève de nombreuses difficultés mathématiques qu'il faut résoudre. Améliorer notre compréhension de ces modèles passe également par une collaboration étroite entre biologistes et mathématiciens.

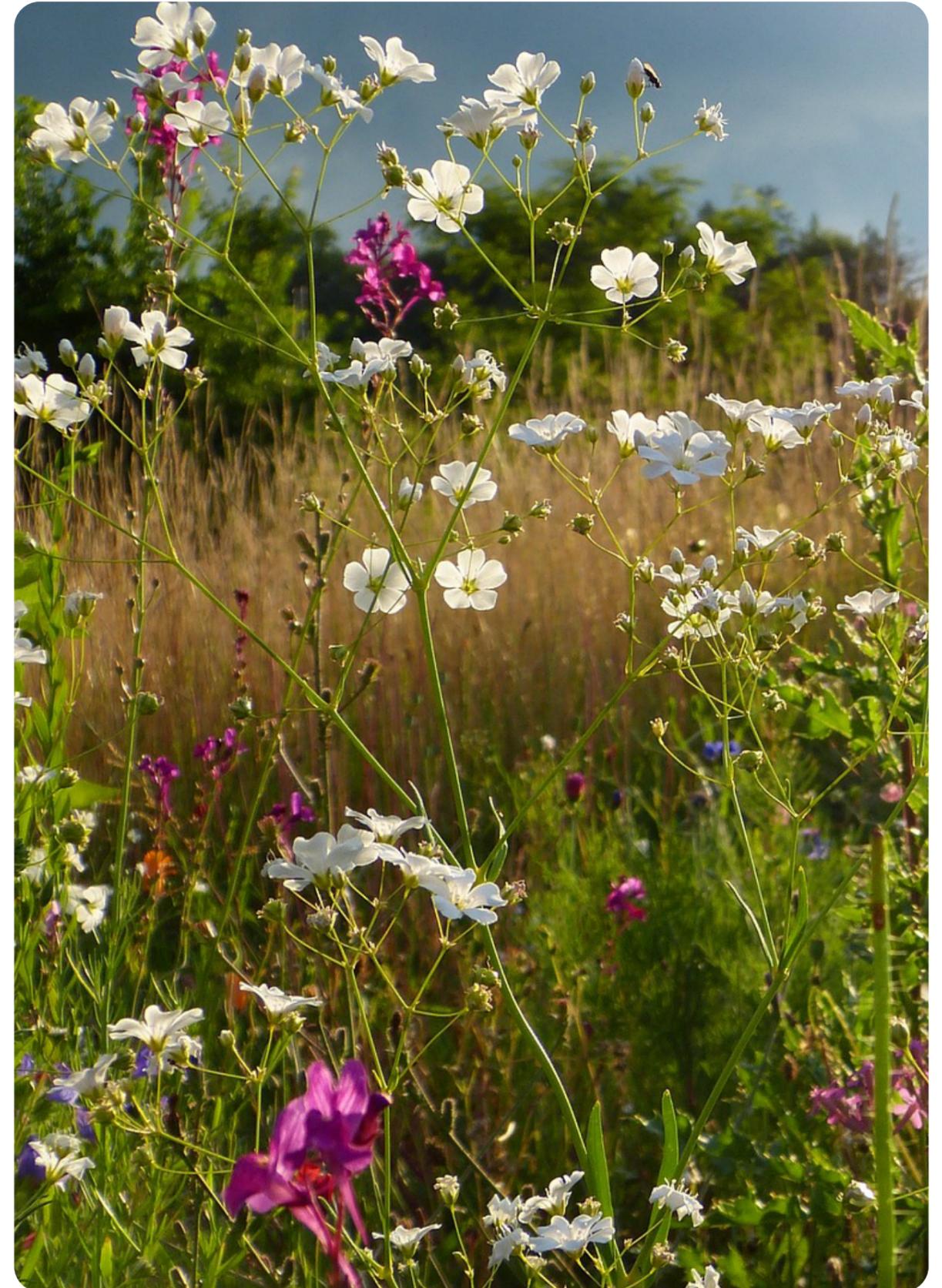
2. Des approches d'évolution expérimentale en laboratoire (sur des virus ou des bactéries) permettront dans un avenir proche d'affiner la prédictibilité des modèles épidémiologiques, en s'appuyant sur les prédictions des modèles théoriques d'interaction et d'évolution entre hôtes et pathogènes et en faisant à leur tour progresser ces modèles théoriques.

3. Dans un contexte agricole, étudier comment la diversité des plantes cultivées contribue à limiter l'émergence de pathogènes affectant la production agro-alimentaire peut apporter une plus-value très importante en matière de gestion. Ceci pourra nécessiter de mettre en place des études de long terme complexes à organiser et financer.

4. Des approches expérimentales pourront tester différentes stratégies de contrôle pour limiter l'émergence et l'adaptation des pathogènes. C'est particulièrement pertinent dans le contexte de la pandémie où la circulation de nouveaux variants est inquiétante, car elle compromet l'efficacité des mesures de distanciation et de vaccination.

Éléments de bibliographie

- Ansaldi, M., Boulanger, P., Brives, C., Debarbieux, L., Dufour, N., Froissart, R., Gandon, S., le Hénaff, C., Petit, M. A., Rocha, E., & Torres-Barceló, C. (2018). A century of research on bacteriophages. *Virologie*, 24(1), 9-22. <https://doi.org/10.1684/vir.2020.0809>
- Berngruber, T. W., Froissart, R., Choisy, M., & Gandon, S. (2013). Evolution of Virulence in Emerging Epidemics. *PLoS Pathogens*, 9(3), e1003209. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003209>
- Berngruber, T. W., Lion, S., & Gandon, S. (2015). Spatial Structure, Transmission Modes and the Evolution of Viral Exploitation Strategies. *PLoS Pathogens*, 11(4), e1004810. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1004810>
- Chabas, H., Lion, S., Nicot, A., Meaden, S., van Houte, S., Moineau, S., Wahl, L. M., Westra, E. R., & Gandon, S. (2018). Evolutionary emergence of infectious diseases in heterogeneous host populations. *PLoS Biology*, 16(9), e2006738. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006738>
- Dennehy, J. J. (2009). Bacteriophages as model organisms for virus emergence research. *Trends in Microbiology*, 17(10), 450-457. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2009.07.006>
- Gandon, S. (2021). Faut-il s'inquiéter de l'évolution du SARS-CoV-2? La Vie des idées. <https://laviedesidees.fr/Faut-il-s-inquieter-de-l-evolution-du-SARS-CoV-2.html>



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.

