

LA REVUE DE L'INSTITUT
FACTS REPORTS

2026

BIODIVERSITÉ ET SANTÉ



Fonds pour le
Progrès humain

sanofi

Institut
VEOLIA

En partenariat avec **WAVESTONE**

REGARDS CROISÉS POUR ÉCLAIRER LE FUTUR

INSTITUT VEOLIA

Fondé en 2001, l'Institut Veolia constitue une plateforme de dialogue et de réflexion collective dédiée aux enjeux situés à l'intersection des dynamiques sociétales et environnementales. Ses travaux portent notamment sur l'urgence climatique, la résilience urbaine, l'économie circulaire, l'innovation, la sobriété, la santé environnementale ou encore l'intelligence artificielle.

Au travers de ses publications, conférences et groupes de travail prospectifs, l'Institut Veolia favorise le dialogue entre le monde académique, les acteurs économiques et la société civile. Il contribue ainsi à nourrir la réflexion sur les grands défis contemporains et les transformations qui façonnent notre avenir.

L'orientation stratégique de l'Institut est définie par son Comité de prospective, composé d'experts de renommée internationale issus de disciplines variées – sciences humaines et sociales, économie, santé publique, sciences du climat, entre autres. Cette gouvernance scientifique confère à l'Institut une forte crédibilité et garantit la qualité de ses analyses et de ses travaux.

www.institut.veolia.org

SANOFI

Sanofi est une entreprise biopharmaceutique qui innove en R&D et exploite l'IA à grande échelle pour améliorer la vie des gens et réaliser une croissance à long terme. Sanofi applique sa connaissance approfondie du système immunitaire pour inventer des médicaments et des vaccins qui traitent et protègent des millions de personnes dans le monde entier, avec un pipeline innovant qui pourrait bénéficier à des millions d'autres.

Les équipes de Sanofi sont guidées par un seul objectif : poursuivre les miracles de la science pour améliorer la vie des gens ; une inspiration pour stimuler le progrès et avoir un impact positif pour les collaborateurs, les patients et les communautés que Sanofi sert, en s'attaquant aux défis les plus urgents de notre époque en matière sanitaire, environnementale, et sociétale en s'attaquant aux défis les plus urgents de notre époque en matière sanitaire, environnementale, et sociétale et notamment l'impact de l'environnement (qualité de l'air, changement climatique et perte de la nature) sur la santé des populations et les systèmes de santé.

<https://www.sanofi.com/>

FONDS AXA POUR LE PROGRÈS HUMAIN

Créé à l'occasion du quarantième anniversaire d'AXA, le Fonds AXA pour le Progrès humain rassemble les principales actions philanthropiques du Groupe et des Mutuelles d'Assurances AXA, en France et à l'international.

Doté de 60 millions d'euros par an, il soutient des projets à impact dans quatre domaines historiques de mécénat d'AXA : science, nature, solidarité et culture. Il s'inscrit pleinement dans la mission d'AXA – « Agir pour le progrès humain en protégeant ce qui compte » – en offrant une vision élargie de la protection, tournée vers la résilience des sociétés et la réduction des inégalités, aujourd'hui et pour les générations futures.

Véritable laboratoire d'innovation philanthropique, le Fonds impulse et soutient des programmes de recherche transdisciplinaires, comme les Chaires AXA, et des initiatives d'acteurs locaux à fort impact. Il crée ainsi des passerelles entre monde académique, société civile et institutions, au service de sociétés plus inclusives et plus résilientes.

<https://axafoundation.org/fr/>

Né au cœur de l'avènement des nouvelles technologies et du digital, Wavestone s'est imposé comme un cabinet de conseil de classe mondiale, positionné à la convergence du business et de la technologie. À l'ère de l'intelligence artificielle, Wavestone accompagne les plus grandes entreprises en les aidant à déployer à l'échelle de nouvelles façons de travailler, à faire évoluer leurs opérations ou encore à réinventer leurs modèles d'affaires.

Présents en Europe et en Amérique du Nord, les 6000 collaborateurs de Wavestone délivrent une offre de conseil sur-mesure et de bout-en-bout, combinant expertise business, technologique et savoir-faire de premier plan en transformation d'entreprise. En intégrant l'IA au cœur de sa proposition de valeur et de ses interventions le cabinet permet à ses clients de convertir tout le potentiel de cette transformation en valeur concrète et durable.

Wavestone est coté sur Euronext Paris et labellisé Great Place to Work®.

Numéro coordonné par
Cédric Baecher, Partner Wavestone - Bérénice Bourgeois, Senior Consultant Wavestone -
Hortense Stucker, Consultant Wavestone - Iris Valère, Stagiaire Wavestone
www.wavestone.com/fr/

SOMMAIRE

02 INTRODUCTION

Julia d'Astorg

Directrice des départements Science & Nature
du Fonds AXA pour le Progrès humain

Sandrine Bouttier-Stref

Directrice de la RSE du Groupe Sanofi

Nicolas Renard

Directeur Exécutif de l'Institut Veolia

04 AVANT-PROPOS

Harvey V. Fineberg

Professeur émérite en politique
et gestion de la santé à la Harvard
T.H. Chan School of Public Health,
Membre du Comité de prospective
de l'Institut Veolia

06 DÉCRYPTAGE

Harvey V. Fineberg

Professeur émérite en politique
et gestion de la santé à la Harvard
T.H. Chan School of Public Health,
Membre du Comité de prospective
de l'Institut Veolia

100 CONCLUSION

Cédric Baecher

Partner chez Wavestone

CHAPITRE 1

Biodiversité et santé : une alliance vitale

10

**La biodiversité, levier d'une alimentation
saine et durable**

Coline Jaworski, Chercheure indépendante experte
en agroécologie

16

**La diversité fongique, un trait d'union
entre le sol, le climat et les populations**

Adriana Morrell, Responsable scientifique
du Laboratoire de recherche en mycologie,
Centre for Business, Arts and Sciences,
Lethbridge Polytechnic, Alberta, Canada

Dale Pulvermacher, Assistant de recherche / étudiant
technicien au Laboratoire de recherche en mycologie,
Centre for Business, Arts and Sciences, Lethbridge
Polytechnic, Alberta, Canada

20

**Altérations du microbiote intestinal
humain par le mode de vie moderne :
Menaces sur la santé et émergence
de la médecine microbienne**

Philippe J. Sansonetti, Professeur émérite
à l'Institut Pasteur et au Collège de France

26

**Se soigner en s'inspirant de la nature :
Quelle place pour le biomimétisme
dans la médecine moderne ?**

Peter Stenvinkel, Professeur de néphrologie
à l'Institut Karolinska de Stockholm

CHAPITRE 2

Le prix sanitaire des atteintes à la biodiversité

34

**Microplastiques : De l'innovation au risque
pour la biodiversité**

Dr Saija Saarni, Professeure agrégée de géologie
environnementale appliquée à l'Université
de Turku, Finlande

36

Antibiorésistance : Un défi de santé planétaire

Marie-Cécile Ploy, Professeure des Universités -
Praticienne Hospitalière et Cheffe de Service en
bactériologie-virologie-hygiène au CHU de Limoges

40

**Le mercure, un enjeu brûlant pour la planète
et ses océans**

Lars-Eric Heimbürger-Boavida, Océanographe
chimiste au CNRS et chercheur à l'Institut
Méditerranéen d'Océanologie de l'Université
d'Aix-Marseille

44

**Invasions biologiques : Un fardeau sanitaire
et économique croissant**

Christophe Diagne, Chargé de recherche à l'Institut
de Recherche pour le Développement (IRD)

Franck Courchamp, Écologue et Directeur de
Recherche au Centre National de la Recherche
Scientifique (CNRS)

50

**Protéger la biodiversité à l'échelle
communautaire en Afrique :
Optimiser les retombées positives sur
le développement rural tout en limitant
les risques de maladies infectieuses**

Professeur Gerard Killeen, Chaire d'AXA Recherche
en écologie appliquée aux agents pathogènes,
Université de Cork, Irlande

56

**Les oiseaux comme sentinelles écologiques :
L'émergence des maladies aviaires face à la crise
de la biodiversité**

Tamara Szentivanyi, Chercheuse à HUN-REN Centre
de recherche écologique à Vácrátót, Hongrie,
et à l'Institut de métagénomique, Université
de Debrecen, Hongrie

CHAPITRE 3

Préserver la biodiversité, protéger la santé : quelles solutions ?

62

**Le concept de One Health vu de l'Océan :
Protéger le vivant pour nous protéger nous-
mêmes**

Henri Bourgeois-Costa, Directeur des affaires
publiques de la Fondation Tara Océan

Pierre Mienville, Chargé de plaidoyer de la Fondation
Tara Océan

66

**Une illustration concrète du rôle d'une
entreprise pour la protection de la biodiversité :
Le cas de Veolia**

Sébastien Daziano, Directeur de la Stratégie
et de la Performance Plurielle -
Membre du Comité Exécutif de Veolia

Jean-Pierre Maugeudre, Adjoint au Directeur
du Développement Durable et de
la Performance Plurielle

Tiphaine Déas, Responsable des Engagements
biodiversité au sein du Pôle Nature de la Direction du
Développement Durable et de la Performance Plurielle

72

**Politiques publiques et institutions :
Protéger la biodiversité pour prévenir
les zoonoses, du global au local**

Audrey Arnal, Chargée de recherche à l'IRD
(l'Institut de Recherche pour le Développement)
et à UMR UM/CNRS/IRD MIVEGEC, Montpellier, France

Benjamin Roche, Directeur de recherche à l'IRD

78

**Indicateurs et données : Des outils pour relier
la biodiversité et la santé**

Dr David Nogués Bravo, Professeur au Globe Institute
de l'Université de Copenhague

82

**Agriculture durable : La promesse
des technologies basées sur l'ARN**

Johan Rodriguez-Melo, Chief Technology Officer
chez APOLO Biotech

Soledad Traubenik, Country Manager Europe
chez APOLO Biotech France

Federico Ariel, Cofondateur et Chief Science Officer
chez APOLO Biotech

88

**Images, récits et imaginaires : Leviers d'action
pour préserver la biodiversité**

Véronique Andrieux, Directrice Générale du WWF France

92

**Ce que l'eau nous révèle grâce à la science citoyenne :
Enseignements tirés de la Bolivie et du Kenya**

Afnan Agramont, Chercheur en gouvernance
de l'eau et de l'environnement au département Eau
et Climat de la Vrije Universiteit Brussel (VUB)

96

**L'assurance, un levier stratégique du
financement de la restauration de la nature**

Aurélien Fallon Saint-Lô, Directrice Durabilité
pour l'assurance chez AXA

INTRODUCTION

Julia d'Astorg - Directrice des départements Science & Nature du Fonds AXA pour le Progrès humain

Sandrine Bouttier-Stref - Directrice de la RSE du Groupe Sanofi

Nicolas Renard - Directeur Exécutif de l'Institut Veolia

C'est la nature qui nous fait vivre ; or elle est partout menacée. Quasiment tous les écosystèmes sont fragilisés, contaminés ou dégradés. Si la biodiversité se révèle beaucoup plus riche qu'on ne l'avait imaginé – on ne connaît que le dixième des espèces existantes –, les populations de nombreuses espèces diminuent rapidement. On estime que la vitesse actuelle de disparition des espèces est au moins 10 à 100 fois supérieure à celle des 5 précédentes grandes extinctions¹. De la sixième extinction en cours, l'homme est le principal responsable. Fragmentation et destruction des habitats naturels, pollutions chimiques, lumineuses et sonores, surexploitation des terres et des mers, réchauffement climatique, espèces invasives, prélèvements excessifs, voilà les principales causes de dégradation de la biodiversité.

Impliquées dans 60 % des extinctions de plantes et d'animaux recensées, les invasions biologiques sont un des plus puissants facteurs de perte de biodiversité (voir l'article p. 44). Chaque jour, 7 000 à 10 000 espèces marines voyagent dans les eaux de ballast des navires. Chaque année, 200 espèces exotiques colonisent de nouveaux milieux et concurrencent les espèces indigènes. Frelon asiatique en Europe, perche du Nil en Afrique, renouée du Japon en Amérique du Nord, les succès d'espèces invasives – ces espèces introduites hors de leur aire de répartition naturelle et qui ont réussi à y survivre puis à s'y développer – se multiplient, bouleversant les équilibres locaux.

De même que les changements climatiques, la pollution chimique est mondiale et permanente. Pour ne citer qu'un chiffre, les deux tiers des cours d'eau de la planète affichent des concentrations significatives d'antibiotiques (voir l'article p. 26). Certaines pollutions sont bien connues, mais la plupart le sont mal, notamment les pollutions émergentes.

Lorsqu'il nuit à la biodiversité, l'homme nuit à sa propre santé. La dégradation des écosystèmes modifie la prévalence et la transmission de maladies chez les humains. Le déboisement, l'altération des habitats naturels, le commerce de la faune sauvage, l'intensification agricole expliquent la majorité des zoonoses émergentes. Les espèces invasives peuvent également transmettre à l'homme des agents pathogènes... Sans parler de la transformation des écosystèmes, qui, en créant de l'insécurité alimentaire, risque de fragiliser encore plus les personnes vulnérables.

La disparition d'espèces nous prive de remèdes qui auraient permis de combattre certaines maladies actuelles ou à venir. En effet, la nature est un immense réservoir thérapeutique : en procédant par essai-erreur au cours de millions d'années, elle a résolu des problèmes médicaux extrêmement complexes. Son inventivité est extraordinaire. Il y a sept siècles, Léonard de Vinci conseillait déjà : « *Va prendre tes leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur* ».

L'homme ne peut échapper à sa condition d'être dépendant des autres espèces. Sa santé et celle de son environnement sont étroitement liées : en définitive, il n'y a qu'une seule santé. Restaurer la biodiversité et la préserver est son intérêt bien compris et mériterait autant d'attention que le réchauffement climatique. Pour la défendre, il est plus efficace de passer par le prisme de la santé humaine, car ce motif nous touche directement. Cela est d'autant plus important que le temps presse. Lent en apparence mais rapide à l'échelle des cycles géologiques, le déclin de la biodiversité se remarque peu : il n'y a pas d'hécatombe généralisée, mais des taux de natalité plus faibles.

Comment enrayer la chute de la biodiversité ? Si quelques défis doivent être traités à l'échelle mondiale, sur beaucoup d'autres en revanche, l'homme peut agir localement : fragmentation et destruction des milieux naturels, pollutions, surexploitation des sols et des ressources halieutiques, espèces invasives... L'augmentation des connaissances et de leur précision, la cartographie et le suivi des territoires par de multiples indicateurs, l'accumulation et le croisement des données interdisciplinaires sont des atouts considérables pour agir précisément et durablement. Sans aucun doute, la dégradation de la biodiversité pourrait être ralentie par des stratégies de régénération plus ambitieuses et surtout par davantage d'efforts de conservation : car, au fond, une des meilleures manières de protéger la nature consiste à la laisser en paix. Mais l'homme le veut-il ? Et le peut-il ? La nature est dotée d'une grande résilience (que l'on songe simplement à la capacité auto-épuratrice des zones humides). Souvent, quelques décennies de tranquillité suffisent pour qu'elle retrouve son état initial, sous réserve que les seuils d'irréversibilité n'aient pas été franchis.

Réduction des pressions environnementales, régulation des interfaces à risque entre l'homme et la nature pour limiter les sauts d'espèces par les pathogènes, surveillance éco-épidémiologique dans les zones sensibles, contrôle du commerce d'espèces sauvages... En intégrant explicitement la santé humaine dans les politiques de protection de la biodiversité, et réciproquement, en intégrant la protection de la biodiversité dans les politiques de santé humaine, les gouvernements peuvent engager des actions à double bénéfice.

¹ IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. [Rapport d'évaluation mondial sur la biodiversité et les services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques] E. S. Brondizio, J. Settele, S. Diaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>.





© Agata Wyczolkowska

Ils doivent par ailleurs dépasser une approche sanitaire curative, pour que la prévention des zoonoses soit intégrée dans les politiques de protection de la biodiversité. Malheureusement, le succès d'une politique de prévention ne se voit pas ; elle réussit quand rien n'arrive. Pourtant, notre santé dépend davantage du préventif que du curatif.

Pour mieux protéger les écosystèmes et la santé humaine, il est indispensable de mieux les connaître. Beaucoup des nouvelles maladies humaines proviennent des animaux, en particulier de la faune sauvage. Faut de bien comprendre cette faune et, plus généralement, le fonctionnement des écosystèmes, il sera difficile de protéger correctement l'homme.

L'expérience le montre, il est possible de préserver la biodiversité et de restaurer des écosystèmes dégradés. Leur déclin n'est pas irrémédiable. En France, les populations de nombreuses espèces d'ongulés sauvages, de rapaces, de hérons, d'aigrettes, de cigognes blanches croissent avec vigueur. Le castor, le loup gris et la loutre d'Europe connaissent des expansions rapides. En 1970, on ne comptait que 3 espèces de poissons dans la Seine à Paris ; on en recense aujourd'hui une quarantaine².

Lorsqu'il nuit à la biodiversité, l'homme nuit à sa propre santé. La dégradation des écosystèmes modifie la prévalence et la transmission de maladies chez les humains

Afin d'encourager le déploiement des solutions à grande échelle, un accompagnement financier et une réglementation adaptée sont indispensables. Des solutions pour protéger et restaurer la biodiversité existent, elles sont éprouvées et prêtes à l'emploi. Prises individuellement, elles semblent dérisoires ; si elles sont

diffusées massivement, avec persévérance, dans la durée, alors elles auront un impact important. Nous manquons moins de solutions que de volonté politique et d'incitations économiques pour que tous s'impliquent : responsables publics, entreprises, agriculteurs, administrations, ONG, habitants...

La diversité biologique est le moyen qu'utilise la nature pour s'adapter au changement ; pour l'homme, elle constitue une assurance sanitaire. Tous deux partagent un même destin : l'appauvrissement de la nature appauvrit l'homme, sa protection le protège. Si l'homme est le pire ennemi de la biodiversité, il peut être, lorsqu'il le veut et s'en donne résolument les moyens, son meilleur ami.

² SIAAP, Service Public de l'Assainissement Francilien, <https://www.siaap.fr/metiers/biodiversite/>.



AVANT-PROPOS

Harvey V. Fineberg

Professeur émérite en politique et gestion de la santé à la Harvard T.H. Chan School of Public Health,
Membre du Comité de prospective de l'Institut Veolia

Biodiversité et santé humaine : un lien vital mais sous-estimé

Il y a six ans, notre monde était bouleversé par l'émergence d'une mystérieuse maladie, identifiée ensuite comme le COVID-19 et déclarée pandémie mondiale par l'Organisation Mondiale de la Santé. Si des doutes subsistent sur l'origine exacte du SARS-CoV-2, nombres d'infections dévastatrices pour les humains, telles que le VIH, trouvent leur origine dans des transmissions animales. La santé humaine est donc étroitement liée à la faune sauvage et aux écosystèmes.

Nous sommes liés à la biodiversité, autant physiquement que mentalement. Elle influence notre bien-être de différentes manières, notamment par l'abondance, la variété et la qualité de notre alimentation, le fonctionnement de notre système immunitaire ou les médicaments que nous prenons

Nous sommes liés à la biodiversité, autant physiquement que mentalement. Elle influence notre bien-être de différentes manières, notamment par l'abondance, la variété et la qualité de notre alimentation, le fonctionnement de notre système immunitaire ou les médicaments que nous prenons. Cette nouvelle revue FACTS Reports explore les interdépendances entre le bien-être humain et la biodiversité.

Comme nous l'avons dit, la biodiversité a une influence directe sur la santé, notamment via le risque d'infections zoonotiques. Plusieurs articles examinent comment les déséquilibres et les changements dans la dynamique des espèces peuvent créer les conditions propices à l'émergence d'agents pathogènes humains (voir les articles p. 44, p. 50 et p. 56).

La biodiversité est également un pilier fondamental de la nutrition et de la sécurité alimentaire. Les pollinisateurs, les organismes du sol et les interactions entre les plantes et les insectes contribuent à la productivité des cultures et à la qualité des aliments. En revanche, la perte de biodiversité et les pratiques agricoles intensives tendent à compromettre les rendements, à dégrader les sols et à aggraver les inégalités nutritionnelles. Ces thématiques et les questions connexes sont abordées dans les articles p. 10, p. 16 et p. 82.

Ce rapport explore également la biodiversité en tant que source d'inspiration pour l'innovation médicale et les traitements. Le biomimétisme inspire de nouvelles voies préventives, diagnostiques et thérapeutiques (voir l'article p. 26).

La biodiversité sous-tend des services écosystémiques essentiels, fondamentaux pour le bien-être humain (physique et mental). Les écosystèmes naturels et restaurés contribuent à la pureté de l'air et de l'eau, à la régulation du climat et à la création d'environnements qui préservent la qualité de vie. Plusieurs articles explorent ces liens, soulignant l'importance de préserver et restaurer les espaces naturels (voir les articles p. 16 et p. 66 et dans une certaine mesure les articles p. 92 et p. 96).



Cette revue montre les aspects positifs de nos liens avec la biodiversité, mais aussi ce qui se passe quand ses fonctions régulatrices sont affaiblies. Elle montre notamment comment la pollution interagit avec la perte de biodiversité en amplifiant les risques sanitaires, et comment les écosystèmes dégradés, jusqu'au microbiome humain, peinent à maintenir leurs rôles régulateurs essentiels, affectant ainsi la qualité de l'air, de l'eau et des sols (voir les articles p. 20, p. 34, p. 36 et p. 40).

De nombreux articles soulignent en outre le rôle de la biodiversité dans la résilience climatique. En effet, la diversité des écosystèmes contribue à amortir les phénomènes météorologiques extrêmes, à limiter la propagation des vecteurs de maladies sensibles au climat et à renforcer la capacité d'adaptation des communautés et des chaînes d'approvisionnement. Préserver la biodiversité est donc un impératif écologique, mais aussi une priorité stratégique pour la santé et le bien-être humains à long terme.

Une fois ce constat effectué, une question se pose : comment agir ? Cette étude propose différentes pistes, notamment dans sa dernière partie, par exemple généraliser l'approche *One Health* (Une seule santé), repenser les systèmes alimentaires pour en renforcer la résilience et l'équité, préserver ce qui reste de la « pharmacie mondiale » (avec des initiatives telles que « 30 x 30 »¹) et intégrer la biodiversité à l'aménagement urbain et territorial. Des politiques publiques solides, depuis les cadres internationaux jusqu'aux initiatives locales, peuvent avoir une contribution positive (voir l'article p. 72), tandis que des indicateurs et des infrastructures de données de meilleure qualité permettraient de mieux relier les connaissances scientifiques à la prise de décision (voir l'article p. 78) et des solutions de financement innovantes sont indispensables pour restaurer efficacement la nature et la biodiversité (voir l'article p. 96). Enfin, aucun progrès

ne sera possible sans l'engagement des citoyens, ce qui appelle à un renouvellement du dialogue entre la science et le public, dans lequel des données environnementales accessibles et produites localement deviennent essentielles pour combler les lacunes de connaissances et éclairer l'action (voir les articles p. 88 et 92).

En fin de compte, les articles rassemblés ici convergent vers le même message : la protection de la biodiversité est indissociable de la protection de la santé. À une époque marquée par la désinformation et les controverses politiques, cette revue vise à rétablir le lien entre les données factuelles, les politiques et la responsabilité collective, en proposant des perspectives, des solutions et une vision prospective de la santé planétaire.

La diversité des écosystèmes contribue à amortir les phénomènes météorologiques extrêmes, à limiter la propagation des vecteurs de maladies sensibles au climat et à renforcer la capacité d'adaptation des communautés et des chaînes d'approvisionnement



© Sylvie Blin

¹ Le 30x30 est un objectif mondial visant à protéger et conserver au moins 30 % des terres, des eaux douces et des océans de la planète d'ici 2030, adopté dans le cadre du Cadre mondial pour la biodiversité de Kunming-Montréal en 2022.

Une interview avec Harvey V. Fineberg

Harvey V. Fineberg

Professeur émérite en politique et gestion de la santé à la Harvard T.H. Chan School of Public Health,
Membre du Comité de prospective de l'Institut Veolia

QUELS SONT LES DYNAMIQUES ET LES DÉFIS MONDIAUX QUI REDÉFINISSENT AUJOURD'HUI LES LIENS ENTRE BIODIVERSITÉ ET SANTÉ ?

Tout d'abord, les interdépendances croissantes entre biodiversité et santé, renforcées par le changement climatique et les activités humaines, font partie de ce que j'appelle les « mégadéfis mondiaux » : des enjeux complexes et profondément interconnectés, aux conséquences de grande ampleur, qui exigent des réponses coordonnées à l'échelle mondiale. De récentes rencontres internationales, comme la Conférence des Parties à la Convention des Nations Unies sur la diversité biologique (COP15) de 2022, qui a abouti à l'adoption du Cadre mondial de Kunming-Montréal¹ pour la biodiversité, illustrent l'importance de réunir des acteurs du monde entier pour définir des priorités et des orientations stratégiques communes.

Un deuxième facteur majeur est l'impact sans précédent de l'activité humaine sur la planète. La rapidité et l'ampleur des changements environnementaux dépassent désormais la capacité d'adaptation des écosystèmes et des espèces, ce qui accélère la perte de biodiversité et constitue une menace pour la santé publique. Et pour la première fois dans l'Histoire de notre planète, ces perturbations sont l'œuvre d'une seule espèce. Cette réalité sous-tend le débat sur l'Anthropocène, un terme introduit dans les années 1980 par Paul Crutzen et Eugène Stoermer pour décrire une ère géologique façonnée par l'influence humaine. Bien que contestée, la réalité sous-jacente est claire : les changements induits par l'Homme dépassent désormais la capacité d'adaptation biologique et soumettent les écosystèmes à une pression extrême. Les pratiques agricoles modernes en sont un exemple flagrant. Les monocultures extensives réduisent la diversité génétique et affaiblissent la résilience des systèmes alimentaires, tandis que l'expansion de l'élevage et le déclin de la faune sauvage (fragilisée par la disparition des habitats et des pratiques telles que le braconnage) déstabilisent les écosystèmes. Ces pressions accentuent également de manière significative le risque de transmission zoonotique : à mesure que les humains pénètrent plus profondément dans les environnements sauvages, les agents pathogènes passent plus facilement de la faune sauvage aux humains ou au bétail, ce qui a causé des pandémies (VIH/sida) et des épidémies (Ébola).

La protection de la santé planétaire n'est pas seulement urgente, mais essentielle à la pérennité de la vie sous toutes ses formes

Un troisième défi majeur réside dans la capacité grandissante des humains à altérer les processus d'évolution biologique. L'Humanité a évolué au point d'exercer une influence majeure sur l'environnement, mais aussi de disposer des moyens technologiques suffisants pour faire dévier l'évolution de son cours naturel. Les progrès de la technologie génomique, en particulier le CRISPR², nous confèrent un pouvoir sans précédent pour modifier les génomes, ouvrant la voie à une forme de « néo-évolution »³. Bien que prometteuses pour le traitement de maladies graves, ces techniques soulèvent des questions éthiques majeures quand elles sont appliquées à la modification des caractéristiques humaines. Ces incertitudes éthiques et biologiques renforcent la nécessité de préserver la biodiversité, car l'intervention génomique ne pourra pas remplacer des systèmes façonnés au cours de millions d'années. Ce type de pratiques exige humilité, modération et un engagement renouvelé envers la protection du monde vivant.

Enfin, l'essor de l'intelligence artificielle, combiné aux systèmes robotiques et à la miniaturisation des composants électroniques, apporte un nouvel élément d'imprévisibilité à l'expérience qu'ont les humains de la vie et des écosystèmes qui la soutiennent. Ces forces, associées aux pressions de l'Anthropocène, au développement de la manipulation génétique et au manque de coopération internationale, créent une convergence qui remodèle la relation de l'Humanité avec la biodiversité. La protection de la santé planétaire n'est pas seulement urgente, mais essentielle à la pérennité de la vie sous toutes ses formes.

COMMENT LA BIODIVERSITÉ A-T-ELLE FAÇONNÉ L'INNOVATION MÉDICALE ET EN QUOI INSPIRE-T-ELLE ENCORE AUJOURD'HUI LA RECHERCHE BIOMÉDICALE ?

La nature a longtemps servi de fondement à l'innovation médicale. La pénicilline est issue de l'observation par Fleming d'un champignon inhibant la croissance bactérienne ; la quinine et l'artémisinine, deux antipaludiques phares, proviennent de remèdes traditionnels à base de plantes ; et la digitaline, dérivée

¹ Programme des Nations Unies pour l'environnement (2022) – Cadre mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal | UNEP – ONU Programme pour l'environnement.

² CRISPR est un outil d'édition génomique qui permet aux généticiens de couper des séquences d'ADN ciblées. Questions et réponses sur le CRISPR | Broad Institute.

³ Fait référence à une nouvelle phase de l'évolution biologique dans laquelle les humains ont désormais la capacité et la volonté de façonner l'évolution grâce à la science et à la technologie – Ted-ed (2011) Are we ready for neo-evolution? [Sommes-nous prêts pour la néo-évolution ?] - Harvey Fineberg | TED-Ed.



de la digitale, a façonné le traitement de l'insuffisance cardiaque pendant des décennies. Ces exemples illustrent comment l'observation attentive et l'extraction de composés naturels ont, à maintes reprises, fait progresser la médecine.

Compte tenu de cet héritage, il est logique que les laboratoires pharmaceutiques continuent à s'intéresser à la nature en tant que source de futurs traitements et à investir en ce sens. Aujourd'hui, les programmes de recherche du *National Institute of Health*⁴ des États-Unis et au sein de l'industrie pharmaceutique étudient toujours les plantes, bactéries, champignons, organismes marins et systèmes symbiotiques (tels que le microbiome humain) comme autant de pistes vers de nouvelles thérapies, confirmant ainsi que la biodiversité, tant autour de nous qu'à l'intérieur de notre corps, reste un réservoir essentiel de découvertes biomédicales.

COMMENT LA BIODIVERSITÉ INFLUENCE-T-ELLE LES POLITIQUES DE SANTÉ PUBLIQUE ET LES PRIORITÉS DE RECHERCHE ? EN QUOI LA SANTÉ CONSTITUE-T-ELLE UN LEVIER DANS LES STRATÉGIES DE PROTECTION DE LA BIODIVERSITÉ ?

Le principal lien entre politiques de santé publique et biodiversité se retrouve au cœur de l'approche *One Health* (Une seule santé)⁵, qui intègre la santé humaine, animale, végétale et environnementale. Ce cadre montre comment la dégradation de l'environnement et la perte de biodiversité accentuent les risques sanitaires et souligne la nécessité d'en tenir compte dans l'élaboration des politiques. Un autre lien existe entre la nutrition et l'agriculture durable : les régimes alimentaires à base de plantes, les systèmes alimentaires résilients et les méthodes préservant la biodiversité sont essentiels à la santé à long terme de la population. Troisième domaine : la santé mentale et urbaine. En effet, la conception de villes dotées d'espaces verts, d'une flore diversifiée et d'un accès à la nature améliore manifestement le bien-être. Ces trois axes soulignent la nécessité d'inclure la biodiversité aux programmes de santé publique de manière systématique, car le fait de négliger la biodiversité accentue les vulnérabilités épidémiologiques, nutritionnelles et psychologiques.

La biodiversité, tant autour de nous qu'à l'intérieur de notre corps, reste un réservoir essentiel de découvertes biomédicales

Au sens plus large, la santé joue trois rôles distincts, mais néanmoins complémentaires, dans la protection de la biodiversité. Premièrement, elle agit comme un facteur de motivation : l'importance de la santé étant reconnue par tous, le fait de relier biodiversité et santé contribue à mobiliser l'attention et le soutien du public. Deuxièmement, la santé fonctionne comme un objectif, puisque la biodiversité améliore la santé physique, mentale et publique. Troisièmement, la santé sert de fondement aux politiques, offrant ainsi une base légitime pour intégrer la biodiversité aux programmes relatifs à la santé publique, à l'environnement, à l'alimentation et à l'urbanisme. Ensemble, ces rôles – moteur, objectif et fondement politique – constituent une justification cohérente pour placer la santé au cœur des stratégies de protection de la biodiversité.

DANS UN CONTEXTE DE SCEPTICISME GRANDISSANT À L'ÉGARD DE LA SCIENCE, LE LIEN ENTRE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT EST-IL UN DOMAINE DE RECHERCHE STRATÉGIQUE, ET COMMENT PEUT-IL CONTRIBUER À RÉTABLIR LA CONFIANCE DU PUBLIC ?

Dans le contexte actuel marqué par la défiance envers la science et les institutions, il est essentiel de renforcer les liens entre santé, environnement et recherche. Le leadership scientifique ne peut fonctionner en vase clos : les chercheurs qui travaillent sur la biodiversité et la santé environnementale doivent également s'engager auprès de la société, écouter des préoccupations du public et participer au dialogue avec des publics divers. Sans que tous les scientifiques deviennent des experts en communication, ils doivent être plus nombreux à participer au débat public, surtout aujourd'hui, face aux réseaux sociaux et à la fragmentation des flux d'information. Pour rétablir la confiance du public, il est essentiel de se présenter d'abord comme des auditeurs puis, dans un deuxième temps, comme des instructeurs. Car la compréhension mutuelle entre les scientifiques et la société est essentielle pour définir les priorités de recherche, soutenir des politiques efficaces et favoriser l'alignement autour des défis liés à la biodiversité et à la santé.

En bref, des progrès durables nécessitent l'excellence scientifique mais aussi l'engagement du public, la transparence et la communication qui, ensemble, peuvent combler le fossé entre les connaissances scientifiques et les attentes de la société.

⁴ National Institute of Health (États-Unis)

⁵ Organisation mondiale de la santé. *Une seule santé*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/one-health>.

À propos de l'auteur

Harvey V. Fineberg a occupé le poste de président de la Fondation Gordon et Betty Moore de 2015 à 2026. Il est également membre du Comité de prospective de l'Institut Veolia. Il a auparavant occupé les fonctions de Président de l'Académie nationale de médecine des États-Unis (2002-2014), de doyen de la Harvard Chan School of Public Health (1984-1997) et de Vice-recteur de l'Université Harvard (1997-2001). Il a consacré la majeure partie de sa carrière universitaire aux politiques de santé et à la prise de décision médicale. Le Dr Fineberg est coauteur et coéditeur de plusieurs publications. Il est titulaire de nombreux diplômes honorifiques et distinctions, dont le prix international Henry G. Friesen pour la recherche sur la santé.



1

Biodiversité et santé : une alliance vitale



Achim Steiner, ancien Directeur du Programme des Nations Unies pour l'environnement résume ainsi le rapport de nos sociétés au vivant : “ À travers les cultures, les êtres humains accordent intrinsèquement de la valeur à la nature. La magie d'observer des lucioles scintiller longuement dans la nuit est immense. Nous puisons dans la nature l'énergie et les nutriments dont nous avons besoin. Nous y trouvons des sources de nourriture, de médicaments, de moyens de subsistance et d'innovation. Notre bien-être dépend fondamentalement de la nature¹. ” Au-delà de la beauté de la nature, de la diversité des espèces qui la composent et de la fascination qu'elles suscitent, il convient de reconnaître plus explicitement notre dépendance structurelle à la biodiversité : elle constitue une condition fondamentale de notre existence, au point que la préservation de nos sociétés est indissociable de celle du vivant.

Les dépendances majeures de nos sociétés sur la biodiversité sont nombreuses, l'exemple le plus connu étant sans doute le rôle essentiel des pollinisateurs dans la production alimentaire. 35 % de la production agricole mondiale dépend des pollinisateurs, parmi eux les abeilles, les oiseaux et les chauve-souris². Au-delà de cet exemple emblématique, la biodiversité est un déterminant central de la santé humaine en soutenant la santé des sols, la régulation des maladies, le fonctionnement de notre corps et l'innovation thérapeutique. Cette première partie propose d'explorer les multiples dimensions du lien entre biodiversité et santé, depuis les fondements écologiques des systèmes alimentaires jusqu'aux mécanismes biologiques inspirant de nouvelles approches thérapeutiques.

Tout d'abord, la biodiversité apparaît comme une condition indispensable à une alimentation saine et durable. **Coline Jaworski** explique que la diversité microbienne des sols, les insectes pollinisateurs et les ennemis naturels des bioagresseurs soutiennent conjointement la fertilité des sols, la qualité nutritionnelle des cultures, la stabilité des rendements et la réduction de l'usage des intrants chimiques. Face aux limites de l'agriculture intensive, la transition vers des systèmes agroécologiques apparaît indispensable pour concilier sécurité alimentaire, adaptation au changement climatique et préservation de la santé humaine.

De la même façon, **Adriana Morrell** et **Dale Pulvermacher** démontrent que la biodiversité fongique constitue un pilier central du fonctionnement des écosystèmes terrestres et de la santé des sols. Les champignons formant des systèmes symbiotiques avec des plantes améliorent l'acquisition de nutriments et d'eau, la structuration des sols, la séquestration du carbone et la résistance des plantes aux stress environnementaux. Leurs travaux mettent en évidence le rôle clé de

ces interactions fongiques dans la restauration des prairies et la durabilité des agroécosystèmes face aux pressions anthropiques et climatiques. Il apparaît primordial de préserver cette diversité fongique pour assurer une qualité des sols nécessaire à un système agricole résilient.

Au-delà des environnements que nous habitons, il convient de considérer la biodiversité qui compose le corps humain. **Philippe Sansonetti** met en évidence le rôle fondamental de la biodiversité microbienne dans la physiologie humaine. Le microbiote intestinal joue un rôle déterminant dans notre digestion, notre métabolisme, la maturation de notre système immunitaire et notre neurodéveloppement. Les perturbations de cette symbiose, liées notamment à nos habitudes alimentaires modernes et à la dégradation de notre environnement, sont associées à l'émergence de maladies chroniques. Les avancées récentes en médecine microbienne visent désormais à restaurer la diversité et la stabilité des microbiotes dans une approche écologique de la santé.

Enfin, la nature est un réservoir d'innovations médicales. Pour **Peter Stenvinkel**, la biodiversité constitue un réservoir unique d'inspiration thérapeutique à travers le biomimétisme. L'étude des mécanismes physiologiques développés par certaines espèces, comme l'ours ou le rat-taupo nu, ouvre des perspectives nouvelles pour la prévention et le traitement de maladies humaines exacerbées par le changement climatique. L'érosion rapide de la biodiversité menace directement ces opportunités scientifiques et sanitaires majeures, rendant indispensable une transformation interdisciplinaire de la recherche médicale dans les années à venir.

1 IPBES (2022) Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [Rapport d'évaluation mondiale sur la biodiversité et les services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques], p.9.

2 FAO Home | Global Action on Pollination Services for Sustainable Agriculture [Action mondiale en faveur des services de pollinisation pour une agriculture durable] | Food and Agriculture Organization of the United Nations.



La biodiversité, levier d'une alimentation saine et durable

Coline Jaworski

Chercheure indépendante experte en agroécologie

Une alimentation saine et diversifiée repose directement sur la biodiversité qui soutient les systèmes agricoles. La diversité microbienne du sol assure la fertilité, la structuration des sols, la disponibilité de l'eau et des nutriments, la protection contre les pathogènes et l'enrichissement nutritionnel des cultures. Parallèlement, les insectes pollinisateurs garantissent la production et la qualité nutritionnelle de nombreuses cultures, tandis que les ennemis naturels des bioagresseurs (pathogènes, insectes herbivores, mauvaises herbes) limitent les pertes de rendement et réduisent le recours aux pesticides, garantissant une alimentation plus saine. Aujourd'hui l'agriculture intensive n'est plus viable, provoquant la dégradation des sols et le déclin de la biodiversité. La transition agroécologique vers des systèmes agricoles s'appuyant sur et régénérant le vivant est urgente pour faire face aux défis du changement climatique et assurer une souveraineté alimentaire pour la santé humaine. La restauration des fonctions écologiques passe par la réduction du travail du sol, la diversification des cultures, le maintien d'habitats semi-naturels. Ces leviers permettent de concilier productivité, stabilité des rendements face aux aléas climatiques, qualité des aliments et préservation de l'environnement.

INTRODUCTION

Un des piliers de la santé humaine est une alimentation diversifiée, afin de répondre à nos besoins alimentaires en éléments de base (lipides, glucides, protéines), mais aussi en micronutriments et vitamines. Cela n'est possible que grâce à une diversité de cultures, dont céréales, légumineuses, et fruits, la plupart cultivées en plein champ. L'action d'une diversité d'êtres vivants est nécessaire à ces productions agricoles variées. En effet, les cultures tirent les nutriments et l'eau du sol grâce à l'activité de la macrofaune et des microorganismes du sol. La biodiversité arthropode fournit également des services essentiels tels que la pollinisation et la régulation des bioagresseurs de cultures, c'est-à-dire les ravageurs se nourrissant directement des plantes, les pathogènes provoquant des maladies et les adventices ou mauvaises herbes, en compétition pour les ressources en eau, en nutriment et en rayonnement solaire.

LES SERVICES FONDAMENTAUX DE LA BIODIVERSITÉ POUR UNE PRODUCTION AGRICOLE ABONDANTE, Saine ET DIVERSE

1.1. Le sol, substrat racinaire et ressource en eau et minéraux

Le sol offre le gîte à une diversité microbienne exceptionnelle : 1g de sol sain contient jusqu'à 1 milliard de bactéries de 4 000 espèces différentes, et 2 000 espèces de champignons dont les filaments parcourent l'équivalent de 200 m¹. Cette biodiversité microbienne rend le sol fertile en fournissant les nutriments minéraux (NPK) nécessaires à la croissance des plantes. La matière organique issue des déchets végétaux et organismes morts est d'abord broyée par des macro-organismes comme les vers de terre, puis par des microarthropodes comme les collembolles, et enfin digérée par ces millions de microorganismes. Une perte de 30 % de la diversité microbienne réduit de 40 % ce processus de minéralisation, conduisant à une diminution de croissance de la culture de 30 à 40 % qui n'est pas compensée par l'apport d'engrais de synthèse². Pour leur croissance, les plantes ont besoin de carbone (C), qu'elles acquièrent par le mécanisme de photosynthèse à partir du CO₂ atmosphérique, mais aussi d'azote (N). Celui-ci est extrait de l'azote atmosphérique (N₂) par des bactéries du sol du genre *Rhizobium*, qui le transforment en ammoniac et le transfèrent aux plantes de la famille des Fabacées, appelées légumineuses.

1 Bar-On et al. (2018) The biomass distribution on Earth [La distribution de la biomasse terrestre]. *Proc Natl Acad Sci* 115:6506-6511, <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.

2 Ranjard (2022), La microbiologie des sols au service de la production agricole. INRAE Webinaire, <https://www.youtube.com/watch?v=XGkkSPm7nk8>.





© Coline Jaworski

Pour cela, elles colonisent les racines des plantes et y forment des nodules visibles à l'œil nu, pouvant ainsi fournir jusqu'à 300 kg d'azote par hectare et par an, l'équivalent de 650 kg d'urée synthétique³. Le transfert d'azote aux cultures non légumineuses se fait grâce aux champignons mycorhiziens.

Le sol, c'est aussi une structure physique permettant le développement racinaire des cultures. L'accroissement racinaire est favorisé par un sol décompacté et aéré. Ce travail est essentiellement fourni par les vers de terre, qui forment galeries et macroagrégats en ingérant de la terre. Cela permet la circulation de l'air (et donc l'apport de N₂), mais aussi de l'eau, qui dissout les nutriments et les rend accessibles aux plantes. En l'absence de vers de terre, la formation de macroagrégats est réduite de 36 % et la capacité de stockage de l'eau de 10 %, tandis que la circulation de l'eau est réduite de 30 à 50 %⁴. La biodiversité microbienne joue un rôle essentiel dans la stabilité de ces macroagrégats : une perte de 30 % de biodiversité conduit à la disparition de 50 % de ces macroagrégats ; le sol se tasse et s'érode alors rapidement sous l'effet des pluies².

35 % de la production agricole mondiale et 75 % de la diversité des cultures dépendent directement de la pollinisation animale pour la production

Par ailleurs, la biodiversité microbienne du sol permet de tamponner les perturbations (climatiques, pollutions, pathogènes). Elle agit comme une barrière à l'installation de pathogènes des cultures : une perte de 30 % de la biodiversité microbienne du sol augmente par 5 le temps de résidence des pathogènes dans le sol². De plus, la mycorhization confère une résistance aux attaques de bioagresseurs et aux sécheresses, en activant les défenses naturelles des plantes de la racine au feuillage (phénomène de priming) et entre plantes (allélopathie).

Enfin, la biodiversité microbienne du sol favorise la qualité nutritionnelle des productions agricoles. Elle augmente les concentrations de micronutriments disponibles dans le sol, et donc leur assimilation par les cultures et leur présence dans les produits de récoltes (grains, fruits). Ainsi, les produits cultivés sur des sols plus riches en biodiversité microbienne sont enrichis en vitamines (C, K, B), en antioxydants et en fer, magnésium, de 10 à 30 % en comparaison des produits issus de l'agriculture conventionnelle (travail du sol intensif et apports d'engrais et de produits phytosanitaires conséquents)⁵. À l'opposé, ces derniers sont plus riches en métaux lourds cancérigènes comme le cadmium, issu des engrais de synthèse⁵.

3 Zahran(1999) *Rhizobium*-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate [Symbiose *Rhizobium*-légumineuses et fixation de l'azote dans des conditions sévères et en climat aride]. *Microbiol Mol Biol Rev* 63:968-89, <https://doi.org/10.1128/MMBR.63.4.968-989.1999>.

4 Hallam & Hodson (2020) Impact of different earthworm ecotypes on water stable aggregates and soil water holding capacity [Impact des différents écotypes de vers de terre sur les agrégats stables à l'eau et la capacité de rétention en eau du sol]. *Biol. Fertil. Soils* 56:607-617. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01432-5>.

5 Montgomery & Bickel (2021) Soil health and nutrient density: beyond organic vs. conventional farming [Santé des sols et densité nutritionnelle : au-delà de l'opposition entre agriculture biologique et agriculture conventionnelle]. *Front. Sustain. Food Syst.* 5, 699147. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.699147>.





© Coline Jaworski

1.2. Les pollinisateurs, garants de notre équilibre nutritionnel

35 % de la production agricole mondiale et 75 % de la diversité des cultures dépendent directement de la pollinisation animale pour la production, un service estimé à 235 à 577 milliards de dollars annuellement à l'échelle mondiale⁶. La grande majorité des fruits et légumes (à l'exception des agrumes), ainsi que certaines grandes cultures comme les légumineuses (pois, haricots) ou le colza (partiellement), ont besoin d'être pollinisées pour fructifier. Le transfert de pollen entre fleurs permettant la fertilisation est assuré essentiellement par des insectes sauvages (mouches, syrphes, abeilles, papillons), et seulement marginalement (14 %) par l'abeille domestique. Les abeilles sont les principaux pollinisateurs en Europe⁶. En plus des plantes cultivées, les pollinisateurs assurent également la pollinisation, et donc la reproduction, de 90 % des plantes à fleurs des écosystèmes terrestres⁷. Les pollinisateurs sont donc indirectement responsables d'une production de biomasse végétale très importante, qui fournit indirectement des services à l'agriculture, comme l'amélioration du sol (section 1.1) et des ressources pour la biodiversité arthropode régulant les bioagresseurs (section 1.3).

Les pollinisateurs ont également des effets bénéfiques sur la qualité nutritionnelle des cultures. Par exemple, la pollinisation des fleurs par des insectes enrichit la teneur en nutriment des fruits. Dans le cas des fraises, la teneur en acides (éléments

essentiels entrant dans la composition de nombreuses vitamines notamment) augmente de 12 % en moyenne relativement au taux de sucre, dans un fruit pollinisé par une abeille plutôt que par le vent⁸.

Une diversité de pollinisateurs est nécessaire pour la production d'une diversité de cultures. On estime que le déclin des pollinisateurs (causé notamment par l'agriculture intensive, avec l'utilisation de pesticides toxiques pour les pollinisateurs et la perte d'habitats et de ressources) provoque une perte de rendements d'environ 30 % à l'échelle mondiale⁶. Il est donc particulièrement important de conserver la biodiversité fonctionnelle des pollinisateurs, c'est-à-dire des pollinisateurs présentant des caractéristiques (taille, poils) leur permettant de polliniser la plus grande diversité de cultures⁹.

Cette biodiversité fonctionnelle est également très importante pour une production alimentaire stable face aux perturbations climatiques. Par exemple, les bourdons peuvent être actifs dès 10°C, alors que certaines abeilles ne sont actives qu'à partir de 18°C. Cette complémentarité de préférences thermiques permet de maintenir un service de pollinisation même sous conditions météorologiques difficiles¹⁰, ce qui est crucial au regard des périodes de floraison très courtes de certaines cultures (pomme, pêche) et des variations climatiques accrues du fait du changement climatique.

6 IPBES (2016) Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) on pollinators, pollination and food production [Résumé à l'intention des décideurs du rapport d'évaluation de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) relatif aux pollinisateurs, à la pollinisation et à la production alimentaire].

7 Ollerton et al. (2011) How many flowering plants are pollinated by animals? [Combien de plantes à fleurs sont pollinisées par des animaux ?]. *Oikos* 120, 321-326. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>.

8 Klatt et al. (2014) Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. [La pollinisation par les abeilles améliore la qualité des cultures, leur durée de conservation et leur valeur commerciale]. *Proc Biol Sci* 281:20132440. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2440>.

9 Woodcock et al. (2019) Meta-analysis reveals that pollinator functional diversity and abundance enhance crop pollination and yield [Une méta-analyse révèle que la diversité fonctionnelle et l'abondance des pollinisateurs améliorent la pollinisation des cultures et les rendements]. *Nature Commun* 10, 1481. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09393-6>.

10 Kühnel & Blüthgen (2015) High diversity stabilizes the thermal resilience of pollinator communities in intensively managed grasslands [Une forte diversité stabilise la résilience thermique des communautés de pollinisateurs dans les prairies gérées de manière intensive]. *Nature Commun.* 6, 7989. <https://doi.org/10.1038/ncomms8989>.



1.3. La régulation biologique des bioagresseurs de cultures

20 à 40 % de la production agricole mondiale est perdue aux bioagresseurs des cultures (ravageurs, maladies et adventices) chaque année¹¹. Le contrôle biologique des bioagresseurs de culture, parfois connu sous le nom de lutte biologique, biocontrôle ou régulation naturelle, est la régulation des populations de bioagresseurs par leurs ennemis naturels. Dans le cas de ravageurs arthropodes des cultures, comme les pucerons ou les lépidoptères, leurs ennemis naturels principaux sont d'autres insectes prédateurs (coccinelles, punaises, chrysopes, etc.) ou parasitoïdes (micro-guêpes qui se développent dans le corps des ravageurs). Ces insectes ennemis permettent d'éviter 1/3 des pertes de récoltes dues aux ravageurs, un service estimé à 4,5 milliards de dollars aux États-Unis¹². Dans le cas des adventices, les ennemis naturels sont essentiellement des granivores insectes (carabes, fourmis), oiseaux ou petits rongeurs. Favoriser ces régulations naturelles permet de réduire l'utilisation de pesticides, et donc la présence de toxines dans les produits de cultures, néfastes à la santé humaine.

Comme dans le cas des pollinisateurs, chaque plante cultivée attire un cortège bien spécifique de bioagresseurs, eux-mêmes régulés par un cortège spécifique d'ennemis naturels. Dans le cas des relations ravageur-parasitoïde par exemple, les niveaux de spécificité sont tels qu'il y a souvent une espèce de parasitoïde pour chaque espèce de ravageur, et cette très grande spécificité permet également une régulation la plus efficace¹³. Par ailleurs, une complémentarité d'espèces d'ennemis naturels améliore les services de régulation des bioagresseurs¹⁴ ; il est donc nécessaire de maintenir une grande biodiversité d'ennemis naturels dans les systèmes agricoles pour assurer la protection d'une diversité de cultures.

20 à 40 % de la production agricole mondiale est perdue aux bioagresseurs des cultures (ravageurs, maladies et adventices) chaque année

Le maintien de la biodiversité est aussi important face aux invasions biologiques. L'invasion de nouveaux bioagresseurs de cultures est de plus en plus fréquente du fait de l'homogénéisation des plantes cultivées à l'échelle mondiale et de l'intensification des échanges commerciaux, et plus de 60 % des pertes de rendements sont causées par des espèces de

bioagresseurs envahissantes¹⁵. Ces bioagresseurs envahissants n'ont pas co-évolué avec des ennemis naturels spécialistes dans l'aire envahie ; un cortège diversifié d'ennemis naturels peut alors atténuer les dégâts qu'ils occasionnent aux cultures en contribuant ensemble à réguler les populations de l'envahisseur.

Contrairement aux pesticides de synthèse, les stratégies de contrôle biologique n'ont pas vocation à éradiquer les bioagresseurs, mais à rééquilibrer les communautés, en maintenant leur abondance en-dessous d'un seuil de nuisibilité pour la culture. Cela permet notamment à la plante cultivée d'être en contact avec des bioagresseurs à des densités très faibles. Cette exposition permet d'activer les défenses naturelles de la plante, et de la charger en composés de défense (notamment antioxydants) qui ont un bienfait pour la santé humaine⁵.

CULTIVER LE VIVANT POUR PRODUIRE MIEUX ET MEILLEUR

Les systèmes agricoles dominants reposent sur la mécanisation et l'utilisation de variétés hautement performantes à condition qu'y soient ajoutés massivement des intrants (engrais et pesticides). Ces modèles intensifs ne sont pas durables face aux limites planétaires, puisqu'ils dégradent les sols, provoquent le déclin de la biodiversité, et ne sont pas résilients aux aléas climatiques. Il est urgent de transitionner vers des systèmes agricoles plus vertueux reposant sur les services rendus par la nature en les régénérant. Cette transition peut s'accompagner de réductions temporaires de rendements, qui sont compensées par une plus grande stabilité de la production sur le long terme dans un contexte de dérèglement climatique.

2.1. Agriculture régénératrice : cultiver en régénérant la biodiversité du sol

L'agriculture régénératrice propose une reconception des systèmes agricoles centrée sur la restauration des fonctions du sol tout en maintenant une productivité agricole, en rupture avec les systèmes intensifs dominants. Elle cherche à favoriser un sol vivant, riche en nutriments, et une structure permettant une bonne circulation de l'eau et de l'air et une pénétration des racines en profondeur, en respectant cinq principes combinés : (i) minimiser le travail du sol ; (ii) ne pas laisser le sol nu ; (iii) conserver des racines vivantes toute l'année ; (iv) augmenter la diversité cultivée ; et (v) intégrer l'élevage dans les rotations¹⁶.

11 Savary *et al.* (2019) The global burden of pathogens and pests on major food crops. [Le fardeau mondial des agents pathogènes et des ravageurs sur les principales cultures alimentaires]. *Nature Ecol Evol* 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>.

12 Losey & Vaughan (2006) The economic value of ecological services provided by Insects [La valorisation économique des services rendus par les insectes]. *BioScience* 56, 311–323. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[311:TEVOES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[311:TEVOES]2.0.CO;2).

13 Monticelli *et al.* (2021). Chapter Six—Multiple global change impacts on parasitism and biocontrol services in future agricultural landscapes. In Bohan, Dumbrell & Vanbergen (Eds.), *The Future of Agricultural Landscapes* [Impacts multiples des changements globaux sur le parasitisme et les services de lutte biologique dans les paysages agricoles futurs], Part III (Vol. 65, p. 245–304). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2021.10.002>.

14 Jonsson *et al.* (2017). Relationships between natural enemy diversity and biological control [Relations entre la diversité des ennemis naturels et la lutte biologique]. *Curr. Opin. Insect Sci.* 20, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2017.01.001>.

15 Pimentel *et al.* (2005). Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States [Mise à jour des coûts environnementaux et économiques associés aux espèces exotiques envahissantes aux États-Unis]. *Ecol. Econ.* 52, 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.002>.

16 Berthon, Jaworski *et al.* (2024) Measuring the transition to regenerative agriculture in the UK with a co-designed experiment: design, methods and expected outcomes [Mesure de la transition vers une agriculture régénératrice au Royaume-Uni à l'aide d'une expérimentation co-conçue : conception, méthodes et résultats attendus]. *Environ. Res. Food. Syst.* 1, 025007. <https://doi.org/10.1088/2976-601X/ad7bbe>.



Comment la biodiversité nous permet de nous nourrir sainement et durablement

La **diversité des cultures non récoltées** favorise les pollinisateurs et les ennemis naturels des ravageurs en leur fournissant à la fois des ressources alimentaires et un habitat

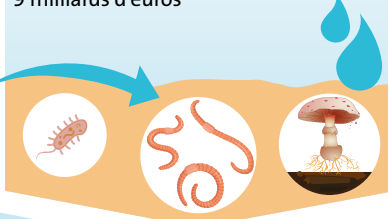


Les **pratiques d'agriculture régénérative** (telles que le travail réduit du sol, une plus grande diversité des cultures, une couverture végétale continue et des engrais organiques) améliorent la santé des sols et peuvent doubler la rentabilité¹⁷



Les vers de terre et les micro-organismes améliorent la **qualité des sols** en apportant des nutriments et de l'eau aux cultures

Estimation plancher de la valeur économique annuelle en France : 9 milliards d'euros¹⁸



La **pollinisation** favorise la production de graines et de fruits ainsi que la qualité nutritionnelle des cultures

Estimation de la valeur économique annuelle :

- Dans le monde : entre 237 et 577 milliards de dollars¹⁹
- En France : 7 milliards d'euros^{20,21}



Les **services de lutte biologique** protègent les cultures contre les ravageurs, les mauvaises herbes et les agents pathogènes

Estimation de la valeur économique annuelle :

- Aux États-Unis : 15 milliards de dollars²²
- En France : 3,5 milliards d'euros^{20,21}

Ces principes combinés permettent de maintenir le sol décompacté et aéré, grâce à l'action des racines et des vers de terre qui sont deux fois plus abondants²³, et grâce à la couverture permanente qui réduit la compaction liée aux précipitations. La matière organique est multipliée par deux,

grâce à l'apport de fumure d'élevage et à l'incorporation des résidus de cultures et d'intercultures¹⁷, ce qui favorise la biodiversité du sol et réduit le besoin d'engrais de synthèse. Cet avantage, combiné à une réduction des pesticides et des produits à plus haute valeur ajoutée, permet de multiplier par deux la rentabilité¹⁷.

17 Fenster et al.(2021). Defining and validating regenerative farm systems using a composite of ranked agricultural practices [Définition et validation de systèmes agricoles régénératifs à l'aide d'un ensemble de pratiques agricoles classées]. F1000Research10, 115. <https://doi.org/10.12688/f1000research.28450.1>.

18 Sur la base d'un prix estimé de l'engrais à 507 €/ha, pour les 17,6 millions d'hectares de cultures en France. Il s'agit d'une estimation basse, compte tenu du fait que les micro-organismes favorisent l'accès à de nombreux autres nutriments (dont le phosphore) et à l'eau, et que dans le contexte géopolitique actuel, les prix des engrais synthétiques sont en hausse.

19 IPBES (2016) Résumé à l'intention des décideurs du rapport d'évaluation de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) concernant les pollinisateurs, la pollinisation et la production alimentaire.

20 Part des États-Unis dans le marché agricole mondial : environ 410 milliards de dollars (FAO, Statistiques de la production agricole).

21 Part de la France dans le marché agricole mondial : environ 110 milliards de dollars (INSEE, Production et valeur ajoutée de l'agriculture 2025).

22 Losey & Vaughan (2006) The economic value of ecological services provided by Insects [La valeur économique des services écosystémiques fournis par les insectes]. BioScience 56, 311–323. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[311:TEVOES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[311:TEVOES]2.0.CO;2).

23 Berthon et al. (2025). Measuring the socio-economic and environmental outcomes of regenerative agriculture across spatio-temporal scales [Mesure des résultats socio-économiques et environnementaux de l'agriculture régénératrice à différentes échelles spatio-temporelles]. Phil. Trans. Roy. Soc. B. 380, 202040157. <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0157>.

2.2. Favoriser la biodiversité arthropode grâce à la diversité végétale cultivée et non cultivée

Les systèmes agricoles intensifs comportent des parcelles de plusieurs dizaines d'hectares cultivés avec une ou quelques cultures différentes à l'échelle du paysage, intercalées d'espaces non cultivés (bords de champs, bois, haies) inexistantes ou très réduits. En grandes cultures, une rotation tri-annuelle prédomine, composée de deux saisons de céréales, puis d'une année de rupture, généralement en colza, qui permet de réduire la charge pathogène, ainsi que la compétition avec les adventices. Il existe trois principaux leviers pour diversifier les plantes cultivées : (i) augmenter la longueur des rotations en y introduisant de nouvelles cultures ; (ii) les intercultures (des mélanges d'espèces à valeur agroécologique uniquement, et qui ne sont pas récoltées pour la production) ; et (iii) les



associations culturales, c'est-à-dire la culture simultanée de plusieurs espèces ou variétés dans le même espace. L'objectif agronomique est en premier lieu de nourrir le sol, notamment en introduisant des légumineuses fixatrices d'azote (voir section 1.1), mais aussi de réduire les charges pathogènes et adventices. Les intercultures sont particulièrement intéressantes pour lutter contre les adventices, permettant de supprimer 40 à 95 % des adventices²⁴.

Outre la santé du sol, la diversité cultivée favorise la biodiversité arthropode en créant des habitats (microclimats, refuges, sites de pontes) et des ressources alimentaires (ressources florales, proies variées pour les ennemis des ravageurs de cultures). Ainsi, elle peut augmenter la diversité des ennemis naturels et des pollinisateurs d'un facteur 1,5 à 2²⁵. D'un point de vue économique, un système agricole diversifié combinant des cultures plus ou moins sensibles est plus résilient aux aléas climatiques en diversifiant les sources de revenus.

De même que la diversité cultivée, la diversité végétale non cultivée, dans ou en dehors des parcelles cultivées, fournit ressources alimentaires et habitat à la biodiversité arthropode²⁵. Les bandes enherbées et/ou fleuries d'inter-rangs, les haies et éléments boisés régulent aussi le climat localement : ils réduisent l'exposition à la chaleur, au vent, au froid, et maintiennent une humidité importante pour les arthropodes, mais aussi pour les cultures. Ils protègent le sol et sa biodiversité microbienne, et régulent l'eau, en favorisant l'infiltration et en réduisant l'érosion. La continuité spatio-temporelle de la disponibilité de ces ressources est indispensable au bon fonctionnement des services rendus par la nature. Pour cela, il est nécessaire de planter des haies aux multiples essences végétales qui auront des floraisons décalées, ainsi que de créer des corridors (comme les haies et les bandes enherbées d'inter-rangs dans les vignobles) qui permettent la mobilité des arthropodes, et leur recolonisation des parcelles agricoles notamment après une perturbation (climatique, travail du sol, intrants phytosanitaires).

CONCLUSION

L'intensification agricole a conduit à une simplification massive des agroécosystèmes, un déclin de la biodiversité, et une dégradation des sols agricoles. En conséquence, ce modèle agricole fortement dépendant des intrants (engrais et pesticides) n'est pas durable face aux aléas climatiques et aux invasions biologiques, et la productivité agricole est de plus en plus fluctuante à l'échelle mondiale. Cela crée des tensions autour de la souveraineté alimentaire et le coût économique de l'inaction dépasse largement le coût de mise en œuvre de la transition agroécologique²⁶. Reconcevoir des systèmes agricoles régénérant les services rendus par la biodiversité est la clé de la durabilité des productions agricoles, et donc d'une alimentation saine et diversifiée. La biodiversité microbienne est garante du bon fonctionnement des sols, assurant des productions stables, saines et nutritives. La biodiversité arthropode protège les cultures des bioagresseurs, et assure la fructification grâce à la pollinisation. Quelques leviers simples permettent de promouvoir les services de la biodiversité : réduire les perturbations (intrants, travail du sol), augmenter la diversité cultivée (notamment avec des légumineuses enrichissant le sol), retourner la matière organique non récoltée au sol, favoriser la diversité végétale dans les espaces non cultivés. Investir dans la biodiversité, c'est construire une sécurité alimentaire reposant sur des processus naturels auto-entretenus, gratuits et résilients aux aléas climatiques plutôt que sur une dépendance aux intrants externes. Ce changement de paradigme demande une refonte des politiques agricoles valorisant la qualité et la diversité des productions, notamment végétales, et le « prendre soin des milieux » à des échelles territoriales, plutôt que l'organisation en filières intensives tournée vers des régimes alimentaires fortement carnés.

²⁴ Osipitan et al. (2019), Impact of cover crop management on level of weed suppression: a meta-analysis [Impact de la gestion des cultures de couverture sur le niveau de suppression des adventices : une méta-analyse]. *Crop Sci.* 59, 833-842. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.09.0589>.

²⁵ Jaworski et al. (2023) Crop diversification to promote arthropod pest management [Diversification des cultures pour favoriser la gestion des ravageurs arthropodes] : A review. *Agric Comm* 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.agrcom.2023.100004>.

²⁶ Pour une agriculture bas carbone, résilient et prospère. The Shift Project, Novembre 2024, Rapport Final. <https://theshiftproject.org/app/uploads/2025/07/Rapport-final-Former-les-actifs-pour-la-transition-ecologique.pdf>.

À propos de l'auteure

Coline Jaworski est chercheuse indépendante experte en agroécologie, spécialiste des interactions plantes-insectes et de leurs fonctions dans les écosystèmes naturels et agricoles. Elle travaille sur la pollinisation, la régulation des bioagresseurs de cultures, et les relations entre la santé des sols et la biodiversité arthropode. Elle cherche à analyser les impacts du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes, et à identifier les leviers de restauration des fonctions écologiques. Dans ses travaux récents, elle travaille sur les leviers de transformation des systèmes agricoles vers l'agroécologie en co-construisant le savoir avec les agriculteurs. Ses recherches ont été soutenues par une bourse postdoctorale AXA.



La diversité fongique, un trait d'union entre le sol, le climat et les populations

Adriana Morrell : Responsable scientifique du Laboratoire de recherche en mycologie, Centre for Business, Arts and Sciences, Lethbridge Polytechnic, Alberta, Canada

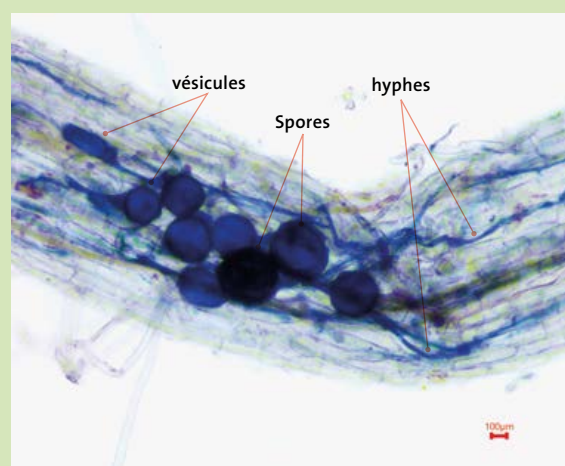
Dale Pulvermacher : Assistant de recherche / étudiant technicien au Laboratoire de recherche en mycologie, Centre for Business, Arts and Sciences, Lethbridge Polytechnic, Alberta, Canada

Les champignons sont des mets très appréciés des gourmets, mais aussi des acteurs essentiels de la biosphère. Comme le montrent les recherches, ils ne sont ni des plantes, ni des animaux, et ont évolué bien avant eux, il y a environ 950 millions d'années¹. Avec les algues, les champignons ont été les premiers ingénieurs de l'écosystème : en recyclant les nutriments, en assurant le cycle du carbone et en décomposant la roche pour former les premiers sols, ils ont posé les bases permettant aux plantes et aux animaux de coloniser une Terre jusque-là stérile². Ils jouent encore aujourd'hui un rôle majeur dans nos vies, fournissant des services essentiels à la société moderne et au bien-être humain.

Ils contribuent notamment à la production alimentaire. Dans un monde où vivent plus de 8,3 milliards de personnes, celle-ci occupe une part importante de la surface terrestre et met les systèmes agricoles sous pression. Pour garantir la sécurité alimentaire mondiale, les systèmes agricoles doivent être à la fois très productifs et respecter les principes du développement durable³. Or, les champignons présents dans le sol jouent un rôle central dans le fonctionnement des agroécosystèmes, car ils influencent le cycle des nutriments, la santé des plantes et la structure du sol elle-même. Il est aujourd'hui reconnu que la gestion de la diversité fongique du sol est une stratégie clé pour maintenir de bons rendements agricoles dans des conditions environnementales en pleine évolution.

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA), omniprésents dans les écosystèmes terrestres, forment des associations symbiotiques avec les racines de plus de 80 % des espèces végétales dans le monde (**Figure 1**)⁴. Ces organismes dépendent des plantes vivantes pour leur apport en carbone et leur cycle de vie n'est pas possible sans hôte⁴. En contrepartie, ils aident les plantes à accéder aux nutriments et à l'eau contenus dans le sol, les rendent plus résistantes au stress environnemental et biologique, contribuent à la séquestration du carbone et réduisent l'érosion en consolidant les particules du sol.

Figure 1. Structures fongiques mycorhiziennes arbusculaires (hyphes, vésicules et spores) observées dans les racines de l'agropyre à épis bleus (*Pseudoroegneria spicata*) à un grossissement de 400×



Laboratoire de recherche en mycologie, Lethbridge Polytechnic.
© Dale Pulvermacher

- 1 Loron, C. C., François, C., Rainbird, R. H., Turner, E. C., Borensztajn, S., & Javaux, E. J. (2019). Early fungi from the Proterozoic era in Arctic Canada [Premiers champignons datant de l'ère protérozoïque dans l'Arctique canadien]. *Nature*, 570(7760), 232-2,235A-235D. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1217-0>.
- 2 Szánthó, L.L., Merényi, Z., Donoghue, P. et al. A timetree of Fungi dated with fossils and horizontal gene transfers [Chronogramme évolutif des champignons daté à l'aide de fossiles et de transferts horizontaux de gènes]. Provide your feedback on BizChat Nat Ecol Evol 9, 1989–2001 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41559-025-02851-z>.
- 3 Ellouze, W., Taheri, A. E., Bainard, L. D., Yang, C., et al. (2014). Soil fungal resources in annual cropping systems and their potential for management [Ressources fongiques du sol dans les systèmes de cultures annuelles et leur potentiel de gestion]. *BioMed Research International*, 2014, Article 531824. <https://doi.org/10.1155/2014/531824>.

- 4 Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). DOI: 10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6. Mycorrhizal symbiosis [Symbiose mycorhizienne]. (3rd ed.). Academic Press.



Malgré leur importance pour les humains, les communautés fongiques du sol sont de plus en plus affectées par les pressions anthropiques. L'agriculture intensive – notamment le labour, la monoculture et l'utilisation massive d'engrais et de pesticides – « simplifie » les communautés végétales et perturbe les réseaux fongiques, réduisant la diversité et la complexité fonctionnelle par rapport aux écosystèmes pérennes⁵. En revanche, les sols riches en CMA permettent d'économiser de 10 à 30 % d'engrais synthétiques, et donc de diminuer les coûts de production, tout en réduisant le ruissellement des nutriments vers les réseaux hydrographiques⁵. Ils limitent aussi la prolifération d'algues nuisibles, qui entraînent chaque année des pertes économiques de plusieurs milliards de dollars dans les secteurs de la pêche, des loisirs et du traitement de l'eau potable. Des études comparatives montrent en outre que la richesse et la diversité fongiques sont plus faibles dans les sols cultivés que dans les systèmes non cultivés ou naturels⁶, ce qui montre la sensibilité des CMA aux changements d'usage des terres.

Quand nous défrichons des forêts ou convertissons des terres pour l'agriculture ou d'autres activités économiques, nous transformons le monde invisible des micro-organismes du sol⁵. Et les champignons bénéfiques qui forment des symbioses avec les racines des plantes voient souvent leurs populations diminuer. À l'inverse, des espèces opportunistes à croissance rapide, telles que le pathogène *Fusarium graminearum*⁶, se multiplient.

La gestion de la diversité fongique du sol est une stratégie clé pour maintenir de bons rendements agricoles dans des conditions environnementales en pleine évolution

L'urbanisation fragmente les habitats naturels, réduisant ainsi le rôle essentiel de ces champignons dans le cycle des nutriments et la filtration de l'eau. L'exploitation minière et d'autres activités industrielles introduisent des métaux lourds et des polluants qui perturbent les relations entre les racines et les champignons⁵. À cela s'ajoute le changement climatique qui, par le réchauffement, la sécheresse et la modification des précipitations, exerce des pressions supplémentaires. Tous ces facteurs remodelent les communautés microbiennes du sol et affectent les interactions vitales entre les plantes et la vie du sol.

La perte de biodiversité fongique a des répercussions en cascade, au-delà de la santé des sols et de la productivité des cultures. Sans elle, les sols sont moins résilients et dépendent davantage des intrants

externes, tandis que les écosystèmes sont plus vulnérables aux espèces nuisibles et aux maladies⁵. Sur le plan de la santé humaine, les sols dégradés produisent des aliments de moindre qualité nutritionnelle, accentuent la pollution environnementale (par le ruissellement des nutriments) et diminuent la capacité des terres à stocker le carbone et à réguler le climat. En fin de compte, cela affecte l'air que nous respirons, l'eau que nous buvons et la nourriture dont nous dépendons. Les champignons peuvent atténuer ces risques : les champignons mycorrhiziens peuvent améliorer l'absorption des nutriments par les plantes, et donc la valeur nutritionnelle des cultures⁷. Ils soutiennent directement la santé humaine via la médecine et la détoxification de l'environnement.

5 Bach, E. M., Ramirez, K. S., Fraser, T. D., & Wall, D. H. (2020). Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future [La biodiversité des sols intègre des solutions pour un avenir durable]. *Sustainability*, 12(7), Article 2662. <https://doi.org/10.3390/su12072662>.

6 Umer, M., Anwar, N., Mubeen, M., Li, Y., Ali, A., Alshaharni, M. O., & Liu, P. (2025). Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture [Rôles des champignons mycorrhiziens à arbuscules dans la croissance des plantes et la gestion des maladies pour une agriculture durable]. *Frontiers in Microbiology*, 16, Article 1616273. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1616273>.

7 Wu, Y., Chen, C., & Wang, G. (2024). Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves plant biomass and nitrogen and phosphorus nutrients: A meta-analysis [L'inoculation avec des champignons mycorrhiziens à arbuscules améliore la biomasse végétale ainsi que les teneurs en azote et en phosphore : une méta-analyse]. *BMC Plant Biology*, 24, Article 960. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05638-9>.



Ils ont permis de mettre au point des médicaments vitaux tels que les antibiotiques (ex. la pénicilline), les immunosuppresseurs (ex. la cyclosporine) et les composés hypocholestérolémiant (ex. les statines)⁸. En outre, de nombreuses espèces peuvent dégrader des polluants persistants (ex. pesticides, hydrocarbures et produits chimiques industriels⁹) et limiter leur accumulation dans les sols, les réseaux hydrographiques et la chaîne alimentaire humaine.

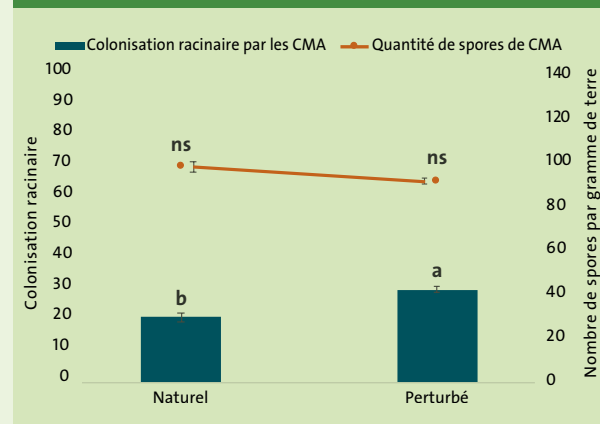
La richesse et la diversité fongiques sont plus faibles dans les sols cultivés que dans les systèmes non cultivés ou naturels, ce qui montre la sensibilité des CMA aux changements d'usage des terres

Les efforts de restauration qui rétablissent les communautés végétales indigènes et favorisent les champignons bénéfiques permettent de renforcer rapidement la quantité et la diversité des CMA, ce qui consolide certains services écosystémiques tels que la disponibilité des nutriments, la production fourragère et le stockage à long terme du carbone. Ces gains se traduisent par des bénéfices pour la société. Par exemple, dans les Grandes Plaines nord-américaines, le simple fait d'éviter la conversion de 10 % des prairies indigènes restantes en terres agricoles permet d'éviter des émissions de CO₂ représentant des coûts sociétaux d'environ 430 millions de dollars sur 20 ans⁵. Ainsi, une protection de l'environnement ciblée peut simultanément favoriser la biodiversité, l'atténuation du changement climatique et la durabilité économique.

Dans le cadre de nos recherches sur la restauration des prairies, nous nous intéressons à la gestion des champignons bénéfiques du sol, qui sont des éléments essentiels à la régénération des écosystèmes. En partenariat avec *Nature Conservancy of Canada* et en nous appuyant sur des études sur le terrain et des approches expérimentales, nous avons constaté qu'après une perturbation (ex. l'exploitation minière du charbon), les plantes s'établissent plus facilement quand des CMA sont présents. La **figure 2** montre que les graminées indigènes des sites perturbés présentent une colonisation racinaire par les CMA significativement plus élevée que les graminées des prairies adjacentes non perturbées,

même si la densité des spores de CMA est la même. Cela suggère qu'après une perturbation, les graminées indigènes sont plus dépendantes des symbioses avec les CMA pour se nourrir et s'établir. Cela souligne l'importance des partenariats entre champignons et plantes pour une restauration réussie. En cartographiant la diversité fongique et en intégrant l'inoculation microbienne à des assemblages de plantes indigènes, nos travaux visent à restaurer la fonction et la résilience des sols dans les paysages dégradés. Les résultats sont des pratiques agricoles plus durables, une biodiversité mieux protégée et une santé humaine améliorée dans un monde en mutation.

Figure 2. Pourcentage de colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) et nombre de spores fongiques dans la rhizosphère de graminées indigènes provenant de prairies intactes (naturelles) et perturbées (exploitation minière du charbon de 1907 à 1919) à Cervo 2 (propriété de Conservation de la nature Canada), Crowsnest Pass, Alberta, Canada. Les lettres indiquent des différences significatives selon le test t de Student ($\alpha = 0,05$). « ns » signifiant « non significatif »



8 Wadhwa, K., Kapoor, N., Kaur, H., Abu-Seer, E. A., et al. (2024). A comprehensive review of the diversity of fungal secondary metabolites and their emerging applications in healthcare and environment [Revue exhaustive de la diversité des métabolites secondaires fongiques et de leurs applications émergentes dans les domaines de la santé et de l'environnement]. *Mycobiology*, 52(6), 335–387. <https://doi.org/10.1080/12298093.2024.2416736>.

9 Liu, X. (2025). Fungi used with mycoremediation as a sustainable solution for environmental pollution [Champignons utilisés en mycoremédiation comme solution durable à la pollution environnementale]. *Microbial Bioactives*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.25163/microbbioacts.8110463>.



Secteur	Défis courants	Contributions de la biodiversité fongique
 Santé humaine	Bien-être humain	 Fournir des aliments riches en nutriments et des médicaments (p. ex. antibiotiques et composés immunostimulants). En construisant des sols sains et des écosystèmes résilients, les champignons soutiennent la santé physique et mentale.
	Qualité alimentaire	 Améliorer la disponibilité et l'absorption de nutriments grâce aux partenariats plantes-champignons (p. ex. mycorhizes), renforçant la qualité nutritive et la qualité globale des aliments
	Approvisionnement alimentaire	 Augmenter la productivité et la résilience des cultures par symbiose (p. ex. mycorhizes) et fournir des champignons comestibles nutritifs et d'autres aliments fongiques
	Contrôle de la pollution	 Filtrer, décomposer et détoxifier les polluants, améliorant la qualité des sols, de l'eau et de l'air, et contribuant à protéger la santé humaine et à atténuer le changement climatique
 Agriculture	Perte de nutriments et pollution (lessivage, ruissellement, prolifération d'algues)	 Les partenariats plantes-champignons améliorent la capture et la rétention des nutriments, réduisant les pertes d'engrais, le ruissellement et le recours aux intrants synthétiques
	Mauvais recyclage des nutriments et structure du sol	 Accélérer la décomposition et le recyclage des nutriments tout en améliorant la structure du sol et sa capacité de rétention d'eau
	Stress climatique (sécheresse, appauvrissement en nutriments)	 Augmenter la résilience des cultures face aux facteurs de stress climatique tels que la sécheresse, les températures extrêmes et l'appauvrissement en nutriments
 Environnement	Changement climatique (équilibre du carbone)	 Améliorer la séquestration du carbone en stimulant la croissance des plantes et le stockage du carbone dans les sols, en surface et en profondeur
	Ecosystèmes pollués ou dégradés	 Décomposer les contaminants (p. ex. hydrocarbures, métaux lourds) et soutenir la récupération des écosystèmes et leur résistance aux perturbations
	Dégradation du sol (érosion, faible fertilité, sols nus)	 Construire des sols sains en améliorant la structure, le recyclage des nutriments et la diversité microbienne. Les partenariats plantes-champignons augmentent la couverture végétale, réduisant l'érosion, l'accumulation de chaleur et la dégradation des terres

© Adriana Morrell and Dale Pulvermacher

Remerciements :

Nous remercions Alberta Innovates et le Fonds interne de recherche appliquée du Lethbridge Polytechnic pour leur financement, ainsi que nos partenaires – Nature Conservancy of Canada, Université de l'Athabasca, Université de Calgary, Grumpy's Greenhouses, Parks Canada, Grassland Restoration Forum, Teck Ltd., TC Energy, Enviroscapes et Marilyn Neville – qui ont rendu ce travail possible.

À propos des auteurs

Adriana Morrell est fondatrice et responsable scientifique du Laboratoire de recherche en mycologie au Lethbridge Polytechnic. Ses recherches portent sur la santé des sols, l'écologie microbienne et la restauration des prairies, et notamment sur les interactions entre les champignons et les plantes qui contribuent à la résilience des écosystèmes et à la gestion durable des terres.

Dale Pulvermacher est étudiant en licence de gestion des écosystèmes au Lethbridge Polytechnic et assistant de recherche au Laboratoire de recherche en mycologie. Il travaille sur la restauration des prairies et s'intéresse particulièrement au rôle de la mycologie dans les écosystèmes et leur restauration.



Altérations du microbiote intestinal humain par le mode de vie moderne :

Menaces sur la santé et émergence de la médecine microbienne

Philippe J. Sansonetti

Professeur émérite à l'Institut Pasteur et au Collège de France

Depuis Van Leeuwenhoek et ses « animalcules », la microbiologie a révélé le rôle fondamental des micro-organismes dans la santé humaine. Le microbiote intestinal, fruit d'une coévolution, assure digestion, métabolisme, maturation immunitaire et neurodéveloppement. Les animaux axéniques¹ et les modèles gnotobiotiques² ont confirmé la symbiose mutualiste et la nécessité d'une diversité microbienne stable. Les perturbations modernes, tels les antibiotiques, la césarienne ou une alimentation ultra-transformée, provoquent dysbioses et maladies chroniques. La recherche a permis d'identifier le « second génome humain » et d'analyser la résilience et la robustesse des microbiotes. La « médecine microbienne » vise désormais à restaurer cette symbiose, intégrant interventions alimentaires, probiotiques, prébiotiques et thérapies fécales, dans une approche systémique et écologique de la santé.

INTRODUCTION

Depuis plus de trois siècles, on sait que le corps humain héberge des microorganismes. Dès 1683, à Delft, Antonie van Leeuwenhoek observe pour la première fois, grâce à un microscope de tisseur, des êtres microscopiques présents dans la salive et le tartre dentaire humains, qu'il nomme « animalcules ». Cette découverte révèle l'existence d'un monde invisible.

À la fin du XIX^e siècle, est établi le rôle causal de certains microbes dans les maladies infectieuses. Entre 1870 et 1910, la plupart des agents responsables des grandes endémies sont identifiés, et Koch formalise les critères de causalité microbienne connus sous le nom de « postulats de Koch ». Dans ce contexte dominé par le poids des maladies infectieuses sur la société, une question émerge cependant : quelle est la fonction des nombreux microorganismes non pathogènes présents chez l'homme sain ?

LE MICROBIOTE INTESTINAL HUMAIN : HISTOIRE ET DÉMONSTRATION D'UNE SYMBIOSE

Dès 1885, Theodor Escherich s'étonne de la présence constante de bactéries dans l'intestin du nourrisson et de l'adulte sain, pressentant que leur étude éclairerait la physiologie digestive et certaines pathologies intestinales. La théorie du « pourrissement intérieur » d'Elia Metchnikoff attribue à l'accumulation de bactéries intestinales productrices de toxines un rôle dans le vieillissement. Observant la longévité exceptionnelle de populations consommant des laits fermentés, il introduit le concept de probiotiques.

Parallèlement, Arthur I. Kendall établit un lien entre régime alimentaire, bactéries intestinales et métabolites détectés dans les urines, anticipant dès 1909 le rôle de cette flore dans l'équilibre nutritionnel et le métabolisme de l'hôte. Ces intuitions posent les bases d'une vision fonctionnelle de la flore intestinale que l'on n'appelait pas encore microbiote (terme introduit dans les années 1950 par Theodor Rosebury).

Un tournant conceptuel majeur survient avec la possibilité de maintenir en vie des animaux totalement dépourvus de microbes. Louis Pasteur s'interroge dès 1885 sur la viabilité animale sans germes, suggérant que le monde microscopique serait indispensable à la vie du monde macroscopique. En 1897, Nuttall et Thierfelder, en Allemagne, démontrent cependant la survie d'animaux axéniques, c'est-à-dire sans microbes, ouvrant la voie à la gnotobiologie.

1 C'est-à-dire entièrement dépourvus de microbes.

2 La gnotobiologie est l'étude de la vie animale ou végétale en environnement microbien contrôlé.



Les études ultérieures révèlent néanmoins les limites de cette vie sans microbes. Les animaux axéniques présentent des déficits nutritionnels majeurs, une hypotrophie, des carences vitaminiques (A, B12, K) et une immaturité du système immunitaire³. Ils sont incapables de dégrader et fermenter les sucres végétaux complexes que l'on appelle « fibres ». Cette fermentation produit des acides gras ayant non seulement une haute valeur nutritive, mais qui s'avèrent indispensables à la régulation de l'expression de gènes clés du développement et du métabolisme animal. Le microbiote joue donc un rôle crucial dans le métabolisme énergétique et la nutrition animale. Sur ces bases se consolide le concept d'une « symbiose mutualiste » entre l'homme et son microbiote, en particulier intestinal. Les deux partenaires ont forgé ce « contrat à bénéfice mutuel » au fil d'une longue coévolution, qualifié « d'holobionte »⁴. La diversité d'espèces microbiennes au sein de cet holobionte est indispensable à la santé de l'homme.

C'est à partir des années 2000 que les approches méta taxonomiques 16S puis la métagénomique à haut débit ont permis une caractérisation exhaustive du microbiote intestinal humain, révélant une grande variabilité interindividuelle de la composition microbienne, mais une relative stabilité des fonctions métaboliques essentielles.

LES FONCTIONS ESSENTIELLES DU MICROBIOTE INTESTINAL

La gnotobiologie permet d'analyser la construction progressive du microbiote et les « successions écologiques » menant à un écosystème mature. Un microbiote est un assemblage hétérogène et complexe d'espèces microbiennes stablement établies, à leurs bénéfices mutuels, au sein d'une niche écologique stable. Cette organisation robuste est garante de la « santé » de la niche et la protège par exemple de l'intrusion de microorganismes extérieurs éventuellement délétères. C'est « l'effet de barrière » du microbiote.

Les microbiotes sont par essence résistants et résilients, mais la multiplication et la prolongation des stress imposés à leur niche sont facteurs à terme de l'établissement de dysbioses

À partir des années 1990, les travaux de Jeff Gordon à *Washington University* (USA) ont montré que la colonisation microbienne précoce programme durablement santé métabolique et immunitaire et l'angiogenèse⁵ intestinale⁶.

Le rôle du microbiote est aussi établi dans la maturation du système immunitaire muqueux et systémique⁷, ainsi que dans le développement post-natal du système nerveux central, donnant naissance au concept d'axe intestin-cerveau⁸.

Sur ces bases fonctionnelles, on va dès lors distinguer le « microbiote », entité taxonomique considérant l'ensemble des espèces microbiennes composant un écosystème, et le « microbiome », entité fonctionnelle recouvrant l'ensemble des activités métaboliques produites par ces micro-organismes dans leur relation symbiotique avec l'hôte.

La comparaison entre animaux axéniques et conventionnels (dotés d'un microbiote) a révélé les grandes fonctions symbiotiques du microbiote intestinal :

- Digestion des fibres dans la lumière intestinale car l'organisme humain ne dispose pas des enzymes nécessaires ;
- Soutien au développement des systèmes physiologiques nécessaires à la digestion des aliments et à l'absorption des nutriments ;
- Effet barrière contre les pathogènes, maturation immunitaire, neurodéveloppement et interactions métaboliques étroites avec l'hôte.

Le rôle du microbiote va donc bien au-delà d'un soutien à la santé métabolique et nutritionnelle de son hôte : le soutien des autres fonctions comme le neurodéveloppement passe aussi par un mécanisme de nature nutritionnelle à l'échelle des cellules, en particulier des cellules souches⁹.

Les grands programmes internationaux *MetaHit*¹⁰ et *Human Microbiome Project*¹¹ ont permis d'établir de vastes catalogues de gènes microbiens, d'identifier des organisations écologiques telles que les entérotypes et de mettre en évidence l'importance de la richesse génique du microbiote¹². Ces avancées ont ouvert la voie à l'émergence d'une véritable « médecine microbienne », allant du diagnostic à la prévention et à la restauration de la symbiose hôte-microbiote.

3 Reyniers, J.A., P.C. Trexler, and et al., A complete life-cycle in the germ-free bantam chicken [Le cycle de vie complet du poulet nain sans germes]. *Nature*, 1948. 162(4132): p. 67. <https://doi.org/10.1038/163067a0>.

4 Un holobionte se définit comme une entité vivante naturelle constituée d'un organisme supérieur appelé hôte (ex. humain, animal, plante) et de son microbiote, soit la cohorte de microorganismes qui lui est étroitement associée.

5 L'angiogenèse désigne la formation de nouveaux vaisseaux à partir de vaisseaux pré-existants.

6 Stappenbeck, T.S., L.V. Hooper, and J.I. Gordon, Developmental regulation of intestinal angiogenesis by indigenous microbes via Paneth cells [Régulation du développement de l'angiogenèse intestinale par les microbes endogènes via les cellules de Paneth]. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2002. 99(24): p. 15451-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.202604299>.

7 Chung H, Pamp SJ, Hill JA, et al. Gut immune maturation depends on colonization with a host-specific microbiota [La maturation immunitaire intestinale dépend de la colonisation par un microbiote spécifique à l'hôte]. *Cell* 2012 ; 149 : 1578-93. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.04.037>.

8 Diaz Heijtz R, Wang S, Anuar F, et al. Normal gut microbiota modulates brain development and behavior [Une flore intestinale normale influence le développement du cerveau et le comportement]. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2011 ; 108 : 3047-52.

9 Dang, H., et al., Maternal gut microbiota influence stem cell function in offspring. [Le microbiote intestinal maternel influence le fonctionnement des cellules souches chez la progéniture]. *Cell Stem Cell*, 2025. 32(2): p. 246-262 e8. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010529108>.

10 Qin, J., et al., A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing [Un catalogue des gènes du microbiote intestinal humain établi par séquençage métagénomique]. *Nature*, 2010. 464(7285): p. 59-65. <https://doi.org/10.1038/nature08821>.

11 Grice, E.A. and J.A. Segre, The human microbiome: our second genome [Le microbiome humain : notre deuxième génome]. *Annu Rev Genomics Hum Genet*, 2012. 13: p. 151-70. <https://doi.org/10.1146/annurev-genom-090711-163814>.

12 Cotillard A, Kennedy SP, Kong LC, et al. Dietary intervention impact on gut microbial gene richness [Impact d'une intervention alimentaire sur la diversité génétique du microbiote intestinal]. *Nature* 2013 ; 500 : 585-8. <https://doi.org/10.1038/nature12480>.





Chez un adulte sain, environ 160 espèces bactériennes sont présentes, mais seules une vingtaine constituent un noyau fonctionnel commun à tous les individus, essentiel au maintien des grandes fonctions physiologiques¹³. À l'échelle de la population humaine, le « pan-microbiote » intestinal regroupe plusieurs milliers d'espèces, reflétant une forte hétérogénéité interindividuelle liée notamment à l'alimentation, à l'environnement et à l'histoire évolutive. Cependant, au-delà de la vision taxonomique, c'est la fonction symbiotique qui prédomine. C'est sur elle que pèse la sélection naturelle. Or, diverses espèces microbiennes peuvent offrir des ressources métaboliques similaires.

Cependant, un stress exogène affectant les conditions de stabilité de la niche porte le risque de déstabiliser l'équilibre du réseau trophique et d'altérer la composition du microbiote, surtout sa diversité d'espèces, créant un vide favorable à l'établissement de microorganismes prédateurs. Au-delà de la perte de diversité, c'est la perte de fonctions biologiques qui compte. On parle alors de « dysbiose », et la rupture de symbiose qui en résulte peut devenir, à divers degrés, pathogène.

À l'ère de l'anthropocène, la biodiversité microbienne, qui représente l'essentiel de la biodiversité du vivant sur la planète (soit 95 %) devient donc un enjeu majeur de santé globale

Ces règles sont universelles, que l'on considère des microbiotes humains, animaux, végétaux, du sol ou des océans. Tout microbiote possède deux propriétés clés : sa « résistance »¹⁴ et sa « résilience »¹⁵. Les travaux actuels montrent que plus le microbiote intestinal est mature, plus il est résistant et résilient aux stress environnementaux.

Les microbiotes sont par essence résistants et résilients, mais la multiplication et la prolongation des stress imposés à leur niche sont facteurs à terme de l'établissement de dysbioses.

LE MICROBIOTE COMME ÉCOSYSTÈME : SYMBIOSE, BIODIVERSITÉ ET FRAGILITÉS AU TEMPS DE L'ANTHROPOCÈNE

Aujourd'hui, l'étude du microbiote/microbiome humain s'inscrit dans une perspective écologique globale, intégrant les concepts de *One Health* (Une seule santé), qui souligne l'interdépendance entre les microbiotes de la planète, quelle que soient leurs niches, car toutes sont soumises à des stress environnementaux communs : réchauffement, pluviosités extrêmes, pollutions diverses.

À l'ère de l'anthropocène, la biodiversité microbienne, qui représente l'essentiel de la biodiversité du vivant sur la planète (soit 95 %) devient donc un enjeu majeur de santé globale. Cette facette de l'impact sanitaire du déclin déjà engagé de la biodiversité microbienne apparaît encore peu dans l'argumentaire écologique.

Anthropocène et pressions du mode de vie moderne : une érosion microbienne sans précédent

Les effets délétères des activités humaines sur la biodiversité végétale, animale et sur le climat sont aujourd'hui largement documentés. En revanche, leur impact sur la biodiversité microbienne, et en particulier sur le microbiote humain, n'a été pleinement reconnu que récemment. Grâce à la révolution métagénomique, il est désormais possible de décrire très précisément la composition et l'évolution spatio-temporelle des microbiotes humains. Ces approches ont mis en évidence une réduction marquée de la richesse et de la diversité microbiennes, notamment au niveau intestinal, surtout dans les régions industrialisées où elle peut atteindre 50%¹⁶. Cette érosion microbienne est désormais considérée comme un enjeu majeur de santé publique.

¹³ Lloyd-Price J, Abu-Ali G, Huttenhower C. The healthy human microbiome. [Le microbiome humain en bonne santé]. *Genome Med* 2016 ; 8 : 51. <https://doi.org/10.1186/s13073-016-0307-y>.

¹⁴ On entend par là la résistance à un stress exogène imposé à sa niche écologique, soit le pourcentage d'espèces persistantes après stress.

¹⁵ On entend par résilience la capacité du microbiote de retour à la normale après stress exprimé par le pourcentage de retour à la normale après un temps donné.

¹⁶ Sanders JG, Sprockett DD, Li Y, et al. Widespread extinctions of co-diversified primate gut bacterial symbionts from humans [Extinctions massives de bactéries intestinales symbiotiques chez les primates ayant coévolué avec l'être humain]. *Nat Microbiol* 2023 ; 8 : 1039–50. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01388-w>.



De l'hypothèse hygiéniste aux « microbes manquants »

L'association entre mode de vie moderne et augmentation des maladies chroniques non transmissibles a d'abord été interprétée à travers l'« hypothèse hygiéniste », proposée par Jean-François Bach¹⁷. Celle-ci suggère qu'une réduction drastique de l'exposition aux agents infectieux, conséquence des progrès de l'hygiène, des vaccins et des antibiotiques, pouvait perturber la maturation du système immunitaire. Cette hypothèse s'est enrichie avec le concept de « microbes manquants », défendu notamment par Martin Blaser¹⁸, qui met l'accent sur l'appauvrissement précoce du microbiome et la perte d'espèces clés ayant co-évolué avec l'homme. Dans cette perspective, le microbiome est envisagé comme un capteur et un intégrateur des stress liés au mode de vie moderne et à l'exposome environnemental.

Antibiotiques : stressseurs modernes des microbiotes humains

La période néonatale est une fenêtre de vulnérabilité critique pour la construction du microbiote intestinal. L'exposition précoce aux antibiotiques est associée à une augmentation du risque d'asthme, d'allergies, d'obésité, de diabète et de troubles neurodéveloppementaux tels que le déficit d'attention et d'hyperactivité¹⁹. Des altérations du microbiote par l'administration d'antibiotiques durant cette période cruciale entraînent des conséquences métaboliques durables²⁰.

De même, la naissance par césarienne qui sur le plan microbiologique correspond à un sevrage à la naissance des bactéries maternelles vaginales et intestinales – équivalant à un traitement antibiotique précoce – est associée à un risque accru d'asthme²¹. Sont donc envisagées des stratégies de restauration microbienne ciblée à la suite d'une naissance par césarienne ou à un traitement antibiotique bien entendu inévitable si la situation clinique l'exige²².

La surconsommation d'antibiotiques constitue le paradigme moderne des stressseurs anthropiques des microbiotes à l'échelle planétaire

Plus généralement, la surconsommation d'antibiotiques constitue le paradigme moderne des stressseurs anthropiques des microbiotes à l'échelle planétaire. Outre la sélection de bactéries résistantes, les antibiotiques altèrent profondément la richesse et la diversité des écosystèmes microbiens. Plus de 300 000 tonnes d'antibiotiques seraient rejetées chaque année dans l'environnement, faisant de ces molécules de véritables polluants globaux. Des études récentes ont montré que 65 % des cours d'eau de la planète montraient des concentrations significatives d'antibiotiques.

Alimentation moderne transformée : « malbouffe » et altération des microbiotes humains

L'alimentation contemporaine, caractérisée par de forts déséquilibres et une transformation industrielle marquée par l'utilisation de nombreux additifs alimentaires, constitue également un stressseur environnemental majeur du microbiote intestinal humain²³. Sucres simples remplaçant les fibres, excès de protéines animales et de lipides saturés, déficit en nutriments et vitamines, introduction d'additifs édulcorants et émulsifiants, font de l'alimentation moderne ultra-modifiée un puissant déterminant, non seulement de réduction de diversité, mais aussi de dysbioses pathogènes.

Une expérience fondatrice publiée en 2005 a montré que la transplantation du microbiote intestinal de souris génétiquement obèses à des souris minces suffisait à induire une prise de poids chez ces dernières, démontrant le rôle causal du microbiote dans l'obésité²⁴. Ces altérations du microbiote peuvent également favoriser un état d'inflammation chronique de bas grade affectant de nombreux systèmes physiologiques, notamment cardiovasculaire, métabolique, immunitaire et nerveux. Des études complémentaires sont indispensables afin de confirmer les liens de causalité.

La « malbouffe » est clairement dans le viseur face à l'augmentation préoccupante d'incidence de pathologies comme les cancers colorectaux survenant chez les adultes jeunes, ou de l'obésité et du diabète de type 2, y compris chez les enfants et les adolescents. C'est un sujet brûlant de santé publique et les recherches sur les dysbioses doivent y jouer un rôle de premier plan.

17 Bach, J.F., The effect of infections on susceptibility to autoimmune and allergic diseases [L'influence des infections sur la prédisposition aux maladies auto-immunes et allergiques]. N Engl J Med, 2002. 347(12): p. 911-20. <https://doi.org/10.1056/nejmra020100>.

18 Blaser MJ. Missing microbes: How the overuse of antibiotics is fueling our modern plagues [Les microbes disparus : comment la surutilisation des antibiotiques alimente les fléaux de notre époque]. New York: Henry Holt and Company, 2014: p. 273. <https://doi.org/10.3201/eid2011.141052>.

19 Renz, H. and C. Skevaki, Early life microbial exposures and allergy risks: opportunities for prevention [Exposition aux micro-organismes au cours des premières années de vie et risques d'allergies : possibilités de prévention]. Nat Rev Immunol, 2021. 21(3): p. 177-191. <https://doi.org/10.1038/s41577-020-00420-y>; McDonnell, L., et al., Association between antibiotics and gut microbiome dysbiosis in children: systematic review and meta-analysis [Lien entre les antibiotiques et la dysbiose du microbiote intestinal chez les enfants : revue systématique et méta-analyse]. Gut Microbes, 2021. 13(1): p.1-18. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1870402>.

20 Cox, L.M., et al., Altering the intestinal microbiota during a critical developmental window has lasting metabolic consequences [La modification du microbiote intestinal au cours d'une période critique du développement a des conséquences métaboliques durables]. Cell, 2014. 158(4): p. 705-721. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.052>.

21 Arrieta, M.C., et al., Early infancy microbial and metabolic alterations affect risk of childhood asthma [Les modifications microbiennes et métaboliques survenant au tout début de la petite enfance ont une incidence sur le risque d'asthme infantile]. Sci Transl Med, 2015. 7(307): p. 307ra152. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aab2271>.

22 Dominguez-Bello, M.G., et al., Partial restoration of the microbiota of cesarean-born infants via vaginal microbial transfer [Restauration partielle du microbiote des nourrissons nés par césarienne grâce à un transfert microbien vaginal]. Nat Med, 2016. 22(3): p. 250-3. <https://doi.org/10.1038/nm.4039>.

23 Boudaud, M., et al., Biodiversité du microbiote intestinal et alimentation moderne - Impact en santé humaine. Med Sci (Paris), 42 1 (2026) 65-70 DOI: <https://doi.org/10.1051/medsci/2025253>.

24 Turnbaugh, P.J., et al., An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest [Un microbiome intestinal associé à l'obésité et doté d'une capacité accrue à récupérer de l'énergie]. Nature, 2006. 444(7122): p. 1027-31. <https://doi.org/10.1038/nature05414>.



Marqueurs microbiens de la dysbiose

Les dysbioses se caractérisent généralement par la perte d'espèces clés du noyau fonctionnel et par la prolifération de pathobiontes opportunistes. L'absence d'espèces spécifiques est associée à des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, ou encore à une réduction de l'intégrité de la barrière intestinale²⁵. Les pathobiontes peuvent être épidémiques, résidents ou ectopiques, issus de la flore orale et impliqués dans les colites et le cancer colorectal²⁶.

Des études pionnières ont montré une réduction de la diversité microbienne dans certaines pathologies, notamment la maladie de Crohn, caractérisée par l'absence de certaines bactéries, ainsi que des perturbations durables induites par les antibiotiques²⁷. Ces travaux proposaient un lien étroit entre dysbiose et risque de maladies chroniques.

VERS UNE MÉDECINE MICROBIENNE INTÉGRATIVE : RESTAURER LA SYMBIOSE

Ces observations plaident pour la mise en place d'une surveillance mondiale standardisée de l'évolution des microbiotes humains, en particulier dans les populations en transition économique. Des approches innovantes, comme l'analyse métagénomique des eaux usées, permettent d'appréhender le « microbiote urbain » et de le corrélérer à la consommation médicamenteuse²⁸.

L'écologie microbienne devenue moléculaire permet désormais d'analyser directement les communautés microbiennes à partir de leur matériel génétique, mais se double de capacités fonctionnelles grâce à la culturomique. Cette complémentarité est essentielle pour comprendre

la logique des réseaux trophiques qui maintient la cohésion des microbiotes. L'apport de l'Intelligence Artificielle (IA) s'avère essentiel à ces études qui nécessitent de mettre en cohérence la quantité massive et la diversité déroutante des données recueillies au cours de tels travaux.

La « médecine microbienne » vise à restaurer une symbiose fonctionnelle entre l'hôte et son microbiome. Elle ne se limite pas à la correction de la dysbiose, mais intègre également des paramètres de l'hôte tels que l'inflammation, la perméabilité intestinale et le stress oxydant. Les approches incluent l'usage raisonné des probiotiques de nouvelle génération, de prébiotiques, d'interventions alimentaires ciblées et de transplantations de microbiote fécal.

Il est clair cependant que la logique guidant les approches actuelles demeure largement empirique. Elle le demeurera tant que manquera la connaissance de la logique sous-tendant la composition de l'écosystème intestinal, en particulier la connaissance de la nature des réseaux trophiques maintenant sa cohésion fonctionnelle en relation avec sa niche. Seul ce déchiffrement paraît pouvoir garantir « l'ingénierie microbiomique » assurant la résistance et la résilience de l'écosystème réparé.

Au-delà du microbiote humain, une approche multi-échelles et multidisciplinaire va s'avérer incontournable afin de suivre l'évolution des écosystèmes microbiens, quels qu'ils soient, sous les effets des changements climatiques et de l'impact écologique croissant des interventions humaines sur la planète, l'anthropocène.

CONCLUSION – UNE NOUVELLE FRONTIÈRE MÉDICALE

La perte de diversité du microbiote humain à l'ère de l'anthropocène représente un défi sanitaire majeur. L'émergence de la médecine microbienne s'inscrit dans une vision écologique et systémique de la santé, où l'humain est envisagé comme un holobionte. Seule la combinaison d'études expérimentales rigoureuses, d'essais cliniques contrôlés et d'approches intégrées, qui génère une masse de données imposant l'usage de l'intelligence artificielle, permettra de définir les applications thérapeutiques réalistes de cette discipline en plein essor.

25 Cani, P.D., et al., Akkermansia muciniphila: paradigm for next-generation beneficial microorganisms [Akkermansia muciniphila : un modèle pour la nouvelle génération de micro-organismes bénéfiques]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2022. 19(10): p. 625-637. <https://doi.org/10.1038/s41575-022-00631-9>.

26 Koliarakis, I., et al., Oral Bacteria and Intestinal Dysbiosis in Colorectal Cancer [Bactéries buccales et dysbiose intestinale du cancer colorectal]. Int J Mol Sci, 2019. 20(17). <https://doi.org/10.3390/ijms20174146>.

27 Dethlefsen, L., et al., The pervasive effects of an antibiotic on the human gut microbiota, as revealed by deep 16S rRNA sequencing [Les effets généralisés d'un antibiotique sur le microbiote intestinal humain, mis en évidence par un séquençage approfondi de l'ARN ribosomique 16S]. PLoS Biol, 2008. 6(11): p. e280. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060280>.

28 Marechal, V., et al., Wastewater-based epidemiology: Retrospective, current status, and future prospects [Épidémiologie basée sur les eaux usées : rétrospective, état des lieux et perspectives d'avenir]. Anaesth Crit Care Pain Med, 2023. 42(5): p. 101251. <https://doi.org/10.1016/j.accpm.2023.101251>.

À propos de l'auteur

Philippe Sansonetti est professeur émérite à l'Institut Pasteur et au Collège de France, et membre de l'Académie des sciences depuis 2001, dont il préside la section Biologie humaine et sciences médicales. Fondateur de la microbiologie cellulaire des infections, il a élucidé les mécanismes d'invasion de Shigella, établissant ce pathogène comme modèle majeur des interactions hôte-pathogène. Ses travaux ont renouvelé la compréhension de l'immunité innée et conduit au développement de candidats vaccins contre la shigellose. Il s'est aussi intéressé au rôle pathogène des dysbioses intestinales. Il est également l'auteur de plusieurs ouvrages, dont Le retour des épidémies, Vaccins, Tempête parfaite, Tu aimeras tes microbes comme toi-même et Microbes sans Frontières.





Se soigner en s'inspirant de la nature :

Quelle place pour le biomimétisme dans la médecine moderne ?

Peter Stenvinkel

Professeur de néphrologie à l'Institut Karolinska de Stockholm

Le changement climatique affecte la santé à l'échelle mondiale en intensifiant le stress thermique et hydrique, l'insécurité alimentaire et la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes. Ces facteurs contribuent à l'augmentation des maladies cardiovasculaires, rénales, respiratoires et métaboliques. Les atteintes rénales, en particulier, se multiplient sous l'effet combiné de la chaleur et de la pollution croissante.

Face à cette dégradation du paysage sanitaire, le présent article explore des approches inspirées de la nature, notamment le biomimétisme, qui s'appuie sur les stratégies développées par les systèmes biologiques. Certains animaux présentent en effet une résistance remarquable à des conditions qui s'avèrent particulièrement délétères pour l'être humain, telles que l'ischémie ou les températures extrêmes. C'est le cas, par exemple, des ours, des rats-taupes nus ou encore des éléphants de mer. L'étude de leurs mécanismes d'adaptation pourrait ouvrir la voie à de nouvelles approches thérapeutiques pour prévenir ou traiter des maladies chroniques, notamment celles aggravées par le changement climatique. Toutefois, la recherche médicale biomimétique demeure encore insuffisamment financée et développée, tandis que l'érosion de la biodiversité menace ce réservoir unique d'innovations biologiques.

Dans ce contexte, la protection des écosystèmes, associée à une transformation des régimes alimentaires et des systèmes de santé, apparaît essentielle pour construire des systèmes de santé plus résilients face au changement climatique.

POUVEZ-VOUS EXPLIQUER BRIÈVEMENT EN QUOI LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DÉGRADE LA SANTÉ HUMAINE ?

Le changement climatique affecte considérablement la santé humaine à l'échelle mondiale car il amplifie le stress thermique et hydrique, l'insécurité alimentaire et les phénomènes météorologiques extrêmes. Le panorama sanitaire évolue, la chaleur exacerbant les troubles cardiovasculaires, rénaux, respiratoires et liés au diabète, avec une hausse spectaculaire des décès qui y sont associés, estimés à 175 000 par an seulement en Europe¹.

Les lésions et maladies rénales sont également en hausse, avec 15 % de la population mondiale qui présente des signes de maladie rénale. Les reins agissant comme des filtres pour les polluants environnementaux, ils sont particulièrement vulnérables à la pollution et à la chaleur. Une épidémie de néphropathie mésoaméricaine, qui provoque une insuffisance rénale mortelle, touche actuellement les ouvriers agricoles qui travaillent dans des conditions de chaleur extrême, en Amérique centrale, au Sri Lanka et dans de nombreux autres pays².

Cette hausse des maladies environnementales est entièrement due à l'organisation anthropique des sociétés actuelles. Centrée sur les bénéfices à court terme, l'utilisation intensive des ressources et la consommation linéaire des biens, elle contribue au changement climatique et à une perte catastrophique de la biodiversité. Pour préserver notre santé, il est essentiel de construire une organisation biomimétique, afin de nous inspirer de la nature dans nos activités : utilisation des ressources, habitudes alimentaires ou médecine. Évoluer vers une organisation centrée sur la nature nous aiderait à mieux gérer les risques pour notre santé sur une planète aux ressources limitées.

QU'ENTENDEZ-VOUS PAR « NOUS INSPIRER DE LA NATURE » ?

L'idée consistant à résoudre les problèmes humains en nous inspirant de la nature est connu sous le nom de « biomimétisme », un terme forgé par le Dr. Janine Benyus, docteure en biologie et fondatrice du *Biomimicry Institute*, dont les travaux m'ont incité à m'intéresser à ce sujet.

Le biomimétisme est intrinsèquement interdisciplinaire. De tout temps, les humains ont observé la nature pour s'en inspirer, par exemple le vol des oiseaux pour concevoir les premières machines volantes. Aujourd'hui, des outils technologiques avancés nous permettent d'analyser les systèmes naturels à un niveau de détail sans précédent et à appliquer ces connaissances dans pratiquement tous les domaines. Par

1 Johnson, D. (2 août 2024). Heat claims more than 175,000 lives annually in Europe, latest data shows [La chaleur est responsable de plus de 175 000 décès par an en Europe, selon les données les plus récentes. UN News. <https://news.un.org/en/story/2024/08/1152766>.

2 Sorensen C. et Garcia-Trabanino R. A New Era of Climate Medicine — Addressing Heat-Triggered Renal Disease. *New England Journal of Medicine* [Une nouvelle ère de la médecine climatique : traiter les maladies rénales induites par la chaleur]. <https://doi.org/10.1056/nejmp1907859>.

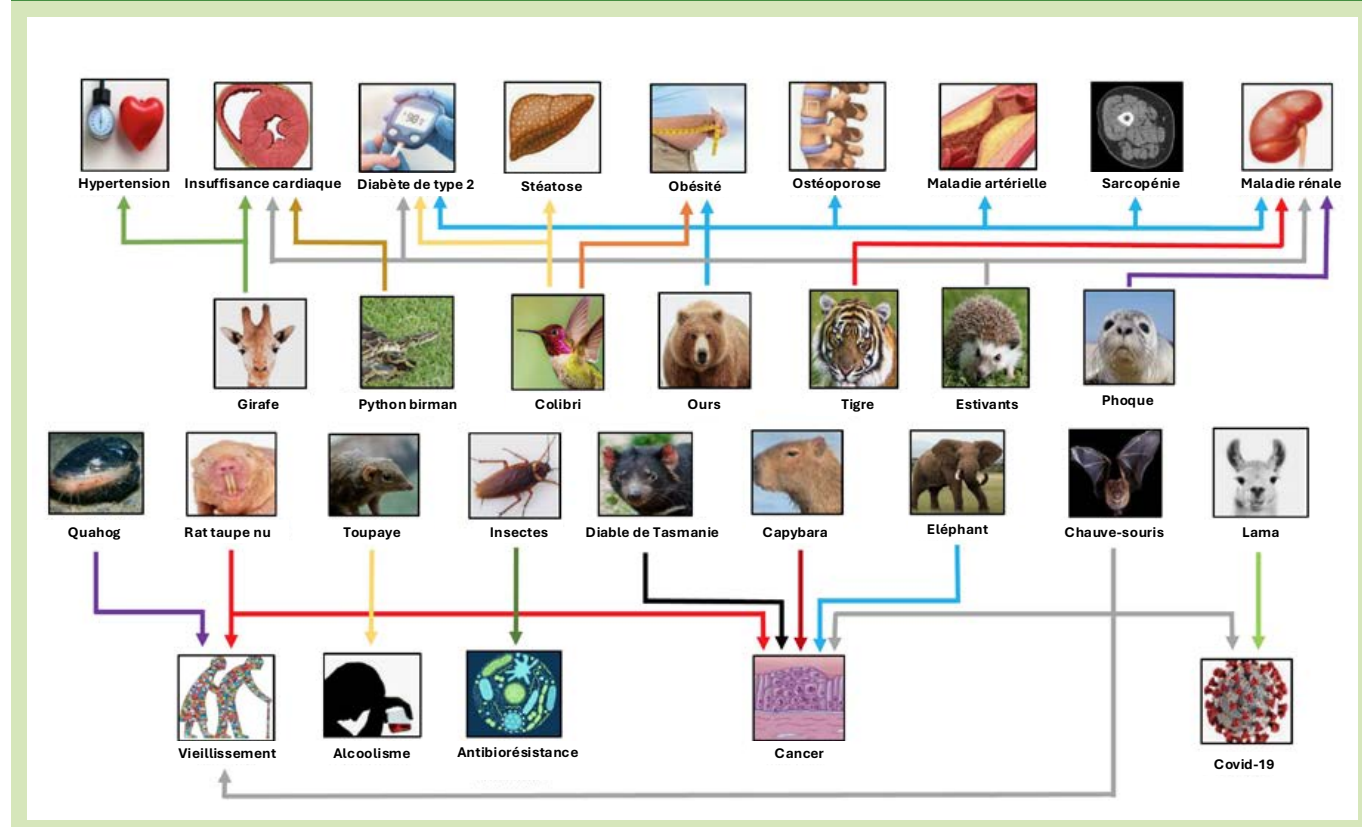


La médecine offre elle aussi de nombreux exemples de biomimétisme, par exemple les surfaces imitant la peau de requin, qui réduisent l'adhérence bactérienne³, ou les aiguilles inspirées du dard des moustiques, des abeilles et des guêpes, qui réduisent la force nécessaire à la perforation et améliorent la maniabilité⁴. Compte tenu du trésor de connaissances pratiquement infini que recèle le règne animal, et notamment des solutions médicales, le biomimétisme pourrait nous aider à relever les défis sanitaires exacerbés par le changement climatique.

LE BIOMIMÉTISME PEUT-IL NOUS AIDER À AMÉLIORER LA SANTÉ HUMAINE, NOTAMMENT FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

De nombreuses espèces possèdent des mécanismes qui les protègent contre certaines maladies auxquelles les humains sont vulnérables. Les mammifères hibernants, tels que les ours ou les écureuils, ne souffrent pas d'ischémie, une affection fréquente et potentiellement mortelle pour les humains, qui se caractérise par une restriction de l'apport sanguin dans une partie du corps ou un organe. Autres exemples : les chauves-souris, qui tolèrent des virus dévastateurs pour les humains ; les éléphants, qui semblent résister au cancer ; les requins du Groenland, qui vivent au ralenti pendant 400 à 500 ans ; les girafes, qui vivent sans problème avec une pression artérielle qui affolerait nos médecins ; ou ces méduses qui semblent pratiquement immortelles⁵.

Quelques exemples d'espèces ayant fourni des pistes permettant de cibler des maladies liées au mode de vie et au vieillissement, telles que l'alcoolisme, la COVID-19 et la résistance aux antibiotiques, l'insuffisance cardiaque congestive (ICC) ou le diabète sucré (DS)⁶



4 Yichi M, Xiao X, Hongliang R, Max Q-H. Meng. A review of bio-inspired needle for percutaneous interventions, Biomimetic Intelligence and Robotics [Revue des aiguilles bio-inspirées pour les interventions percutanées, Intelligence biomimétique et robotique], volume 2, numéro 4, 2022, 100064, ISSN 2667-3797. <https://doi.org/10.1016/j.biorob.2022.100064>.

5 Stenvinkel P, Kotanko P, Painer-Gigler J, Shiels PG, et al. Diabetologia. Comparative physiology and biomimetics in metabolic and environmental health: what can we learn from extreme animal phenotypes? [Physiologie comparée et biomimétisme en santé métabolique et environnementale : que pouvons-nous apprendre des phénotypes animaux extrêmes ?] Février 2026 ; 69(2):295-307. <https://doi.org/10.1007/s00125-025-06611-3>.

Plusieurs espèces, telles que le rat-taupe nu, sont également protégées contre l'inflammation chronique et le stress oxydatif, qui jouent un rôle dans de nombreuses maladies chroniques liées au mode de vie et au vieillissement, comme le diabète de type 2, l'obésité, l'insuffisance cardiaque congestive ou le cancer⁶, ou aggravées par le changement climatique.

Autres exemples : le chameau, la baleine bleue ou la grenouille des bois, qui ont appris à supporter des températures extrêmes (hautes ou basses) et la pénurie d'eau sans subir de troubles physiologiques. L'étude des mécanismes permettant ces capacités exceptionnelles pourrait s'avérer très utile face à la hausse des températures mondiales induite par le changement climatique.

POURRIEZ-VOUS NOUS EN DIRE UN PEU PLUS SUR CERTAINS EXEMPLES CITÉS ?

Les ours présentent un métabolisme remarquable pendant leur hibernation. Cet état, qui reste énigmatique à nos yeux, pourrait nous aider à comprendre les maladies métaboliques, notamment la résistance réversible à l'insuline et l'homéostasie énergétique. Les ours sont également protégés contre les complications thromboemboliques^{7,8} (l'obstruction des vaisseaux sanguins par des caillots, généralement dans les membres inférieurs) qui touchent les humains quand ils restent longtemps immobiles.

Le rat-taupe nu mentionné ci-dessus, un rongeur qui peut vivre jusqu'à cinq fois plus longtemps que les rongeurs de taille similaire, présente une particularité : son risque de mortalité n'augmente pas avec l'âge, contrairement aux humains. Il est donc protégé contre les maladies liées à l'âge, telles que le cancer et les maladies vasculaires⁹. Nous ne connaissons pas encore les mécanismes exacts qui contribuent à cette extraordinaire résilience, mais elle pourrait s'expliquer en partie par la capacité de l'animal à maintenir des niveaux élevés du facteur respiratoire nucléaire 2 (Nrf2). Pour dire les choses simplement, le Nrf2 est une protéine qui régule la transcription des gènes qui protègent contre le stress oxydatif et l'inflammation, responsables de nombreuses maladies, et contre le processus de vieillissement. L'étude et la compréhension du rôle du Nrf2 dans le métabolisme du rat-taupe nu permettrait de réaliser des avancées décisives dans la lutte contre de nombreuses maladies qui s'accroissent avec l'âge et de trouver comment prolonger la durée de vie en bonne santé des êtres humains.



Les os d'un ours en hibernation sont examinés par tomographie. © Peter Stenvinkel

Dans ma propre spécialité, la néphrologie, les éléphants de mer ont des capacités surprenantes de vasoconstriction, notamment dans les reins. Ainsi, le flux sanguin et l'apport en oxygène privilégient le cœur et le cerveau⁷. Une capacité intéressante pour certaines espèces de phoques, comme les éléphants de mer, qui peuvent rester sous l'eau jusqu'à 100 minutes au cours d'une plongée. Pendant la plongée, les reins de l'animal ne sont plus irrigués et cessent de fonctionner, pour reprendre des fonctions normales quand il remonte à la surface, sans aucune lésion. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer cette résistance inhabituelle des éléphants de mer aux lésions rénales aiguës ischémiques, comme un métabolisme anaérobie (privé d'oxygène) mieux adapté. L'étude de ces mécanismes pourrait fournir des informations précieuses pour prévenir les lésions rénales ischémiques, par exemple chez les humains subissant une opération chirurgicale prolongée.

6 Stenvinkel P, Avesani CM, Gordon LJ, Schalling M et Shiels PG. Biomimetics provides lessons from nature for contemporary ways to improve human health [La biomimétique offre des enseignements issus de la nature pour des approches contemporaines visant à améliorer la santé humaine]. *Journal of Clinical and Translational Science* 5: e128, 1–14. <https://doi.org/10.1017/cts.2021.790>.

7 Stenvinkel P, Johnson RJ. Kidney biomimicry—a rediscovered scientific field that could provide hope to patients with kidney disease [La biomimétique rénale — un domaine scientifique redécouvert susceptible d'apporter un espoir aux patients atteints de maladies rénales]. *Arch Med Res*. Novembre 2013 ; 44(8):584–90. doi: 10.1016/j.arcmed.2013.10.008.

8 Stenvinkel P, Painer J, Kuro-O M, Lanasa M, Arnold W, et al. Novel treatment strategies for chronic kidney disease: insights from the animal kingdom [Nouvelles stratégies thérapeutiques pour la maladie rénale chronique : enseignements issus du règne animal]. *Nat Rev Nephrol*. Avril 2018 ; 14(4):265–284. <https://doi.org/10.1038/nrneph.2017.169>.

9 Stenvinkel P, Shiels P. Long-lived animals with negligible senescence: Clues for ageing research [Animaux à longue longévité présentant une sénescence négligeable : indices pour la recherche sur le vieillissement]. *Biochemical Society Transactions*. 2019, 47. BST20190105. 10.1042/BST20190105. <https://doi.org/10.1042/bst20190105>.



ÉTANT DONNÉES CES OPPORTUNITÉS PASSIONNANTES, QUEL EST LE STATUT ACTUEL DE LA RECHERCHE MÉDICALE EN BIOMIMÉTISME ?

Le biomimétisme trouve son écho dans de nombreux domaines de la médecine, tels que la médecine régénérative, la préservation des organes, la tolérance immunitaire, la résistance à l'hypoxie et le contrôle de la fibrose. Les obstacles ne sont pas liés au manque d'idées mais plutôt aux difficultés de transposition. Malheureusement, malgré le trésor de connaissances que recèle la biodiversité et ses promesses pour notre santé, de nombreuses limites entravent les progrès de la recherche médicale en biomimétisme. Tout d'abord, cette discipline reste sous-développée par rapport à d'autres disciplines, telles que la chimie et la technologie. Les financements ne sont pas faciles à obtenir. En collaboration avec des scientifiques d'autres universités européennes, j'ai tenté pendant trois ans d'obtenir un financement de l'Union européenne pour un projet de recherche biomimétique interdisciplinaire sur le traitement des maladies chroniques liées au mode de vie, mais en vain.

En outre, la recherche biomimétique est intrinsèquement limitée. C'est un domaine très complexe, à la croisée de plusieurs disciplines complexes elles aussi (médecine, médecine vétérinaire et biologie) et il existe de nombreux obstacles quand il s'agit de transposer sur un humain un trait découvert chez un animal. Et comme le biomimétisme nécessite l'étude d'animaux sauvages et affecte le corps humain, il est régi par une réglementation stricte et nécessite une supervision éthique.

De plus, en raison de sa complexité, la recherche en biomimétisme suit un processus moins rapide que les études purement cliniques : il peut s'écouler plusieurs décennies entre le début des recherches et le traitement. Cette lenteur, combinée à la perte massive de biodiversité causée par notre organisation anthropique, menace l'avenir du biomimétisme. Le WWF a récemment signalé que le volume moyen des populations d'animaux sauvages avait diminué de 73 % au cours des 50 dernières années¹⁰. Ce constat, déjà dramatique en termes environnementaux, sociaux et économiques, signifie aussi la perte définitive d'espèces et de mécanismes précieux, qui pourraient apporter des solutions à de graves problèmes humains. La diversité ne se résume pas à un nombre d'espèces. C'est une partie de l'histoire de l'évolution que nous perdons avec chaque espèce animale qui disparaît de notre planète. La biodiversité n'est donc pas un luxe environnemental, mais le fondement même de la santé humaine. Elle soutient nos systèmes alimentaires, nos médicaments, la pureté de l'air et de l'eau, la régulation du climat et notre bien-être psychologique.

Pour que le biomimétisme prenne la place qui lui revient dans la recherche médicale, les recherches futures doivent être interdisciplinaires. Elles doivent réunir des médecins, des vétérinaires, des écologistes, des biologistes et tous les chercheurs dont l'expertise pourrait combler le fossé entre la santé animale et la santé humaine

MALGRÉ TOUT, QUELLES LEÇONS POUVONS-NOUS RETIRER AUJOURD'HUI DU BIOMIMÉTISME SUR LE PLAN DE LA SANTÉ ET DE LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

La principale leçon que nous enseignent la biodiversité en matière de santé porte sur nos habitudes alimentaires. Les humains sont omnivores et notre tube digestif n'est probablement pas conçu pour manger de la viande rouge tous les jours. En effet, un lien direct a été constaté, tant chez les humains que chez les animaux, entre la consommation de viande rouge et un risque élevé de maladie rénales chroniques (MRC)⁸. Cela s'observe également dans le règne animal : les mammifères ayant la plus longue espérance de vie et les moins exposés au risque de cancer sont les herbivores, alors que des liens ont été établis chez les carnivores entre un risque de cancer nettement plus élevé et la consommation de mammifères¹¹.

Depuis sa création, la Commission EAT-Lancet plaide fortement en faveur d'une réorientation des systèmes alimentaires et des politiques alimentaires vers « un régime de santé planétaire », fondé sur des critères de santé, riche en fruits et légumes, comprenant une quantité modérée de produits d'origine animale (poisson, produits laitiers et viande) et une consommation minimale de sucre, de sel et de graisses saturées¹². L'adoption d'un régime alimentaire de ce type à l'échelle mondiale pourrait prévenir le décès de 7 à 10 millions d'adultes chaque année. Ce régime pourrait

contribuer à réduire les maladies liées à l'alimentation (comme le diabète de type 2 ou les maladies cardiovasculaires) et présenterait aussi l'avantage significatif de limiter le changement climatique et la pression humaine sur la biodiversité. En effet, selon les estimations actuelles, les émissions de gaz à effet de serre induites par la production d'un kilo de bœuf (25-30 ktCO₂eq) seraient plus de cinquante fois supérieures à celles générées par la production d'un kilo de légumes (0,2-2,0 ktCO₂eq)¹³. En adoptant ce « régime de santé planétaire » à l'échelle mondiale, les émissions alimentaires mondiales diminueraient de 17 %¹⁴. Il est urgent

d'adopter une transformation radicale du système alimentaire mondial, et cette responsabilité n'incombe pas seulement aux gouvernements et aux institutions : elle commence dans nos assiettes.

11 Vincze O, Colchero F, Lemaître JF. et al. Cancer risk across mammals [Risque de cancer chez les mammifères]. Nature 601, 263–267 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04224-5>.

12 Rockström J, Thilsted S, Willett W et al. The EAT–Lancet Commission on healthy, sustainable, and just food systems [La Commission EAT–Lancet sur des systèmes alimentaires sains, durables et équitables]. The Lancet, 2025; 406, 1625–1700.

13 Springmann M. (2025). Many diets for many people: planetary health diets and their health and environmental impacts at global, regional, national, and demographic levels [prépublication] [De nombreux régimes pour de nombreuses populations : les régimes de santé planétaire et leurs effets sur la santé et l'environnement aux niveaux mondial, régional, national et démographique (prépublication)]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079404>.

14 Li Y, He P, Shan Y. et al. Reducing climate change impacts from the global food system through diet shifts. [Réduire les impacts du changement climatique liés au système alimentaire mondial grâce à des changements d'habitudes alimentaires]. Nat. Clim. Chang. 14, 943–953 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02084-1>.



SELON VOUS, QUELS CHANGEMENTS FAUDRAIT-IL APPORTER À LA RECHERCHE MÉDICALE POUR MIEUX INTÉGRER LE BIOMIMÉTISME ?

Aujourd'hui, les liens sont évidents entre le changement climatique, la santé et les inégalités : il n'est plus possible de cloisonner les réflexions et les recherches. Pour que le biomimétisme prenne la place qui lui revient dans la recherche médicale, les recherches futures doivent être interdisciplinaires. Elles doivent réunir des médecins, des vétérinaires, des écologistes, des biologistes et tous les chercheurs dont l'expertise pourrait combler le fossé entre la santé animale et la santé humaine. Cela permettrait de concevoir des études cliniques en collaboration avec différents experts : des écologistes et des biologistes, associés à des cliniciens, pourraient élaborer des protocoles d'études physiologiques comparatives, incluant dans la population étudiée des espèces animales présentant des caractéristiques ou des mécanismes pertinents pour la recherche. Par exemple, une étude clinique sur des patients alités ou sédentaires présentant un risque élevé de complications thromboemboliques pourrait inclure le cas des ours en hibernation, qui sont protégés contre de telles complications, en vue de comparer les différences entre ces modèles.



© Rohan Sethi

Ce changement de paradigme devrait également être mis en œuvre dans les programmes d'études médicales, qui ne comportent actuellement aucune étude sur l'environnement et la santé animale. Dr. Barbara Natterson-Horowitz, cardiologue à la Harvard Medical School et à UCLA, fervente partisane du biomimétisme, réclame depuis longtemps l'intégration de ces concepts dans l'enseignement médical. Cela pourrait prendre la forme de modules sur la santé animale et les perspectives en matière de santé environnementale, de présentations comparatives des maladies chez différentes espèces ou d'études en partenariat avec des vétérinaires¹⁵. Ces changements permettraient d'étudier la biodiversité de manière rigoureuse et de réaliser les avancées médicales mentionnées plus haut.

POUR CONCLURE CET ENTRETIEN, AVEZ-VOUS UNE DERNIÈRE REMARQUE SUR L'AVENIR DE LA BIOMIMÉTIQUE EN MÉDECINE ?

Comme l'a déclaré Albert Einstein : « Regardez profondément dans la nature, et alors vous comprendrez tout beaucoup mieux ». La santé est le nouveau visage du changement climatique, et la biodiversité nous offre une source d'inspiration immense sur la façon dont nous devrions vivre, construire, nous alimenter et nous soigner. C'est désormais prouvé : manger moins de viande et préserver la biodiversité a des effets bénéfiques pour la planète et pour notre santé. Il est donc essentiel, et vital, que nos politiques commencent à intégrer la nature et ses solutions ingénieuses. N'oublions pas que la nature résout des problèmes médicaux et environnementaux complexes depuis des millions d'années. La question qui se pose à nous aujourd'hui est de savoir si nous sommes prêts à intégrer l'intelligence biologique à la science pour identifier les connexions existantes, avant qu'il ne soit trop tard¹⁶.

¹⁵ Rabinowitz P, Natterson-Horowitz B, Kahn L, Koc R, Pappaoanou, M. (2017). Incorporating one health into medical education. BMC Medical Education [Intégrer l'approche « One Health » dans la formation médicale. BMC Medical Education]. 17. 10.1186/s12909-017-0883-6. <https://doi.org/10.1186/s12909-017-0883-6>. (PDF) Incorporating one health into medical education [Intégrer l'approche One Health dans la formation médicale].

¹⁶ Stenvinkel P. Learning from nature. The power of biological intelligence [Apprendre de la nature. La puissance de l'intelligence biologique]. Publié par Lava, 2025.

À propos de l'auteur

Dr Peter Stenvinkel a obtenu son doctorat en médecine rénale en 1994 à l'Institut Karolinska (Stockholm). Professeur de néphrologie de renommée mondiale, il a reçu plusieurs prix et bourses, et un titre de docteur honoris causa. Il mène des recherches translationnelles axées sur les facteurs de risque de complications métaboliques, cardiovasculaires et nutritionnelles dans les maladies rénales chroniques (MRC). Peter Stenvinkel s'intéresse au biomimétisme depuis plus de dix ans. Il travaille depuis lors avec un groupe de recherche composé d'experts multidisciplinaires qui s'intéressent aux mécanismes métaboliques qui protègent certaines espèces contre les changements environnementaux, dans le but de découvrir de nouvelles thérapies.





Le prix sanitaire des atteintes à la biodiversité



Le Plan stratégique pour la diversité biologique 2011-2020, et les Objectifs d'Aichi, formulés en 2010 par la Convention sur la diversité biologique, devaient structurer l'action internationale en faveur de la protection des écosystèmes essentiels à la santé humaine. L'échec de ces objectifs, en particulier celui de l'objectif n°14 consacré à la restauration et à la sauvegarde des écosystèmes contribuant à la santé, à l'accès à l'eau et au bien-être, met en évidence une incapacité collective à enrayer le déclin des services écologiques fondamentaux. La poursuite de cette trajectoire se traduit par une dégradation continue de la capacité des écosystèmes à fournir ces services, affectant de manière disproportionnée les populations pauvres et vulnérables, et confirmant que la perte de biodiversité constitue un déterminant structurel majeur de la santé humaine, au delà d'un simple enjeu environnemental¹.

« La santé des humains, la santé des animaux et la santé de l'environnement sont inextricablement liées. Nous ne pouvons pas protéger l'une d'elles sans protéger les trois » rappelle Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus, Directeur général de l'OMS, lors d'une allocution à l'occasion du *One Health Summit* du 7 avril 2026². En effet, *The Lancet*³ souligne que la dégradation du vivant ne se limite pas à un affaiblissement des écosystèmes, mais qu'elle modifie en profondeur les conditions de prévention, d'innovation médicale et de bien être. C'est cette dimension sanitaire, souvent sous-estimée, que cette seconde partie se propose d'examiner.

En premier lieu, trois courts articles mettent en évidence trois types de pollutions anthropiques, la dégradation qu'elles causent dans les milieux naturels et l'exposition accrue des populations humaines et animales aux risques sanitaires multiples qui en découlent. **Saija Saarni** analyse comment les microplastiques, omniprésents dans tous les écosystèmes, perturbent les organismes vivants et alimentent de nouvelles préoccupations toxicologiques. **Marie-Cécile Ploy**

explore la contribution de l'utilisation, excessive ou à mauvais escient, de produits médicamenteux à l'émergence et à l'accélération d'une menace sanitaire globale, la résistance aux antimicrobiens. Enfin, **Lars-Eric Heimbürger-Boavida** met en perspective l'histoire, et les effets à long terme du contaminant persistant qu'est le mercure, depuis sa bioaccumulation dans les chaînes alimentaires jusqu'à ses conséquences sanitaires pour les populations les plus vulnérables.

Ensuite, **Franck Courchamp** et **Christophe Diagne** analysent comment la multiplication des échanges et des déplacements d'espèces à l'échelle mondiale favorise les invasions biologiques. Les espèces ainsi introduites peuvent transformer durablement les écosystèmes tout en générant des impacts sanitaires souvent sous-estimés. Au-delà des maladies infectieuses fréquemment associées aux invasions, les espèces invasives produisent une diversité d'effets sur la qualité de l'environnement, le bien-être des populations et la résilience des territoires.

L'identification, en mai 2026, de plusieurs cas d'infection à un hantavirus à bord d'un bateau de croisière a remis en lumière les risques que représentent les zoonoses. La transformation des écosystèmes par les activités humaines modifie et accentue les dynamiques de transmission des agents pathogènes. **Gerard Killeen** explore les risques d'émergence de maladies infectieuses en Tanzanie dès lors que les humains et les animaux se côtoient, et comment les communautés locales agissent pour ériger des barrières efficaces en protégeant la biodiversité. Enfin, **Tamara Szentivanyi** examine comment la fragmentation des habitats et la perte de diversité biologique en Europe se traduisent par une intensification des maladies aviaires et une augmentation des risques de transmission à l'homme.

- 1 Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2020) Perspectives mondiales de la diversité biologique 5 – Résumé à l'intention des décideurs, p.12. <https://digiplace.sharepoint.com/sites/WE-RevueFactsReports2026-InstitutVeoliaAxaSanofi/Documents%20partages/Forms/AllItems.aspx?FolderCTID=0x01200073D82F5CC61CEE428C33A39560490DCC&id=%2Fsites%2FWE%2DRevueFactsReports2026%2DInstitutVeoliaAxaSanofi%2FDocuments%20partages%2F03%20%2D%20D%20C3%A9roulement%20mission%2F05%2E%20Introductions%20des%20parties%2FIntros%20de%201%27ann%C3%A9e%20derni%C3%A8re%20pour%20inspiration>.
- 2 Allocution de clôture du Directeur général de l'OMS au *One Health Summit* – 7 avril 2026. <https://www.who.int/fr/news-room/speeches/item/who-director-general-s-closing-remarks-at-the-one-health-summit---7-april-2026>.
- 3 *The Lancet* (2024) Biodiversity loss: a health crisis [La perte de biodiversité : une crise sanitaire]. [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(24\)02350-X/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(24)02350-X/fulltext).



Microplastiques : De l'innovation au risque pour la biodiversité

Dr Saija Saarni : Professeure agrégée de géologie environnementale appliquée à l'Université de Turku, Finlande

L'ère moderne se caractérise par un développement rapide et une vague d'innovations, la science des matériaux et la chimie étant à l'avant-garde de ces progrès. Les risques associés sont apparus plus tard : dès les années 1970, cette prise de conscience a conduit à diverses mesures réglementaires, telles que l'interdiction du DDT¹ pour protéger la biodiversité et de l'amiante pour préserver la santé humaine. Des microplastiques ont été observés en mer depuis les années 1970², mais ce n'est qu'en 2004 que le biologiste Richard Thompson a introduit le terme « microplastique » et mis en évidence les risques potentiels pour le plancton³. Depuis, notre compréhension des risques qu'ils représentent pour les milieux naturels s'est considérablement améliorée, donnant lieu à des initiatives et législations aux niveaux national et international, notamment l'interdiction des plastiques à usage unique dans l'Union européenne en 2021⁴, ciblant les produits les plus fréquemment retrouvés sur les plages (par exemple couverts, pailles et assiettes en plastique).

La production cumulée de matières plastiques a récemment dépassé les 10 milliards de tonnes, dont seule une infime fraction est incinérée, et moins de 10 % recyclée⁵. Le reste se retrouve en décharge ou dispersé dans les écosystèmes naturels. Une fois introduit dans l'environnement, le plastique se dégrade et se fragmente en petites particules sous l'effet de processus chimiques et de forces physiques telles que l'action des vagues. On appelle microplastiques les particules dont la taille est inférieure ou égale à 5 millimètres.

Certains microplastiques sont également fabriqués intentionnellement, notamment les granulés qui constituent la matière première dans l'industrie du plastique. Cependant, les principales sources de pollution de l'environnement par les microplastiques restent le secteur du transport (peintures et usure des pneus), les textiles synthétiques, les emballages en plastique, l'agriculture et le secteur maritime (revêtements et matériel de pêche).

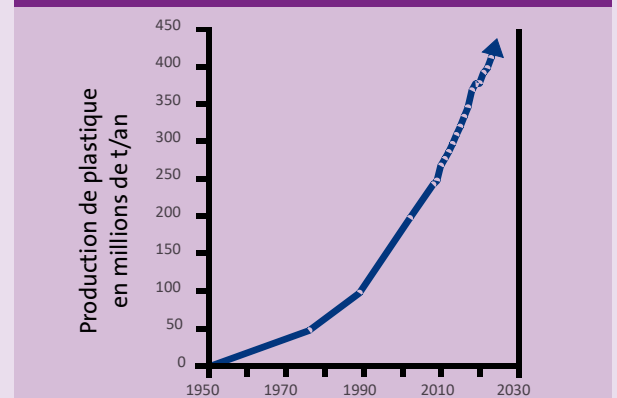
PETITES PARTICULES, GRANDES QUESTIONS

Les particules de microplastiques représentent toutes sortes de menaces pour les écosystèmes terrestres et aquatiques, car elles sont ingérées par un large éventail d'organismes, depuis le plancton jusqu'aux baleines. Une fois ingéré,

le plastique n'est pas digéré et peut s'accumuler dans le tube digestif des animaux. Il peut alors provoquer des obstructions et induire une fausse sensation de satiété, ce qui peut conduire à la famine. Il a aussi été démontré que les microplastiques provoquent du stress oxydatif et des inflammations, réduisant ainsi la condition physique, la croissance et la survie des organismes affectés⁶. Ils peuvent également diminuer la capacité de reproduction d'espèces de plancton importantes, ce qui déstabilise la base de réseaux trophiques aquatiques entiers et menace la biodiversité. C'est notamment le cas dans des zones déjà vulnérables qui sont des sites de reproduction essentiels, telles que les zones côtières, les lagunes et les estuaires.

La production mondiale de plastique devrait presque doubler d'ici 2050, mais on ignore à quelle vitesse cette hausse se répercutera sur les niveaux de microplastiques dans les écosystèmes de demain.

La production mondiale de plastique a connu une croissance rapide depuis le début des années 1950



DES ENVAHISSEURS INVISIBLES

On retrouve des microplastiques partout, dans l'environnement, mais aussi dans le corps humain (intestins, poumons, foie, reins, sang, placenta et même dans le cerveau). Il est pratiquement impossible d'éviter d'ingérer des microplastiques, car ils sont présents non seulement dans les produits de la mer, mais aussi dans le bétail, le riz, les légumes et les fruits. Mais aussi dans toutes les boissons, l'eau du robinet étant l'une des options les plus sûres⁷.

1 Le DDT désigne le dichlorodiphényltrichloroéthane, un insecticide largement utilisé à l'époque.

2 Carpenter, E. J. & Smith, K. L. Plastics on the Sargasso Sea Surface [Plastiques à la surface de la mer des Sargasses] *Science* 175, 1240–1241 (1972). <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>.

3 Thompson, R. C. et al. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? [Perdus en mer : où se trouve tout le plastique ?] *Science* 304, 838–838 (2004). <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.

4 Directive (UE) 2019/904 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement. OJ L 155, 5.6.2019, p. 1–36. <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>.

5 Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made [Production, utilisation et devenir de l'ensemble des plastiques jamais fabriqués]. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

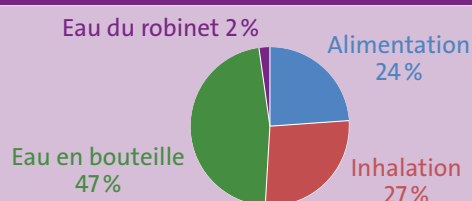
6 Wang, J. et al. Meta-analysis of the effects of microplastic on fish: Insights into growth, survival, reproduction, oxidative stress [Méta-analyse des effets des microplastiques sur les poissons : enseignements concernant la croissance, la survie, la reproduction et le stress oxydatif], and gut microbiota diversity. *Water Res.* 267, 122493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122493>.

7 Cox, K. D. et al. Human Consumption of Microplastics [Consommation humaine de microplastiques]. *Environ. Sci. Technol.* 53, 7068–7074 (2019). <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>.



Et alors que nous ne savons toujours pas quelle quantité de microplastiques nous ingérons en réalité⁸, nous en inhalons encore davantage⁷, notamment dans les régions densément peuplées où la qualité de l'air est médiocre.

Estimation des sources des microplastiques ingérés par l'homme aux États-Unis



Données tirées de Cox et al., 2019⁷.

Comme pour de nombreuses substances, tout est question de dosage. Dans le cas des microplastiques, les additifs nocifs présents dans les matériaux plastiques d'origine, tels que les phtalates, les bisphénols, les retardateurs de flamme et les métaux lourds, pénètrent dans notre organisme via les particules de plastique. Comme nous sommes exposés à une multitude de particules fines et de polluants dans notre vie quotidienne, il est difficile de distinguer les risques sanitaires à long terme des microplastiques. Ils peuvent provoquer des inflammations, des perturbations endocriniennes, et contribuer aux accidents cardiovasculaires, aux maladies neurologiques et aux cancers. Les études scientifiques et les preuves établissant le lien entre les microplastiques et les maladies restent encore limitées⁹. Nous pouvons raisonnablement nous attendre à une augmentation de l'exposition humaine aux microplastiques en raison de l'usage croissant des produits en plastique. Toutefois, le seuil à partir duquel

La production cumulée de matières plastiques a récemment dépassé les 10 milliards de tonnes, dont seule une infime fraction est incinérée

cette exposition constitue un risque sanitaire significatif demeure incertain. Par conséquent, la réduction de l'utilisation excessive des plastiques constituerait une mesure préventive essentielle.

RÉDUIRE, RÉUTILISER, RECYCLER – ET REPENSER

En raison de ses nombreux avantages – léger, durable, polyvalent et peu coûteux – le plastique est utilisé dans pratiquement tous les domaines et tous les secteurs. Et même si nous avons souvent entendu le besoin de « Réduire, réutiliser, recycler », pour un véritable changement il faudrait repenser nos comportements et surtout réduire l'utilisation du plastique. La prise de conscience, la première étape, a permis l'adoption de directives et d'initiatives visant à limiter son utilisation et son rejet dans l'environnement. L'innovation permettra sans doute de créer des matériaux plus écologiques, mais les plastiques biodégradables modernes se décomposent uniquement en conditions industrielles (non naturelles) et ne constituent donc pas une solution suffisante.

Les scientifiques comprennent mieux la propagation mondiale et les concentrations locales de microplastiques, mais les données sur l'évolution de ces concentrations depuis l'introduction des plastiques restent limitées.

Certaines études montrent une forte augmentation dans les milieux aquatiques autour de l'an 2000, période durant laquelle la production mondiale de plastique a presque doublé en une décennie¹⁰. Ce phénomène montre que notre utilisation du plastique se reflète rapidement dans l'environnement.

À l'inverse, il existe un espoir de voir qu'une réduction significative de la production et de l'usage du plastique, associée à une meilleure gestion des déchets, pourrait entraîner une diminution réelle des concentrations.

8 Pletz, M. Ingested microplastics: Do humans eat one credit card per week? [Microplastiques ingérés : les humains en consomment-ils l'équivalent d'une carte de crédit par semaine ?] *J. Hazard. Mater. Lett.* 3, 100071 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.j-hazl.2022.100071>.

9 Lamoree, M. H. et al. Health impacts of microplastic and nanoplastic exposure [Impacts sur la santé de l'exposition aux microplastiques et aux nanoplastiques]. *Nat. Med.* 31, 2873–2887 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-025-03902-5>.

10 Dimante-Deimantovica, I. et al. Downward migrating microplastics in lake sediments are a tricky indicator for the onset of the Anthropocene. [Les microplastiques migrant vers le bas dans les sédiments lacustres constituent un indicateur délicat du début de l'Anthropocène]. *Sci. Adv.* <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi8136> (2024) doi:10.1126/sciadv.adi8136.

À propos de l'auteur

Dr Saija Saarni est professeure agrégée de géologie environnementale appliquée à l'Université de Turku, en Finlande. Ses recherches portent sur la rapidité avec laquelle les environnements naturels évoluent en réponse aux activités humaines, un facteur clé pour évaluer les risques futurs liés à la pollution par les microplastiques. Soutenues par une bourse postdoctorale AXA, elle étudie notamment les taux passés et actuels d'apport de microplastiques dans l'environnement, ainsi que les effets réels des mesures d'atténuation sur les systèmes naturels. Outre ses travaux de recherche, elle a également rédigé des ouvrages de vulgarisation scientifique en géologie.

Antibiorésistance : Un défi de santé planétaire

Marie-Cécile Ploy : Professeure des universités - praticienne hospitalière et cheffe de service en bactériologie-virologie-hygiène au CHU de Limoges

Les antimicrobiens¹ jouent un rôle essentiel dans la santé humaine et animale en permettant le traitement des infections et des maladies. Alors que les infections bactériennes étaient la première cause de mortalité en 1940, elles ne sont plus qu'à l'origine de 2 % des décès aujourd'hui en France². Pourtant, cette tendance menace de s'inverser avec l'émergence d'agents pathogènes résistants aux traitements. La résistance aux antimicrobiens (RAM) est aujourd'hui devenue une des premières causes de mortalité mondiale³, derrière le paludisme ou le sida⁴. Amplifiée par le mésusage des antimicrobiens et favorisée par la contamination des milieux aux antimicrobiens, la résistance aux antimicrobiens est l'une des 10 plus grandes menaces à la santé globale selon l'OMS⁵.

ÉMERGENCE ET DYNAMIQUES DE LA RÉSISTANCE AUX ANTIMICROBIENS

La résistance aux antimicrobiens désigne la capacité de micro-organismes à résister à des traitements auparavant efficaces. Résultant d'un processus naturel d'adaptation du vivant, elle est fortement amplifiée par l'exposition prolongée et excessive aux antimicrobiens, qui favorise l'émergence, la sélection et la diffusion de variants génétiquement résistants. Le principal facteur de développement de la résistance aux antimicrobiens réside dans les usages inappropriés des antibiotiques, tant en médecine humaine qu'en agriculture. L'utilisation massive d'antibiotiques dans l'élevage et la contamination des milieux naturels via les rejets des activités humaines favorisent ainsi la sélection de bactéries résistantes. On estime que jusqu'à 70 % de la consommation mondiale d'antibiotiques est attribuable

On estime que jusqu'à 70 % de la consommation mondiale d'antibiotiques est attribuable à l'élevage qui l'utilise pour améliorer la productivité

à l'élevage qui l'utilise pour améliorer la productivité⁶ (l'utilisation des antibiotiques comme promoteurs de croissance étant interdite en Europe).

La mondialisation et l'intensification des échanges sont également des facteurs majeurs de la diffusion d'agents pathogènes résistants à l'échelle planétaire. En 2019, on estimait que 1,27 million de décès dans le monde étaient directement causés par la résistance aux antimicrobiens, parmi les 4,95 millions qui lui sont associés⁷. La résistance aux antimicrobiens représente également un coût économique substantiel, estimé par l'OCDE à 66 milliards USD PPA annuel, dont 28,6 milliards pour les systèmes de santé des 34 pays membres de l'OCDE⁸.

MOTEURS DE PROPAGATION ENVIRONNEMENTAUX

L'environnement joue un rôle central dans l'émergence, la transmission et la propagation de la résistance aux antimicrobiens, en interaction étroite avec la triple crise planétaire⁴ que constituent le changement climatique, l'érosion de la biodiversité et la pollution. Le changement climatique, en particulier l'augmentation des températures, facilite certains mécanismes biologiques, comme l'échange de gènes de résistance entre bactéries. Certains paramètres de l'air et de l'eau, comme la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone, peuvent également influencer la survie et la prolifération des bactéries⁹. La pollution croissante des milieux naturels, notamment par les résidus de médicaments et les microplastiques, crée par ailleurs des conditions propices à ces échanges en multipliant les contacts entre micro-organismes⁹.

1 Regroupent tous les traitements contre des agents pathogènes, à savoir les antibactériens, les antifongiques, les antiviraux et les antiparasitaires.

2 Les antibiotiques sauvent des vies - Ministère de la Santé, de la Famille, de l'Autonomie et des Personnes handicapées. <https://sante.gouv.fr/prevention-en-sante/les-antibiotiques-des-medicaments-essentiels-a-preserver/des-antibiotiques-a-l-antibiorésistance/article/les-antibiotiques-sauvent-des-vies>.

3 OMS (2025) Global antibiotic resistance surveillance report 2025 [Rapport de surveillance de la résistance aux antibiotiques 2025]. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240116337>.

4 UNEP Qu'est-ce que la résistance aux antimicrobiens et pourquoi constitue-t-elle une menace croissante ? <https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/recit/quest-ce-que-la-resistance-aux-antimicrobiens-et-pourquoi-constitue-t-elle>.

5 OMS (2023) Antimicrobial resistance. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>.

6 Van Boeckel T. et al (2015) Global trends in antimicrobial use in food animals | PNAS in Tiseo K. et al (2020) Global Trends in Antimicrobial Use in Food Animals from 2017 to 2030 [Tendances mondiales de l'utilisation des antimicrobiens chez les animaux d'élevage] | PNAS dans Tiseo K. et al. (2020) Tendances mondiales de l'utilisation des antimicrobiens chez les animaux d'élevage de 2017 à 2030]. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112>.

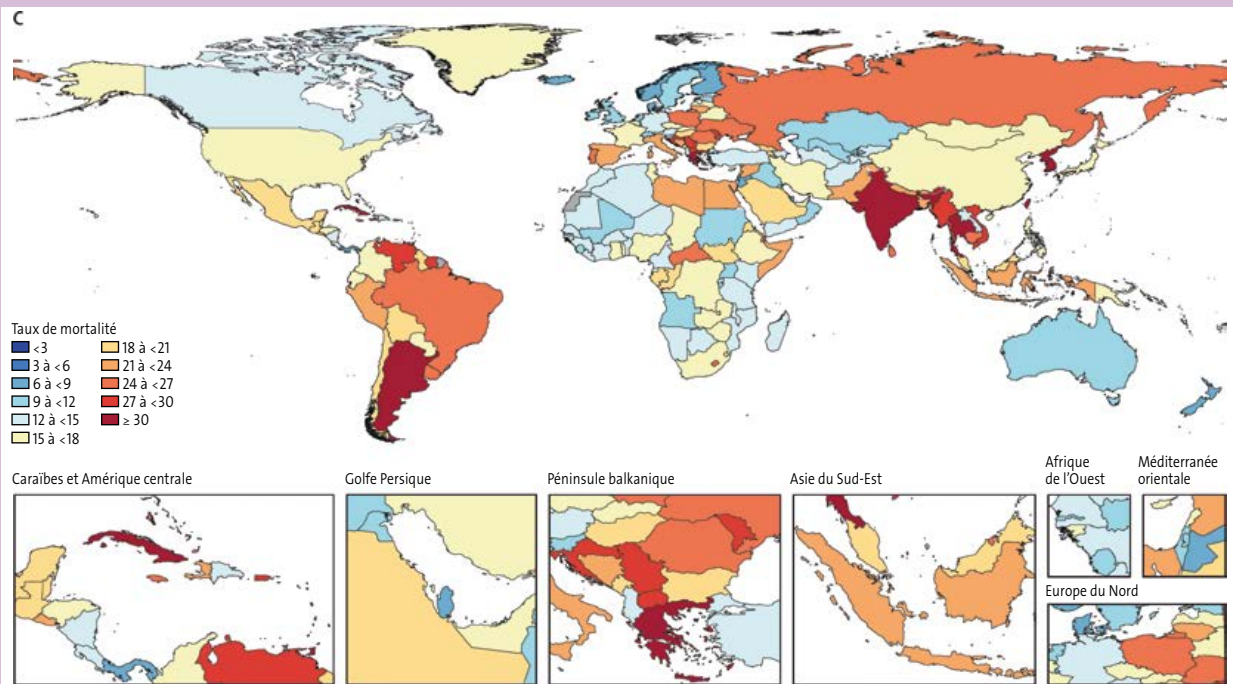
7 Murray C, Ikuta K, Sharara F et al., *The Lancet* (2022) Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis [Fardeau mondial de la résistance bactérienne aux antimicrobiens en 2019 : une analyse systématique]. *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)02724-0).

8 OCDE (2023) Embracing a One Health Framework to Fight Antimicrobial Resistance (EN) in Résistance aux antimicrobiens – OCDE [Adopter un cadre « One Health » pour lutter contre la résistance aux antimicrobiens (EN) dans Résistance aux antimicrobiens – OCDE. 9 PNUE Qu'est-ce que la résistance aux antimicrobiens et pourquoi]. <https://www.oecd.org/fr/themes/resistance-aux-antimicrobiens.html>.

9 Rodriguez-Verdugo A. et al, (2020) Compounding Effects of Climate Warming and Antibiotic Resistance - ScienceDirect [Effets combinés du réchauffement climatique et de la résistance aux antibiotiques – ScienceDirect]. <https://doi.org/10.1016/j.jisci.2020.101024>.



Carte du taux de mortalité pour 100 000 habitants attribuables à la résistance aux antimicrobiens, tous âges confondus – Estimation pour 2050¹⁰



Dans certains pays du Sud, les conditions peuvent être particulièrement favorables à la diffusion d'agents pathogènes résistants, du fait de la vulnérabilité accrue des écosystèmes, de l'intensification des événements climatiques extrêmes (inondations, tempêtes), d'infra-structures insuffisantes d'accès à l'eau potable et à l'assainissement, ainsi que d'un contrôle insuffisant des usages des antimicrobiens.

La saturation des systèmes d'assainissement et la dispersion d'eaux usées contaminées par des résidus antimicrobiens, issus notamment des activités agricoles, hospitalières et industrielles, contribuent à la dissémination de bactéries résistantes dans les milieux naturels. Ces dynamiques soulignent le caractère systémique et internationale de la résistance aux antimicrobiens et rendent indispensable l'adoption d'une approche *One Health* (Une seule santé), reconnaissant l'interdépendance étroite entre la santé humaine, la santé animale (domestique comme sauvage), la préservation de la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes.

RÉPONDRE À LA RÉSISTANCE AUX ANTIMICROBIENS PAR DES LEVIERS COORDONNÉS

Remédier à la résistance aux antimicrobiens repose sur des interventions coordonnées, allant des pratiques individuelles aux cadres systémiques. En santé humaine et animale, la promotion d'un usage raisonné des antibiotiques est essentielle. Elle repose notamment sur des actions de sensibilisation, telles que la campagne « Les antibiotiques, c'est pas automatique ! » lancée en 2002 par l'Assurance maladie et qui fait désormais partie du langage commun. La limitation des usages vétérinaires non thérapeutiques constitue un levier majeur qui reste insuffisamment mobilisé. Alors que 93 % des pays ont développé un plan d'action national de lutte contre la résistance aux antimicrobiens, seulement 11 % d'entre eux y ont alloué des fonds et l'ont mis en œuvre¹¹.

¹⁰ Naghavi M, Vollset S, Ikuta K et al. (2024) Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050 [Fardeau mondial de la résistance bactérienne aux antimicrobiens de 1990 à 2021 : une analyse systématique avec projections jusqu'en 2050]. The Lancet. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(24\)01867-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)01867-1).

¹¹ OMS (2023) Global Database for Tracking Antimicrobial Resistance (AMR) Country in FAO (2023) tackling antimicrobial resistance in food and agriculture [Base de données mondiale pour le suivi de la résistance aux antimicrobiens (RAM) par pays dans FAO (2023) Lutter contre la résistance aux antimicrobiens dans l'alimentation et l'agriculture]. p. 33. <https://amrcountryprogress.org/map/>.

La prévention passe également par la réduction de la transmission des agents pathogènes, à travers des pratiques d'hygiène adaptées et proportionnées, afin d'éviter l'émergence de co-résistances liées à l'utilisation de biocides.

One Health World – Teodor Hristov pour la campagne « Sketching Antimicrobial resistance » de EU-JAMRAI¹²



La résistance aux antimicrobiens nécessite également des efforts renforcés de pédagogie, de vulgarisation scientifique, ainsi qu'une forte collaboration scientifique interdisciplinaire. Pour cela, le consortium PROMISE¹³ a rassemblé un réseau de 120 membres-partenaires,

experts de la médecine humaine, vétérinaire et des sciences environnementales, qui partagent leur expertise au sein de plusieurs groupes de travail. Le programme européen EU-JAMRAI sensibilise également le grand public à la résistance aux antimicrobiens, par exemple à travers le projet "Sketching Antimicrobial Resistance" qui rassemble 30 dessinateurs européens¹². Les témoignages de victimes de la résistance aux antimicrobiens permettent également d'ancrer ces récits dans notre quotidien, comme ce que propose l'association *The AMR Narrative*¹⁴.

Au-delà des individus, le renforcement des infrastructures publiques, notamment la gestion des eaux usées et des déchets pharmaceutiques, est indispensable. Enfin, la résistance aux antimicrobiens appelant une réponse globale, la coopération internationale et transdisciplinaire est essentielle. L'harmonisation des indicateurs scientifiques, le partage de données et la mise en réseau des acteurs permettent de dépasser les silos entre santé humaine, santé animale, environnement et politiques publiques. Depuis 2022, l'Alliance Quadripartite Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et de l'Organisation mondiale de la santé animale (OMSA) se coordonnent pour proposer des programmes transdisciplinaires fondés sur une approche *One Health*¹⁵. L'adoption d'une approche intégrée de *Planetary Health*¹⁶ apparaît ainsi indispensable pour répondre durablement à ce défi systémique.

¹² Sketching Antimicrobial Resistance | EU-JAMRAI. <https://eu-jamrai.eu/raise-awareness/campaigns/sketching-antimicrobial-resistance/>.

¹³ Promise. <https://amr-promise.fr/fr/>.

¹⁴ Founder - The AMR Narrative [Fondatrice - Le narratif RAM]. <https://amrnarrative.org/about-our-work/founder/>.

¹⁵ L'Alliance Quadripartite renouvelle la lutte contre la RAM - OMSA. <https://www.woah.org/fr/lalliance-quadrupartite-salue-lengagement-politique-renouvele-dans-le-domaine-de-la-lutte-contre-la-resistance-aux-antimicrobiens/>.

¹⁶ Ziveri D., Bolon I. et al. (2025) « Une seule santé » et la santé planétaire dans les contextes humanitaires - Alternatives Humanitaires. <https://www.alternatives-humanitaires.org/fr/2025/03/31/une-seule-sante-et-la-sante-planetaire-dans-les-contextes-humanitaires/>.

À propos de l'auteur

Marie-Cécile Ploy est professeure des universités – praticienne hospitalière et cheffe de service en bactériologie-virologie-hygiène au CHU de Limoges. Elle dirige l'unité "Anti-infectieux : supports moléculaires des résistances et innovations thérapeutiques – RESINFIT" de L'Inserm. Depuis 2024, elle coordonne l'action jointe européenne contre la résistance antimicrobienne (RAM) et les infections associées (EU-JAMRAI), ainsi que Promise, le réseau interdisciplinaire français de lutte contre la RAM.



La RAM atteint même les lieux les plus sauvages – Anja Sušanj pour la campagne
« Sketching Antimicrobial resistance » de EU-JAMRAI¹²



Le mercure, un enjeu brûlant pour la planète et ses océans

Lars-Eric Heimbürger-Boavida : Océanographe chimiste au CNRS et chercheur à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie de l'Université d'Aix-Marseille

POURQUOI LE MERCURE EST-IL UN POLLUANT PARTICULIÈREMENT INQUIÉTANT ?

Avec le réchauffement climatique, la perte de biodiversité et la dispersion de polluants dans l'environnement, notre planète subit actuellement de profonds bouleversements. Et le mercure illustre un paradoxe : c'est un polluant qui fait partie de nos vies depuis des siècles, et pourtant nous le maîtrisons mal. Selon l'*Évaluation mondiale du mercure* de 2018 du Programme des Nations unies pour l'environnement, les sources anthropiques émettent environ 3 100 tonnes de mercure par an et l'ensemble de la population mondiale est exposée à une quantité plus ou moins élevée¹. Et même si nous connaissons les principales sources anthropiques de mercure (extraction de l'or, combustion du charbon et production de ciment), nous ne comprenons pas encore comment l'environnement génère du méthylmercure, qui est la forme organique du mercure, mais aussi la plus toxique.

Le mercure est un polluant particulièrement préoccupant² en raison de la neurotoxicité du méthylmercure et de sa forte biomagnification³ dans la chaîne alimentaire. Ce danger est connu de longue date dans les sociétés humaines. Dans la Rome antique, la *Damnatio ad metalla* (la « condamnation aux mines ») exposait les esclaves à des doses mortelles dans les mines de mercure. La maladie du Chapelier fou, telle que décrite dans *Alice au pays des merveilles*, illustre les effets neurotoxiques d'une exposition chronique aux vapeurs de mercure, autrefois fréquente dans la chapellerie.

La découverte de la maladie de Minamata en 1956 a incité les autorités japonaises à mettre en place une réglementation visant à limiter et contrôler la contamination au mercure. Une usine de produits chimiques, située à proximité de la ville de Minamata, rejetait du méthylmercure dans la baie depuis plus de dix ans, entraînant une bioaccumulation dans la faune marine et la contamination de plus de 2 200 personnes par la consommation du poisson local. Les victimes souffraient de symptômes neurologiques graves, des femmes enceintes ayant accouché de bébés

La mer Méditerranée présente un intérêt particulier. Comme elle est fermée, elle se caractérise par des eaux peu productives et favorise l'accumulation du mercure provenant de sources d'émission régionales

morts-nés ou atteints de malformations. La population locale subit encore aujourd'hui les conséquences de cette maladie. Le méthylmercure est si toxique que quelques gouttes ayant traversé le gant de la chimiste américaine Karen Wetterhahn ont suffi à provoquer sa mort en quelques mois⁴.

Et même si nous connaissons les effets de l'empoisonnement aigu, l'exposition au mercure reste difficile à évaluer. Toutefois, des études menées auprès de cohortes de mères et d'enfants exposés de manière chronique au mercure montrent que les enfants les plus exposés présentent des scores plus faibles aux tests de QI^{1,2}.

QUELLES SONT LES AVANCÉES DE LA RECHERCHE SUR LE MERCURE ET SA POLLUTION ?

Il subsiste beaucoup d'incertitudes autour du cycle du mercure. Par exemple, nous n'avons pas de chiffres précis sur le bilan océanique du mercure, ni sur la part anthropique de ce dernier, ni sur l'influence du réchauffement climatique et de la perte de biodiversité sur la formation du méthylmercure et la bioamplification. Les mesures actuelles de la quantité mondiale de mercure rejetée par les activités humaines reposent sur de

simples estimations, et beaucoup de lacunes persistent dans notre compréhension de sa circulation entre l'air, l'eau, les sédiments et les organismes. Le méthylmercure n'est pas émis directement par les activités humaines, mais se forme au sein des écosystèmes, lorsque le mercure inorganique rejeté dans l'air et l'eau subit une transformation par les microbes. Dans les années 1970, des scientifiques suédois ont découvert

du méthylmercure dans des poissons en décomposition, puis ont démontré qu'il pouvait être généré naturellement dans les sédiments⁵. Son origine dans les eaux côtières des océans du globe reste difficile à cerner, mais elle est probablement liée à l'intervention d'autres microbes⁶.

- 1 Évaluation mondiale du mercure de 2018. <https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-sessment-2018>.
- 2 Organisation mondiale de la santé (2024) Mercury and Health fact sheet. [Fiche d'information sur le mercure et la santé]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>.
- 3 Le processus par lequel la concentration d'une substance augmente à mesure que l'on progresse dans la chaîne alimentaire.

- 4 Science (1997) Mercury Poisoning Kills Lab Chemist [L'empoisonnement au mercure entraîne la mort d'un chimiste de laboratoire] | Science | AAAS. <https://doi.org/10.1126/article.40157>.
- 5 Jensen, S. & Jernelöv, A. Biological methylation of mercury in aquatic organisms [Production de méthylmercure en eaux peu profondes dans la zone marginale de la banquise de l'océan Arctique central]. *Nature* 223, 753–754 (1969). <https://doi.org/10.1038/223753a0>.
- 6 Villar, E., Cabrol, L., Heimbürger-Boavida, L. & Heimbürger-Boavida, L. E. Widespread microbial mercury methylation genes in the global ocean [Gènes de méthylation du mercure d'origine microbienne largement répandus dans les océans du monde entier]. *Environmental Microbiology Reports* 12, 1758–2229.12829 (2020). <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12829>.



Sur le plan de la recherche, la mer Méditerranée présente un intérêt particulier. Comme elle est fermée, elle se caractérise par des eaux peu productives et favorise l'accumulation du mercure provenant de sources d'émission régionales. Ses eaux relativement chaudes stimulent également l'activité microbienne. L'Arctique est également un bassin océanique semi-clos, ce qui le rend particulièrement sensible aux perturbations externes. Cet océan contient environ 2 000 tonnes de mercure, sans compter les 600 000 tonnes encore piégées dans le pergélisol, amené à fondre avec le réchauffement climatique⁷.

Y A-T-IL DES RÉGIONS OU DES POPULATIONS PARTICULIÈREMENT EXPOSÉES À LA POLLUTION PAR LE MERCURE ?

Quand les écosystèmes sont dégradés, les polluants se propagent plus rapidement d'un niveau trophique à un autre⁸ et les populations consommant régulièrement les prédateurs marins, qui concentrent les niveaux les plus élevés de méthylmercure, y sont les plus exposés. C'est le cas des communautés arctiques, telles que les Inuits et les Samis. Historiquement marginalisés et déplacés de force vers des régions reculées présentant peu d'alternatives, ces groupes dépendent presque exclusivement de la faune marine pour se nourrir. Et même si l'Arctique ne contient pas plus de mercure que d'autres bassins océaniques, le niveau d'exposition des populations locales est paradoxalement élevé. Les populations vivant sur les côtes de la Méditerranée, qui consomment aussi beaucoup de poissons, présentent également des niveaux élevés de contamination au mercure, même si elles ont davantage d'alternatives alimentaires⁹.

C'est pour ces raisons que mes recherches se concentrent sur ces régions. Les mesures que nous avons effectuées dans l'océan Arctique suggèrent que le méthylmercure se forme en eaux peu profondes et subit potentiellement une bioamplification plus forte chez les animaux arctiques¹⁰.



La station polaire Tara.
© Lars-Eric Heimbürger-Boavida

Nous avons récemment découvert que nos connaissances actuelles étaient biaisées. En effet, il existe des variations saisonnières du mercure et du méthylmercure dans l'océan Arctique et les observations passées étaient principalement effectuées pendant l'été¹¹. Pendant les 20 prochaines années, nous utiliserons la station polaire Tara pour étudier le mercure en toute saison¹².

7 Dastoor, A.; Angot, H.; Bieser, J.; Christensen, J. H.; Douglas, T. A.; Heimbürger-Boavida, L.-E.; et al. Arctic Mercury Cycling [Le cycle du mercure dans l'Arctique]. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022, 3 (4), 270–286. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00269-w>.

8 Les niveaux trophiques désignent les différents niveaux alimentaires au sein d'un réseau trophique, et la manière dont l'énergie et les nutriments sont transférés des petits organismes (comme le plancton) vers des prédateurs de plus en plus grands (comme les poissons, les mammifères marins ou les humains).

9 Petrova, M. V.; Ourgaud, M.; Boavida, J. R. H.; Dufour, A.; et al. Human Mercury Exposure Levels and Fish Consumption at the French Riviera [Niveaux d'exposition au mercure chez l'homme et consommation de poisson sur la Côte d'Azur]. *Chemosphere* 2020, 258. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127232>.

10 Heimbürger, L.-E.; Sonke, J. E.; Cossa, D.; Point, D.; et al. Shallow Methylmercury Production in the Marginal Sea Ice Zone of the Central Arctic Ocean [Production de méthylmercure en eaux peu profondes dans la zone marginale de la banquise de l'océan Arctique central]. *Sci. Rep.* 2015, 5, 10318.

11 Kohler, S. G.; Heimbürger-Boavida, L.-E.; Petrova, M. V.; Digernes, M. G.; et al. Arctic Ocean's Wintertime Mercury Concentrations Limited by Seasonal Loss on the Shelf [Concentrations hivernales de mercure dans l'océan Arctique limitées par la perte saisonnière sur le plateau continental]. *Nat. Geosci.* 2022, 15 (8), 621–626. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00986-3>; Kohler, S. G.; Heimbürger-Boavida, L.-E.; Assmy, P.; Müller, et al. Biotic Transformation of Methylmercury at the Onset of the Arctic Spring Bloom [Transformation biotique du méthylmercure au début de la floraison printanière dans l'Arctique]. *Prog. Oceanogr.* 2024, 103224. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2024.103224>.

12 JF Ghiglione, LE Heimbürger-Boavida, M Fourquez, I Hough, et al. (2026). Tara Polaris expeditions: seasonal and long-term contaminant monitoring in the changing central Arctic [Expéditions Tara Polaris : surveillance saisonnière et à long terme des contaminants dans un Arctique central en pleine mutation]. *Elementa: Science of the Anthropocene*. (hal-05466231).

Mon groupe travaille également sur les émissions hydrothermales de mercure, en particulier en mer Méditerranée, car elles constituent la seule source directe de mercure d'origine naturelle dans l'océan. Celles-ci pourraient expliquer les niveaux élevés de mercure et l'exposition humaine observés dans la région méditerranéenne¹³.

COMMENT POUVONS-NOUS RÉDUIRE L'EXPOSITION HUMAINE AU MERCURE ?

Depuis 2013, la Convention de Minamata sur le mercure constitue le principal cadre international visant à réduire l'exposition humaine au mercure. Parmi les objectifs proposés figurent l'élimination de toutes les utilisations du mercure, qu'elles soient intentionnelles (ex. dans les processus industriels ou la fabrication de produits tels que les interrupteurs) ou non intentionnelles (ex. rejets de mercure lors de la combustion du charbon), l'interdiction des exportations de mercure destinées à l'exploitation aurifère, et la mise en œuvre de technologies de contrôle de la pollution. L'article 22 de la Convention prévoit également des évaluations scientifiques pour mesurer l'efficacité des mesures.

Les populations vivant sur les côtes de la Méditerranée, qui consomment aussi beaucoup de poissons, présentent également des niveaux élevés de contamination au mercure

Les chercheurs ont constaté une diminution des niveaux de mercure dans l'atmosphère au cours des 20 dernières années¹⁴, ce qui montre qu'en appliquant une réglementation et des mesures efficaces, il est possible de réduire notre impact sur l'environnement. Toutefois, ces progrès restent fragiles : en raison des activités humaines actuelles et passées, la concentration de mercure dans l'atmosphère reste 450 % supérieure au niveau naturel¹⁵. Sans compter que la réouverture de centrales à charbon risque de réduire à néant les progrès récents, tandis que d'importantes lacunes scientifiques persistent.

À titre individuel, nous pouvons nous protéger contre l'exposition au mercure en modifiant nos habitudes alimentaires. Le mercure rejeté s'accumule dans les écosystèmes et nous revient par le biais des poissons que nous consommons. C'est pourquoi les organismes de santé,

tels que l'ANSES¹⁶, recommandent aux femmes enceintes et aux jeunes enfants¹⁷ de limiter leur consommation d'espèces riches en mercure (comme le thon ou l'espadon). Protéger la biodiversité contre les rejets d'origine humaine n'est donc pas seulement un objectif environnemental : c'est une nécessité pour préserver la santé humaine.

13 Torres-Rodriguez, N.; Yuan, J.; Petersen, S.; Dufour, A.; et al. Fluxes from Hydrothermal Venting at Mid-Ocean Ridges Constrained by Measurements [Mesures permettant d'estimer les flux de mercure provenant des cheminées hydrothermales des dorsales médio-océaniques]. Nat. Geosci. 2024, 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01341-w>.

14 American Chemical Society (2025) Mercury levels in the atmosphere have decreased throughout the 21st century [Les concentrations de mercure dans l'atmosphère ont diminué tout au long du XXI^e siècle]. <https://www.acs.org/pressroom/presspacs/2025/may/mercury-levels-in-the-atmosphere-have-decreased-throughout-the-21st-century.html>.

15 Convention de Minamata sur le mercure (2026) Minamata-Convention-booklet-Oct2024-EN.pdf. https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/information_document/Minamata-Convention-booklet-Oct2024-FR.pdf.

16 L'Agence nationale française de sécurité sanitaire.

17 Méthylmercure : un risque pour la santé en cas de consommation importante de poissons | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. <https://www.anses.fr/fr/content/methylmercure-un-risque-pour-la-sante-en-cas-de-consommation-importante-de-poissons>.

À propos de l'auteur

Lars-Eric Heimbürger-Boavida est océanographe chimiste au CNRS et mène ses recherches à l'Institut méditerranéen d'océanologie de l'Université d'Aix-Marseille. Formé à la chimie analytique en Allemagne et aux États-Unis, il a obtenu un doctorat en océanographie chimique au Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer. Depuis 2015, ses travaux portent sur les cycles des métaux dans l'océan, en particulier sur le mercure, une expertise qui lui a valu, la même année, un prix de Recherche du mécénat d'AXA. Il a co-rédigé l'Évaluation mondiale du mercure du Programme des Nations unies pour l'environnement en 2018 et le Programme de surveillance et d'évaluation du mercure dans l'Arctique en 2021.





*Poissons contaminés au mercure pêchés à proximité d'une cheminée hydrothermale au large de Milos, en Grèce.
© Lars-Eric Heimbürger-Boavida*

Invasions biologiques :

Un fardeau sanitaire et économique croissant

Christophe Diagne

Chargé de recherche à l'Institut de Recherche
pour le Développement (IRD)

Franck Courchamp

Écologue et directeur de recherche au Centre National
de la Recherche Scientifique (CNRS)

Classées parmi les cinq principaux facteurs de changement global par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES)¹, les invasions biologiques constituent aujourd'hui un enjeu majeur et croissant pour la biodiversité. Au-delà de leurs nombreux impacts écologiques, les invasions biologiques ont également de lourds effets sur la santé humaine, animale et végétale. Les conséquences sanitaires de ces invasions dépassent largement le cadre des maladies infectieuses, souvent mises en avant dans l'évaluation des impacts de ces invasions. Elles affectent également la qualité de l'environnement, le bien-être global des populations exposées, ainsi que la résilience des écosystèmes concernés². Cet article propose une synthèse des connaissances actuelles sur les implications sanitaires de ces invasions biologiques, en mettant notamment en lumière leur nature multidimensionnelle et les solutions envisageables pour les limiter.

INTRODUCTION

On parle d'invasion biologique lorsque quelques individus d'une espèce sont transportés, volontairement ou accidentellement par les activités humaines, en dehors de leur aire de répartition naturelle, puis parviennent à s'y installer et à y provoquer des impacts écologiques, économiques ou sanitaires³. Les espèces concernées sont alors qualifiées « d'espèces exotiques envahissantes » (EEE). Distincte d'une espèce exotique (ou non native, soit une espèce introduite dans une région où elle n'était pas présente naturellement), une EEE est une espèce introduite qui s'établit durablement, se propage et engendre des effets négatifs sur la biodiversité, les écosystèmes ou les socio-écosystèmes (c'est-à-dire les ensembles formés par les interactions réciproques entre les sociétés humaines et les écosystèmes naturels).

L'invasion biologique n'est pas un événement ponctuel, mais un processus dynamique qui implique le franchissement successif de plusieurs barrières : le transport vers une nouvelle région, la survie dans le nouvel environnement, la reproduction, puis la dispersion. A chaque étape, de nombreuses espèces introduites échouent et seule une

infime fraction d'entre elles parvient au stade d'invasion. Mais même si seulement 1% de toutes les espèces introduites deviennent envahissantes, le nombre très important d'espèces constamment introduites génère un grand nombre d'invasions sur toute la planète⁴.

INVASIONS BIOLOGIQUES : UN ENJEU MAJEUR ET CROISSANT

Si les mouvements d'espèces existent depuis toujours, le rythme actuel est inédit ; du fait de l'accélération et de la globalisation des activités humaines, le nombre d'introductions a explosé ces dernières décennies, avec environ 200 nouvelles espèces exotiques chaque année⁴. Globalement, on liste plus de 37 000 espèces exotiques (un nombre par ailleurs sous-estimé), dont environ 3 500 sont démontrées comme envahissantes dans au moins une région du monde. Il s'agit de plantes, d'animaux ou de micro-organismes, qui vivent dans des habitats terrestres, d'eau douce ou marins. Elles viennent de toutes les régions et envahissent tous les pays. Ainsi, on estime par exemple que 7 000 à 10 000 espèces marines voyagent chaque jour dans les eaux de ballast des navires, tandis que les douanes américaines interceptent à elles seules plus de 230 ravageurs exotiques quotidiennement.

1 Ruckelshaus, M. H., Jackson, S. T., Mooney, H. A., Jacobs, K. L., Kassam, K. A. S., Arroyo, M. T., ... & Ouyang, Z. (2020). The IPBES global assessment: pathways to action. *Trends in Ecology & Evolution* [L'évaluation mondiale de l'IPBES : des voies d'action. *Trends in Ecology & Evolution*], 35(5), 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.01.009>.

2 Haubrock, P. J., Everts, T., Abreo, N. A. S., Bojko, J., Deklerck, et al. (2026). The impacts of biological invasions [Les impacts des invasions biologiques]. *Biol Rev.* <https://doi.org/10.1002/brv.70124>.

3 IPBES (2023). Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [Résumé à l'intention des décideurs du rapport d'évaluation thématique sur les espèces exotiques envahissantes et leur contrôle de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques]. Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., Renard Truong, T., Bacher, S., Galil, B. S., Hulme, P. E., Ikeda, T., Sankaran, et al. IPBES secretariat, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430692>.

4 Seebens, H., Meyerson, L. A., Richardson, D. M., Lenzner, B., Tricarico, E., Courchamp, F., ... & Pyšek, P. (2025). Biological invasions: a global assessment of geographic distributions, long-term trends, and data gaps [Invasions biologiques : une évaluation mondiale des répartitions géographiques, des tendances à long terme et des lacunes en matière de données]. *Biological Reviews*, 100(6), 2542-2583. <https://doi.org/10.1111/brv.70058>.



Les invasions ayant lieu lors du transport d'espèces par les activités humaines, la mondialisation agit comme un catalyseur, via des vecteurs concrets tels que les transports maritimes, terrestres (routier et ferroviaire) et aériens, qui sont tous en augmentation forte⁵. Ce fort accroissement des transports de marchandises et de personnes se traduit très naturellement par un accroissement du nombre d'introductions d'espèces hors de leur aire de répartition naturelle. Le changement climatique, quant à lui, lève les barrières thermiques qui limitaient l'établissement et l'expansion des espèces introduites, favorise le nombre d'introduction qui se traduit en invasions⁶.

Du frelon asiatique en France au lapin en Australie, de la renouée du Japon en Amérique du Nord au serpent arboricole brun dans l'Île de Guam ou à la perche du Nil en Afrique, les exemples abondent sur la diversité et les impacts des EEE, ainsi que des régions envahies. Des synthèses mondiales récentes fournissent en effet des preuves claires que des micro-organismes, champignons, plantes et animaux exotiques ont été introduits dans toutes les régions du monde, y compris en Antarctique et jusque dans les îles les plus reculées¹⁻³.

Les invasions biologiques sont considérées comme l'un des pires facteurs de perte de biodiversité et de dégradation des écosystèmes. Elles sont impliquées dans 60 % des extinctions mondiales de plantes et d'animaux recensés

INVASIONS BIOLOGIQUES ET SANTÉ DES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES

Dans son dernier rapport, l'IPBES propose une classification standardisée des impacts des invasions biologiques, qui affectent à la fois la nature, les contributions de la nature aux populations humaines et la qualité de vie³. Les impacts sanitaires peuvent être considérés comme transversaux à ces différentes catégories, car la notion de santé s'entend aujourd'hui dans un sens large et intégratif, ne se limitant plus à l'être humain. Cette approche, souvent désignée sous le terme « Une seule santé », ou *One Health* en anglais, met en évidence l'interdépendance étroite entre la santé des différents compartiments de nos socio-écosystèmes : humains, animaux, végétaux et leurs environnements. Dans ce contexte, les invasions biologiques apparaissent comme des sources majeures de risques sanitaires multiples.

DES ÉCOSYSTÈMES PERTURBÉS, UNE BIODIVERSITÉ ALTÉRÉE

Les invasions biologiques sont considérées comme l'un des pires facteurs de perte de biodiversité et de dégradation des écosystèmes. Elles sont impliquées dans 60 % des extinctions mondiales de plantes et d'animaux recensés. Pour 16 % d'entre elles, les invasions sont même l'unique cause de la disparition de l'espèce (notamment sur les îles) et on a déjà documenté plus de 1200 extinctions locales dues aux invasions. Cependant, l'extinction d'espèces n'est que la manifestation la plus irréversible d'une palette de 19 types d'impacts écologiques, allant des modifications physiologiques individuelles, à l'effacement génétiquement par hybridation et jusqu'au basculement complet du fonctionnement des écosystèmes⁷.

En effet, les invasions biologiques causent également des changements de comportement des individus autochtones, d'aire de répartition des espèces natives, et même de changements physiques de l'habitat. Originaires d'Amérique du Sud, les ragondins altèrent la structure des berges en France, le réseau superficiel des racines de l'arbre *Miconia* (aussi appelé le « cancer vert ») crée des glissements de terrain à Tahiti, dont il couvre 60-70 % de la surface, tandis que la fourmi folle élimine les crabes rouges nettoyeurs des sous-bois de l'Île Christmas, résultant en un changement complet de type de forêt. Les invasions créent également des changements de la qualité de l'eau (comme les moules envahissant les Grands Lacs Américains), ou composition des sols (les vers de terres envahissant l'Amérique du Nord modifient la nature du sol, et en conséquence la composition des espèces végétales qui y poussent). Les invasions peuvent enfin modifier les cycles naturels des nutriments, de l'eau ou des feux. Les rats tuant



Jeune frelon asiatique sortant de son cocon.
© Dominique Fenot

5 Turbelin, A. J., Diagne, C., Hudgins, E. J., Moodley, D., Kourantidou, M., Novoa, A., ... & Courchamp, F. (2022). Introduction pathways of economically costly invasive alien species [Voies d'introduction des espèces exotiques envahissantes à coût économique élevé]. *Biological Invasions*, 24(7), 2061-2079. DOI : 10.1007/s10530-022-02796-5.

6 Thielges, D. W., Conn, D. B., Cuthbert, R. N., Dunn, A. M., Jolma, E. R., Hopkins, M. C., ... & Kočovský, P. M. (2025). Integrating climate change, biological invasions, and infectious wildlife diseases. *Frontiers in Ecology and the Environment* [Intégrer le changement climatique, les invasions biologiques et les maladies infectieuses de la faune sauvage. *Frontiers in Ecology and the Environment*], 23(6), e2849. <https://doi.org/10.1002/fee.2849>.

7 Carneiro, L., Leroy, B., Capinha, C., Bradshaw, C. J., Bertolino, S., Catford, J. A., ... & Courchamp, F. (2025). Typology of the ecological impacts of biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution* [Typologie des impacts écologiques des invasions biologiques. *Trends in Ecology & Evolution*], 40(6), 563-574. <https://doi.org/10.1016/j.jtree.2025.03.010>.

les oiseaux marins sur les îles qu'ils envahissent diminuent l'azote de leur guano qui fertilisaient les eaux coralliennes, tandis que « l'herbe de l'enfer » (herbe à paille) crée des tapis de combustible sec hautement inflammable qui augmente la fréquence et l'intensité des incendies en Asie du Sud-Est.

DE MULTIPLES ENJEUX DE SANTÉ PUBLIQUE

Au-delà des perturbations écologiques, les invasions biologiques posent également de véritables enjeux de santé publique. En modifiant les interactions entre les espèces, les habitats et les conditions environnementales, elles créent des contextes favorables à l'émergence ou l'amplification de risques sanitaires impactant directement les populations humaines et animales.

Transmission d'agents pathogènes⁸. Certaines EEE jouent un rôle central dans la circulation des agents infectieux⁹. Elles peuvent agir comme « réservoirs biologiques » hébergeant durablement des pathogènes (virus, bactéries ou parasites) sans nécessairement développer de pathologies, « hôtes intermédiaires » indispensables au cycle de vie de certains parasites, « vecteurs » capables de transmettre un agent pathogène d'un hôte à un autre (le plus souvent par une piqûre) ou encore « amplificateurs » en accroissant la circulation des pathogènes (par exemple en modifiant les habitats) sans transmettre directement ces derniers. De nombreux exemples emblématiques existent pour chacune de ces situations, mais le plus marquant reste probablement le cas du moustique tigre : originaire d'Asie du Sud-Est, il s'est propagé à l'échelle mondiale grâce à l'anthropisation des habitats et au changement climatique, et peut transmettre à l'être humain des virus responsables de maladies telles que la dengue, le chikungunya ou la fièvre jaune.

Le plus marquant reste probablement le cas du moustique tigre : originaire d'Asie du Sud-Est, il s'est propagé à l'échelle mondiale [...] et peut transmettre à l'être humain des virus responsables de maladies telles que la dengue, le chikungunya ou la fièvre jaune

Atteintes physiques et physiologiques. Les invasions biologiques peuvent également affecter la santé humaine par des mécanismes non infectieux⁷. Certaines espèces produisent des toxines potentiellement mortelles, comme le poisson-lune envahissant en Méditerranée, dont la consommation peut entraîner des intoxications graves liées à la tétrodontoxine. D'autres déclenchent des réactions allergiques sévères. L'ambrosie à feuilles d'armoise, originaire d'Amérique du Nord, produit un pollen hautement allergisant qui affecte chaque année 33 millions de personnes en Europe, aggravant notamment l'asthme et les troubles respiratoires. Ce chiffre pourrait grimper jusqu'à 77 millions d'ici 2050 avec l'augmentation de l'aire envahie du fait du changement

climatique. Les blessures corporelles constituent un autre volet de ces impacts sanitaires. La fourmi de feu, originaire d'Amérique du Sud et récemment détectée en Europe, inflige des piqûres douloureuses pouvant provoquer des réactions allergiques graves, voire des chocs anaphylactiques. Aux États-Unis, on estime que plus de 14 millions de personnes sont piquées annuellement. Parmi elles, plusieurs centaines de milliers nécessitent une intervention médicale.

Insécurité alimentaire. Les invasions biologiques peuvent affecter la disponibilité, l'accès et la qualité des ressources alimentaires¹⁰. Certaines EEE dégradent directement les cultures agricoles, les denrées stockées ou les ressources halieutiques, tandis que d'autres agissent comme ravageurs ou vecteurs de maladies des plantes cultivées. Ces impacts entraînent des pertes de rendement, une instabilité accrue des systèmes de production et, à plus long terme, une réduction de la diversité des ressources alimentaires. Ces perturbations peuvent également accroître la dépendance aux intrants chimiques, avec des conséquences indirectes sur la santé humaine et environnementale, ainsi que sur la vulnérabilité des populations les plus exposées, en particulier dans des territoires déjà soumis à de fortes contraintes socio-économiques. La légionnaire d'automne illustre de manière emblématique ces enjeux. Originaire des Amériques, cet insecte ravageur s'est propagé en moins de 5 ans à travers plus de 80 pays en Afrique,

Asie et Océanie, où il s'attaque à plus de 350 espèces végétales, dont celles de cultures de base telles que le maïs, le sorgho ou le riz. Son expansion menace ainsi directement la sécurité alimentaire de plus de 100 millions de personnes.

Santé mentale et bien-être. Enfin, lorsque les invasions modifient durablement les paysages, les ressources locales ou les moyens de subsistance, elles peuvent générer du stress, de l'anxiété ou un sentiment d'insécurité et de perte de

contrôle¹¹. La jussie à grandes fleurs constitue un exemple parlant. Originaire d'Amérique du Sud, cette plante aquatique envahit de nombreux plans d'eau et zones humides en Europe. Au-delà de ses impacts écologiques, sa prolifération dense entrave les usages récréatifs tels que la baignade ou la pêche, altère profondément le paysage et modifie les relations des habitants à leur environnement. Chez certains riverains, ces transformations s'accompagnent d'un sentiment d'impuissance et d'une perte de lien au territoire. Encore trop peu étudiées, ces dimensions psychologiques n'en constituent pas moins une composante à part entière des enjeux de santé publique liés aux invasions biologiques, et renforcent la nécessité d'une approche intégrée de la santé.

8 La communauté scientifique débat encore de la possibilité de considérer certains agents pathogènes comme des EEE. Cette question soulève des difficultés, notamment pour définir ce qu'est un micro-organisme « exotique », déterminer l'aire naturelle d'un pathogène circulant entre plusieurs hôtes, ou encore assimiler un virus à un organisme vivant.

9 Mahon, M. B., Sack, A., Aleu, O. A., Barbera, C., Brown, E., Buelow, H., ... & Rohr, J. R. (2024). A meta-analysis on global change drivers and the risk of infectious disease [Méta-analyse des facteurs de changement global et du risque de maladies infectieuses]. *Nature*, 629(8013), 830-836. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07380-6>.

10 Lenzner, B., García-Rodríguez, A., Colling, G., Dullinger, S., Fugger, J., Glaser, M., ... & Essl, F. (2024). The neglected importance of managing biological invasions for sustainable development [L'importance négligée de la gestion des invasions biologiques pour le développement durable]. *People and Nature*, 6(5), 1804-1811. <https://doi.org/10.1002/pan3.10712>.

11 Jones, B. A. (2017). Invasive species impacts on human well-being using the life satisfaction index [Impacts des espèces envahissantes sur le bien-être humain à l'aide de l'indice de satisfaction de vie]. *Ecological Economics*, 134, 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.01.002>.





Fourmi de feu rouge importée.
© Aoyama Y

LE COÛT ÉCONOMIQUE COMME MÉTRIQUE UNIVERSELLE

Malgré l'ampleur des impacts des invasions biologiques, ce phénomène reste encore largement sous-estimé dans l'agenda international et politique. Pour alerter et sensibiliser le public et les décideurs, le coût économique s'impose comme une unité de mesure concrète et universelle : exprimés en termes monétaires, les impacts deviennent tangibles, immédiatement compréhensibles et comparables. C'est dans ce contexte qu'a été créé le réseau de recherche international *InvaCost*¹². Ce consortium rassemble plus d'une centaine de scientifiques autour d'une base de données publique et évolutive, compilant plusieurs milliers d'estimations de coûts économiques liés aux invasions biologiques. Grâce à une méthodologie standardisée, *InvaCost* permet d'analyser ces coûts à différentes échelles géographiques, taxonomiques et sociétales. Il est important de souligner que ces coûts ne constituent pas une catégorie d'impact à part entière. Ils représentent plutôt une traduction chiffrée de certains dommages écologiques, sanitaires et sociaux (pertes agricoles, frais de santé, dommages aux infrastructures...), ainsi que des dépenses publiques et privées engagées pour prévenir, gérer ou atténuer les invasions biologiques.

Les résultats issus de ces travaux sont frappants. Pour la seule année 2019, ils dépassaient 423 milliards de dollars, soit plus de 80 fois les budgets combinés de l'Organisation mondiale de la Santé et de l'ONU pour la même période. Plus inquiétant encore, ces coûts augmentent de manière exponentielle, avec un quadruplement observé chaque décennie.

Malgré ces chiffres vertigineux, les estimations actuelles restent largement sous-évaluées, ne représentant que la partie émergée de l'iceberg du fardeau économique réel des invasions biologiques à l'échelle mondiale.

QUELLES SOLUTIONS ENVISAGEABLES ?

L'IPBES propose un cadre décisionnel intégré visant à orienter les actions de gestion des invasions biologiques¹³. Ce cadre distingue trois grands leviers complémentaires : la gestion des voies d'introduction et de propagation, la gestion des espèces exotiques envahissantes elles-mêmes, et la protection ou la restauration des écosystèmes envahis. Toutes les études convergent vers un constat clair : la prévention constitue la stratégie la plus efficace et la plus rentable pour lutter contre les invasions biologiques. Les mesures de biosécurité, fondées sur l'analyse des risques avant, pendant et après l'introduction d'organismes, permettent d'intercepter les espèces exotiques avant qu'elles ne s'établissent durablement. Des pays comme la Nouvelle-Zélande ou l'Australie ont mis en place des protocoles de biosécurité stricts, couvrant aussi bien le tourisme que le commerce international. Bien que coûteuses en apparence, ces mesures représentent un investissement nettement inférieur aux coûts engendrés par la gestion à long terme d'invasions établies. Ainsi, le « coût de l'inaction », délai souvent de plusieurs années avant qu'une gouvernance ne conçoive et démarre un projet de lutte contre une invasion, peut se chiffrer en millions de dollars annuels, comme démontré par une étude récente sur l'invasion du moustique tigre¹⁴.

¹³ IPBES 2023, Résumé à l'intention des décideurs de l'évaluation thématique des espèces exotiques envahissantes et de la lutte contre leur prolifération, figure SPM.3. <https://zenodo.org/records/10004329>.

¹⁴ Ahmed, D.A., Hudgins, E.J., Cuthbert, R.N.[†], Kourantidou, M., Diagne, C., Haubrock, P.J., Leung, B., Liu, C., Leroy, B., Petrovskii, S., Beidas, A., Courchamp, F. 2022. Managing biological invasions: the cost of inaction [Gestion des invasions biologiques : le coût de l'inaction. Biological Invasions]. Biological Invasions. 10.1007/s10530-022-02755-0. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12668570>.

¹² Réseau de Recherche international InvaCost. <https://invacost.fr/>



Ainsi, la fourmi de feu fait des ravages en Australie et en Amérique du Nord, où ses piqûres extrêmement douloureuses conduisent annuellement des centaines de milliers d'Américains à des soins. Les coûts de lutte y sont estimés à plusieurs milliards par an. Des foyers d'invasions ont déjà été repérés trois fois en Nouvelle-Zélande par le public, grâce à des programmes de sensibilisation citoyenne, et ont pu être éliminés en l'espace de quelques jours. En Europe, elle a été repérée pour la première fois il y a quelques années (2022, en Sicile), mais les manques en matière de prévention, de sensibilisation, et de plans d'intervention d'urgence font que ces colonies envahissantes continuent actuellement à se propager.

Toutes les études convergent vers un constat clair : la prévention constitue la stratégie la plus efficace et la plus rentable pour lutter contre les invasions biologiques

Le renforcement des réglementations, l'actualisation rapide des listes d'espèces à risque et l'adoption d'approches plus proactives, comme les listes blanches (où seules les espèces démontrées comme non problématiques sont autorisées d'entrée sur un territoire), constituent ainsi des pistes prometteuses. Enfin, les invasions biologiques ne connaissant pas de frontières, une gouvernance intégrée et une coopération internationale renforcée sont indispensables. Le soutien aux pays disposant de capacités limitées en matière de prévention et de gestion apparaît donc comme un enjeu majeur pour répondre efficacement à cette menace globale.

Lorsque la prévention échoue, la détection précoce et la réponse rapide deviennent cruciales. À un stade plus avancé, les actions se limitent souvent au confinement, au contrôle des populations ou au ralentissement de l'invasion, avec des résultats variables et des coûts beaucoup plus élevés. Bien que de très nombreux programmes d'élimination d'espèces exotiques envahissantes aient été menés avec succès dans le monde, il s'agit presque systématiquement d'îles, dont la surface est bien délimitée, l'écosystème souvent simplifié et la présence humaine relativement faible. Un contre-exemple célèbre est celui de l'éradication spectaculaire du ragondin dans les années 1980 de l'ensemble de la Grande-Bretagne, grâce à un programme de piégeage massif coordonné à une vaste échelle spatiale et temporelle. Cela montre que des programmes ambitieux peuvent être menés avec succès même dans des conditions en théorie suboptimales.

La restauration des écosystèmes dégradés et le renforcement de leur résilience constituent aussi un levier essentiel pour limiter les impacts sanitaires et économiques des invasions biologiques. La lutte contre les invasions biologiques nécessite également des efforts soutenus en matière d'éducation et de sensibilisation. Informer les acteurs économiques, les décideurs et le grand public sur les risques associés aux introductions d'espèces exotiques est un préalable indispensable à toute action efficace. Cependant, les cadres législatifs actuels demeurent largement insuffisants face à l'augmentation rapide des invasions biologiques.

CONCLUSION

Les invasions biologiques représentent aujourd'hui une menace majeure pour la santé des socio-écosystèmes et, par définition, pour le bien-être des populations humaines. Leurs impacts, qu'ils soient écologiques, sanitaires ou économiques, sont multiples, interconnectés et souvent sous-estimés. Si la monétisation de ces impacts permet de rendre le phénomène plus tangible, elle ne saurait à elle seule refléter l'ampleur réelle des multiples perturbations engendrées. Face à l'accélération des invasions biologiques dans un contexte de changements globaux, l'enjeu n'est plus seulement scientifique, mais profondément sociétal et politique. Prévenir les introductions, agir rapidement, restaurer l'intégrité des écosystèmes et renforcer la coopération internationale constituent autant de leviers indispensables pour limiter les risques sanitaires associés. Mieux comprendre et mieux communiquer sur ces enjeux apparaît aujourd'hui comme une condition essentielle pour protéger durablement les santés humaine, animale et environnementale.

À propos des auteurs

Chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), **Christophe Diagne** développe une démarche intégrative en écologie de la santé des écosystèmes. Ses recherches se focalisent sur l'écologie des interactions dans les communautés de petits mammifères de socio-écosystèmes en mutation socio-environnementale et les implications sanitaires et socio-économiques des invasions biologiques à diverses échelles. Il intègre des collaborations multidisciplinaires à ses approches d'écologie des communautés, d'écologie parasitaire et de biostatistiques.

Ecologue et directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), titulaire de la Chaire AXA en Biologie des invasions à l'Université Paris Saclay, **Franck Courchamp** étudie les effets des activités humaines sur la biodiversité, avec une focalisation privilégiée sur les invasions biologiques. Ses travaux sont surtout à l'échelle macro-écologique, à de grandes échelles spatiales et taxonomiques (toutes les espèces animales envahissantes d'un continent, par exemple). Il s'intéresse depuis plusieurs années à réaliser des synthèses globales sur les impacts écologiques et économiques des invasions biologiques.



Ampleur des problèmes causés par les espèces exotiques envahissantes

Extinctions

Contribution à
60 %

Les espèces exotiques envahissantes ont contribué, seules ou en combinaison avec d'autres facteurs de changement, à 60 % des **extinctions mondiales** recensées, dont 90 % se sont produites sur des îles*

Coût économique

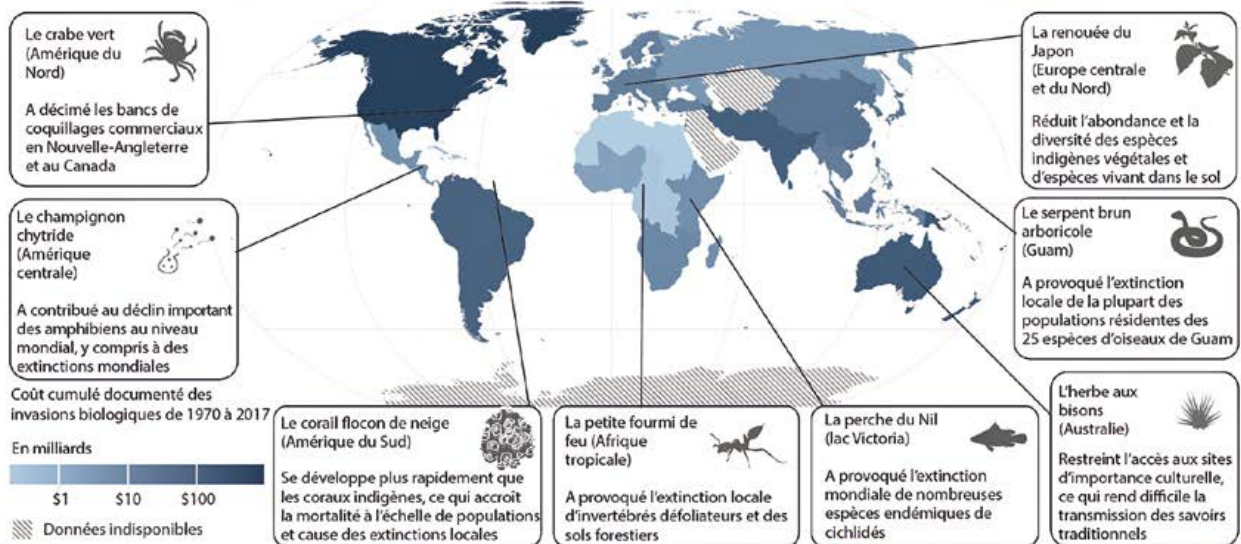
X 4
par décennie

Le **coût économique** des invasions biologiques est multiplié par quatre tous les 10 ans*

Bonne qualité de vie

85 %

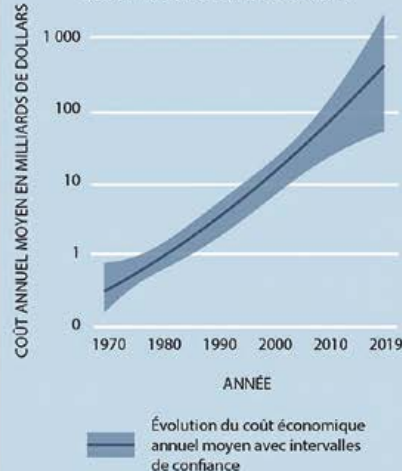
Les espèces exotiques envahissantes ont un impact négatif sur la **bonne qualité de vie** dans 85 % des cas*



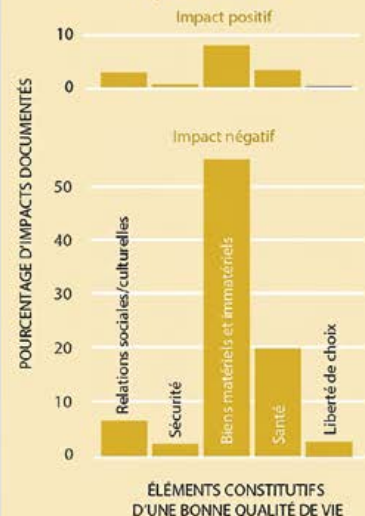
218 espèces exotiques envahissantes ont causé 1 215 **extinctions locales** d'espèces indigènes



Au niveau mondial, le **coût économique** annuel moyen des invasions biologiques a été estimé à 423 milliards de dollars en 2019



Impact connu des espèces exotiques envahissantes sur la **bonne qualité de vie**



Exemples illustrant les impacts des espèces exotiques envahissantes sur les espèces indigènes (rouge ; colonne de gauche), sur l'économie (bleu ; colonne centrale) et sur la qualité de vie (jaune ; colonne de droite). La carte au centre montre le coût économique cumulé documenté des espèces exotiques envahissantes par sous-région de l'IPBES de 1970 à 2017. (IPBES¹⁵, 2023).

15 IPBES 2023, Résumé à l'intention des décideurs de l'évaluation thématique des espèces exotiques envahissantes et de la lutte contre leur prolifération, figure SPM.1. <https://zenodo.org/records/8314303>.

Protéger la biodiversité à l'échelle communautaire en Afrique :

Optimiser les retombées positives sur le développement rural tout en limitant les risques de maladies infectieuses

Professeur Gerard Killeen

Chaire de recherche AXA en Ecologie appliquée aux agents pathogènes, Université de Cork, Irlande

La majeure partie de nos capacités de séquestration du carbone d'origine biologique, ainsi que de la biodiversité encore préservée, se concentre dans les forêts, les zones boisées, les prairies et les plaines inondables des pays tropicaux à revenu faible ou intermédiaire¹. Or, la dégradation continue de ces écosystèmes naturels, d'une richesse exceptionnelle, a favorisé l'émergence de nouveaux agents pathogènes menaçant les populations humaines². Les communautés rurales vivant à la périphérie de ces zones riches en biodiversité – où les risques de paludisme, de zoonoses et d'infections émergentes sont particulièrement élevés – figurent également parmi les plus défavorisées sur le plan socio-économique³. Par ailleurs, les stratégies de « conservation forteresse », héritées de l'époque coloniale, visaient généralement à protéger les espaces naturels en excluant strictement les populations locales. Cette approche présentait un double inconvénient : elle privait ces communautés des bénéfices liés à la biodiversité, tout en les exposant aux dangers associés, notamment les rencontres avec des animaux potentiellement dangereux et les maladies infectieuses.

Toutefois, des exemples positifs montrent la voie à suivre. Citons notamment des programmes de conservation communautaire en Afrique, fondés sur le tourisme et le financement de la lutte contre le changement climatique, ainsi que nos propres travaux menés récemment dans une zone de gestion de la faune sauvage administrée par une communauté dans le sud de la Tanzanie⁴. Ces initiatives illustrent la capacité des communautés rurales africaines à porter des modèles de conservation décentralisés, capables de lutter simultanément contre l'extrême pauvreté et les maladies infectieuses locales, tout en contribuant à la protection mondiale face aux pandémies, au changement climatique et à l'érosion du patrimoine naturel commun.

INTRODUCTION

La plupart d'entre nous, originaires de pays à revenu élevé, découvrent les spectaculaires écosystèmes tropicaux à travers les écrans de télévision et tendent à percevoir la biodiversité sous un jour très positif. La luxuriance de ces milieux stimule l'imagination et renforce l'envie de protéger la planète tant qu'il en est encore temps. Au-delà de l'attrait qu'ils exercent sur notre biophilie innée, les grandes forêts, les marécages, les zones boisées et les prairies qui jalonnent la ceinture tropicale de la planète fournissent également des services écosystémiques inestimables.

Toutefois, vivre au contact de la biodiversité tropicale s'accompagne aussi d'une multitude de risques, en particulier sur le continent dont nous sommes tous originaires. L'Afrique abrite non seulement la plupart des grands mammifères encore présents sur Terre, y compris nos plus proches parents évolutifs, mais aussi des moustiques vecteurs du paludisme particulièrement efficaces, co-évoluant avec les humains depuis plus d'un million d'années. Il n'est pas chose simple de vivre au quotidien avec la biodiversité africaine, lorsqu'elle détruit vos récoltes, piétine votre voisinage, menace de vous dévorer, tue votre bétail ou vous rend malade.

1 Strassburg et al. (2020) Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*. [Zones prioritaires à l'échelle mondiale pour la restauration des écosystèmes. *Nature*]. 586:724-9. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>.

2 Wilkinson et al. (2018) Habitat fragmentation, biodiversity loss and the risk of novel infectious disease emergence [Fragmentation des habitats, perte de biodiversité et risque d'émergence de nouvelles maladies infectieuses]. *J R Soc Interface*. 15: 20180403. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0403> ; Mahon et al. (2024) A meta-analysis on global change drivers and the risk of infectious disease [Méta-analyse des facteurs de changement global et du risque de maladies infectieuses]. *Nature*. 629:830-6. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07380-6> ; Schmeller, Courchamp & Killeen (2020) Biodiversity loss, emerging pathogens and human health risks [Perte de biodiversité, émergence d'agents pathogènes et risques pour la santé humaine]. *Biodiversity and Conservation*. 2020 ;29:3095-102. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02021-6>.

3 Sokolow et al. (2022) Ecological and socioeconomic factors associated with the human burden of environmentally mediated pathogens: a global analysis [Facteurs écologiques et socioéconomiques associés au fardeau humain des agents pathogènes d'origine environnementale : une analyse mondiale]. *Lancet Planet Health*. 6:e870-9. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00248-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00248-0).

4 Dressler et al. (2010) From hope to crisis and back again? A critical history of the global CBNRM narrative [De l'espoir à la crise puis à nouveau à l'espoir ? Une histoire critique du récit mondial de la CBNRM]. *Environmental Conservation*. 37: 5-15. <https://doi.org/10.1017/S0376892910000044> ; Brooks, Waylen & Mulder (2013). Assessing community-based conservation projects: A systematic review and multilevel analysis of attitudinal, behavioral, ecological, and economic outcomes [Évaluation des projets de conservation basés sur les communautés : revue systématique et analyse multiniveau des résultats attitudinaux, comportementaux, écologiques et économiques]. *Environmental Evidence*. 2: 2. <https://doi.org/10.1186/2047-2382-2-2>.





Plateformes construites au-dessus des champs de riz, où les agriculteurs peuvent dormir à l'abri des grands mammifères, mais où ils ne peuvent pas installer de moustiquaire de lit pour se protéger des moustiques⁵.

© Gerard Killeen

LE DÉFI DE LA COHABITATION AVEC LA BIODIVERSITÉ ET LES MALADIES ZOONIQUES

Certains risques associés aux écosystèmes tropicaux sont relativement évidents, comme les scorpions venimeux, les grands carnivores ou encore les herbivores de très grande taille. Mais les menaces les plus graves sont souvent plus discrètes, voire invisibles. Si chaque espèce animale héberge son propre ensemble de virus, parasites et bactéries pathogènes, certaines peuvent facilement infecter les êtres humains, directement ou par l'intermédiaire des animaux domestiques avec lesquels nous vivons souvent en contact étroit⁶. Ces zoonoses, c'est-à-dire les infections humaines d'origine animale, sont souvent très virulentes, comme la grippe aviaire ou la rage.

Ceux d'entre nous qui vivent dans des régions tempérées, caractérisées par une biodiversité relativement faible et des systèmes de santé publique solides, connaissent quelques exemples de zoonoses, comme la tuberculose bovine, la maladie de Lyme (transmise par les tiques) ou encore les

Les principales épidémies de ces maladies surviennent généralement dans des zones où les activités humaines fragmentent et dégradent les écosystèmes naturels de manière non contrôlée

vers intestinaux. Aujourd'hui, ces infections sont devenues assez rares dans les pays à revenu élevé, car nos interactions avec les animaux y sont très limitées et étroitement encadrées. Les rares cas résiduels de zoonoses autrefois plus courantes sont généralement liés à des activités de subsistance (élevage) ou de loisirs (possession d'animaux de compagnie ou randonnée) impliquant une exposition directe aux animaux, à leurs excréments ou aux arthropodes qu'ils hébergent.

En revanche, dans les pays tropicaux à revenu faible ou intermédiaire, les zoonoses résultent souvent des contacts avec les animaux domestiques et sauvages, de conditions d'hygiène parfois insuffisantes, de services de santé limités et de la prolifération de divers invertébrés jouant le rôle de « vecteurs relais », capables de transporter des agents infectieux d'une espèce hôte à une autre³. Ce dernier phénomène est particulièrement préoccupant sous les tropiques, où la combinaison de températures élevées et d'une grande diversité d'invertébrés favorise la fréquence des maladies à transmission vectorielle. La plupart de ces moustiques, tiques ou escargots ne se contentent pas de transporter passivement les agents pathogènes : ils en sont souvent les hôtes intermédiaires, voire principaux, au sein desquels ces agents se multiplient avant d'être transmis à un nouvel hôte. Comme ces vecteurs invertébrés sont des animaux à sang froid, la multiplication et le développement des agents pathogènes qu'ils hébergent dépendent fortement de températures ambiantes élevées. Le climat tropical n'a pas que des avantages.

La plupart des habitants des régions tropicales vivent dans des environnements fortement modifiés, tels que des zones urbaines ou des exploitations agricoles, où ils sont surtout exposés à des agents pathogènes bien connus associés aux animaux domestiques, pour lesquels il existe généralement des moyens de lutte et des traitements. En revanche, les populations vivant à proximité ou à l'intérieur d'écosystèmes tropicaux naturels préservés peuvent être exposées à des agents pathogènes encore peu connus, transmis par de nombreux oiseaux et mammifères sauvages⁶. Par exemple, certaines communautés de pêcheurs avec lesquelles nous travaillons dans le sud de la Tanzanie, dont les villages se trouvent au cœur de magnifiques forêts galeries en bord de rivière⁷, cohabitent avec plus de 400 espèces d'oiseaux et au moins 40 espèces de mammifères facilement identifiées, ainsi qu'avec de nombreuses espèces de rongeurs et de chauves-souris qui pénètrent régulièrement dans les habitations pour se nourrir ou s'abriter.

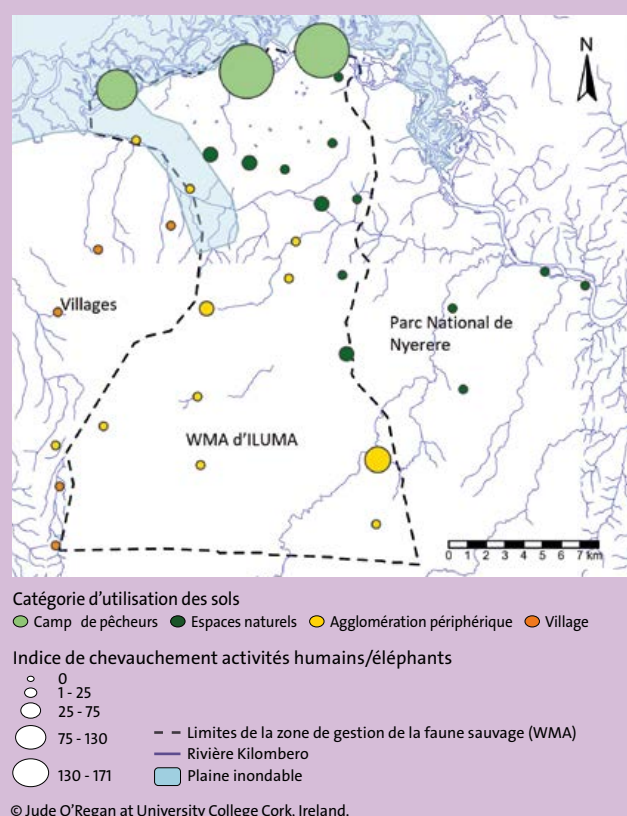
5 Kavishe et al (2025) Persistence of residual *Anopheles gambiae* populations associated with frontier human settlements and nocturnal livelihood-related activities at the fringes of a large conservation area in southern Tanzania [Persistence of populations résiduelles d'*Anopheles gambiae* associées aux établissements humains de frontière et aux activités nocturnes liées aux moyens de subsistance en périphérie d'une vaste zone de conservation dans le sud de la Tanzanie]. bioRxiv. 2025:2025.10.24.684313. <https://doi.org/10.1101/2025.10.24.684313>.

6 Keesing et al. (2010) Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases [Impacts de la biodiversité sur l'émergence et la transmission des maladies infectieuses]. Nature. 468: 647-52. <https://doi.org/10.1038/nature09575>.

7 Duggan et al. (2026) An effective model for community-based conservation around authorised fishing settlements inside a devolved Wildlife Management Area in southern Tanzania [Persistence of populations résiduelles d'*Anopheles gambiae* associées aux établissements humains de frontière et aux activités nocturnes liées aux moyens de subsistance en périphérie d'une vaste zone de conservation dans le sud de la Tanzanie]. Conserv Sci Practice, In press ; <https://doi.org/10.1111/csp.2.70290>.



Carte illustrant le chevauchement des activités des éléphants et des humains aux abords et dans la zone de gestion de la faune sauvage (WMA) d'Ifakara-Lupiro-Man'gula (ILUMA), dans le sud de la Tanzanie. Les trois seuls campements de pêcheurs autorisés le long du fleuve Kilombero, au nord, sont des « points chauds » propices aux rencontres à risque



Ce village de pêcheurs, autorisé et strictement réglementé, se situe en aval du plus vaste delta continental d'Afrique de l'Est. La fièvre de la vallée du Rift constitue une zoonose particulièrement fréquente chez les éleveurs de bétail vivant aux abords de la vallée du Kilombero⁸. Bien que les espèces de mammifères jouant le rôle de réservoirs de cette maladie n'aient pas encore été formellement identifiées, il est établi que le virus est transmis au bétail par la faune sauvage lors des épisodes d'inondation, qui favorisent la reproduction de certains moustiques du genre *Aedes* et leur passage d'un hôte à l'autre⁹. Les humains contractent parfois cette infection potentiellement grave directement par les moustiques, mais plus souvent par

L'innovation la plus prometteuse réside sans doute dans le développement croissant d'initiatives de conservation communautaire capables de mobiliser des financements internationaux liés au climat

une exposition répétée aux fluides corporels du bétail, tels que le lait ou le sang¹⁰. L'épidémiologie de la fièvre de la vallée du Rift illustre ainsi comment une zoonose majeure peut emprunter des voies de transmission distinctes impliquant à la fois la faune sauvage, le bétail et les populations humaines, convergeant précisément aux interfaces les plus perméables entre monde sauvage et sociétés humaines⁸. Il en résulte des flambées épidémiques sporadiques, à la fois dangereuses pour les humains et dévastatrices sur le plan économique en décimant les troupeaux, comme en Afrique du Sud en 1951, où une épidémie avait entraîné la mort de plus de 100 000 moutons¹⁰.

Les forêts des pays voisins situés à l'ouest et au nord-ouest, elles aussi extrêmement riches en biodiversité, abritent de nombreuses espèces de chauves-souris qui traversent l'Afrique au cours de leurs migrations et peuvent transporter certains des agents pathogènes les plus dangereux. Parmi eux figurent des filovirus tels qu'Ébola et Marburg, responsables de fièvres hémorragiques entraînant des saignements internes et externes massifs et, dans de nombreux cas, la mort en l'absence d'une prise en charge médicale rapide. Les principales épidémies de ces maladies surviennent généralement dans des zones où les activités humaines fragmentent et dégradent les écosystèmes naturels de manière non contrôlée, favorisant ainsi des contacts étroits entre les populations humaines et la faune sauvage¹¹. Lorsque leurs habitats forestiers sont perturbés, les chauves-souris peuvent se réfugier à proximité des habitations humaines et se nourrir des arbres fruitiers cultivés, augmentant ainsi les risques d'exposition via leurs sécrétions ou leurs excréments. Bien que ces espèces soient également présentes en Tanzanie, aucune épidémie d'Ébola ou de Marburg n'y avait été signalée jusqu'à récemment, ce type de transmission se produisant plus fréquemment là où les chauves-souris s'installent pour mettre bas¹². Les jeunes individus, dépourvus d'immunité acquise, excrètent en effet des quantités beaucoup plus élevées de particules virales que les adultes. Il est toutefois préoccupant de constater l'apparition, ces dernières années, de foyers de virus Marburg dans le nord-ouest de la Tanzanie, possiblement en lien avec l'évolution des conditions climatiques et des routes migratoires. L'expérience

montre que la Tanzanie et ses pays voisins disposent toutefois de capacités efficaces pour contenir et éradiquer rapidement les épidémies de fièvres hémorragiques. Ces risques paraissent bien loin de nous, quand nous vivons dans des régions tempérées où la biodiversité est plus limitée. Mais la prochaine fois que nous entendrons parler d'une épidémie d'Ébola ou de Marburg, souvenons-nous que ces pays paient un lourd tribut à cohabiter avec une biodiversité exceptionnelle, qui constitue

un patrimoine naturel mondial et une source de services écosystémiques essentiels à l'échelle de la planète.

8 Sumaye et al. (2015) Inter-epidemic acquisition of Rift Valley fever virus in humans in Tanzania [Acquisition interépidémique du virus de la fièvre de la vallée du Rift chez l'homme en Tanzanie]. *PLoS Negl Trop Dis*. 2015 ;9(2):e0003536. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003536>.

9 Walsh, de Smalen & Mor (2017) Wetlands, wild Bovidae species richness and sheep density delineate risk of Rift Valley fever outbreaks in the African continent and Arabian Peninsula [Les zones humides, la richesse spécifique des Bovidae sauvages et la densité ovine définissent le risque d'épidémies de fièvre de la vallée du Rift sur le continent africain et dans la péninsule Arabique]. *PLoS Negl Trop Dis*. 11:e0005756. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005756>.

10 Nanyingi et al. (2015) A systematic review of Rift Valley Fever epidemiology [Revue systématique de l'épidémiologie de la fièvre de la vallée du Rift]. 1931–2014. *Infect Ecol Epidemiology*. 5:28024. <https://doi.org/10.3402/iee.v5.28024>.

11 Wilkinson et al. (2018) Habitat fragmentation, biodiversity loss and the risk of novel infectious disease emergence [Fragmentation des habitats, perte de biodiversité et risque d'émergence de nouvelles maladies infectieuses]. *J R Soc Interface*. 15: 20180403. <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0403>.

12 Reed Hranac et al. (2019) Predicting Ebola virus disease risk and the role of African bat birthing [Prévision du risque de maladie à virus Ebola et rôle des mises bas chez les chauves-souris africaines]. *Epidemics*. 29:100366. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2019.100366>.





Le campement autorisé de pêcheurs de Mikeregembe, à l'extrémité orientale des trois zones à haut risque de rencontres entre éléphants et humains figurant sur la carte de la WMA d'Ifakara-Lupiro-Man'gula (ILUMA) dans le sud de la Tanzanie.
© Gerard Killeen

Cependant, les contacts à risque entre espèces ne se limitent pas aux écosystèmes naturels dégradés : ils peuvent aussi survenir loin de ces milieux, notamment sur des marchés urbains où le commerce d'animaux exotiques reste fréquent. Comme l'a montré la COVID-19¹³, des virus capables de circuler entre de nombreuses espèces de mammifères, puis de se propager au sein de populations humaines denses, peuvent rapidement dépasser le stade de foyers locaux pour évoluer en épidémies régionales, voire en pandémies mondiales. Si l'on avait laissé ces animaux dans leur habitat naturel, rien de tout cela ne serait arrivé. La leçon à retirer est peut-être que le problème ne vient pas de la biodiversité elle-même, mais de la manière dont nous interagissons avec elle. Il est essentiel de respecter les barrières écologiques qui séparent des espèces ayant eu peu de contacts au cours de l'évolution, plutôt que de favoriser en toute désinvolture le mélange des agents pathogènes et de leurs hôtes.

REMETTRE EN PLACE LES BARRIÈRES NATURELLES ENTRE LES ESPÈCES ANIMALES ET LEURS PATHOGÈNES VIA UNE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EFFICACE

Il est donc essentiel que les zones de conservation riches en biodiversité soient non seulement délimitées sur les cartes, mais aussi effectivement protégées sur le terrain. En Afrique, les risques d'émergence de nouveaux agents pathogènes ont été clairement localisés dans les zones périphériques fortement dégradées des écosystèmes forestiers menacés, et non au cœur des forêts intactes, à la biodiversité exceptionnelle¹¹. Une zoonose particulièrement virulente, responsable

d'environ un quart des fièvres en Asie tropicale¹⁴, illustre bien ce phénomène : le typhus des broussailles. Cette maladie, causée par une bactérie rickettsienne, est étroitement associée aux paysages fragmentés, où alternent forêts, fourrés, bois et prairies, favorisant la prolifération de ses hôtes réservoirs (les rongeurs) et de ses vecteurs (les aoûtats)¹⁵. De même, la faune à l'origine de la COVID-19 a été rassemblée à Wuhan depuis des zones sauvages dispersées situées plus au sud, qui auraient pu être mieux protégées contre le braconnage et les trafics.

La surveillance et la protection des écosystèmes naturels ont un coût élevé, ce qui implique que les zones de conservation doivent disposer de revenus suffisants pour être viables. Malheureusement, comme la majorité des 21 magnifiques parcs nationaux de Tanzanie ne reçoivent pas assez de visiteurs pour être rentables, les contribuables nationaux doivent mettre la main à la poche. Malgré les efforts déployés pour attirer davantage de touristes, ces parcs restent encore loin de l'autonomie financière. Et bien qu'ils couvrent près de 100 000 km² de terres protégées, cette superficie demeure insuffisante pour garantir le maintien d'écosystèmes pleinement fonctionnels, capables de soutenir des populations de grands mammifères souvent peu denses et/ou migratrices sur de très longues distances.

La Tanzanie protège ses grands parcs et réserves en les entourant de zones tampons supplémentaires, dont un nombre croissant est désormais géré de manière décentralisée par les communautés locales. Le gouvernement a ainsi autorisé 22 structures communautaires à administrer des zones de gestion de la faune sauvage (*Wildlife Management Areas* ou WMA), dans le cadre d'un dispositif juridique solide.

¹³ Worobey et al. (2021) Dissecting the early COVID-19 cases in Wuhan [Analyse des premiers cas de COVID-19 à Wuhan]. Science. <https://doi.org/10.1126/science.abm4454> ; Xiao et al. (2021) Animal sales from Wuhan wet markets immediately prior to the COVID-19 pandemic [Ventes d'animaux sur les marchés humides de Wuhan immédiatement avant la pandémie de COVID-19]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91470-2>.

¹⁴ Dasgupta et al. (2024) Global seroprevalence of scrub typhus: a systematic review and meta-analysis [Séroprévalence mondiale du typhus des broussailles : revue systématique et méta-analyse]. Scientific Reports. 14:10895. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61555-9>.

¹⁵ Han et al. (2025) Current and Future Projection of Scrub Typhus Risk Related to Land Use Change in China [Projection actuelle et future du risque de typhus des broussailles lié aux changements d'utilisation des terres en Chine]. Geohealth. 2025 Sep 14;9(9):e2024GH001203. <https://doi.org/10.1029/2024gh001203>.



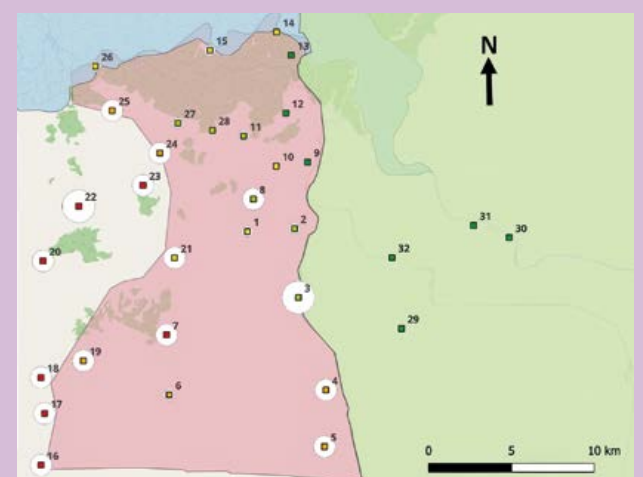
Le pangolin est l'animal sauvage le plus touché par le trafic illégal au monde. On pense qu'il a été l'hôte intermédiaire par lequel les bêta-coronavirus des chauves-souris ont évolué pour devenir le COVID-19¹⁶, dans les conditions de promiscuité et d'inhumanité qui régnaient sur le marché d'animaux vivants à Wuhan¹⁷. Ci-dessus, un pangolin indien (*Manis crassicaudata*) sauvé du commerce d'animaux vivants dans l'ouest du Pakistan¹⁷.
© Dr Sayantani M. Basak de l'University College Cork, Irlande, et Dr Tariq Ahmad de la Northeast Forestry University, Chine

Les populations locales portent donc ces initiatives de conservation, tandis que l'État continue d'en assurer la supervision et le soutien¹⁸. Gérées localement, ces zones jouent un rôle de tampon autour des parcs et réserves, tout en permettant aux communautés ayant mis en commun les terres villageoises de tirer des bénéfices socio-économiques de la biodiversité qu'elles protègent. Certaines, comme celle de Burunge, rencontrent déjà un réel succès : elles s'appuient sur le tourisme « classique », leur principale source de revenus, pour générer des excédents finançant des services communautaires tels que des écoles, des cliniques ou des coopératives¹⁹. La plupart, toutefois, peinent encore à atteindre une rentabilité suffisante²⁰. De nouvelles

sources de financement sont donc explorées, parmi lesquelles le financement climatique apparaît comme l'une des pistes les plus prometteuses (par exemple : <https://carbontanzania.com/> and <https://reforesafira.com/>).

Notre expérience au sein de la zone de gestion de la faune sauvage d'Ifakara-Lupiro-Mang'ula (ILUMA) montre clairement qu'un modèle économique fragile et des sources de revenus insuffisantes favorisent l'empiètement progressif sur les terres²¹ et l'aggravation visible des risques de zoonoses. En l'absence de financements suffisants pour soutenir des patrouilles de gardes issus des communautés locales, le pâturage illégal du bétail au cœur des zones forestières devient fréquent. Or, ce sont précisément dans ces espaces censés être protégés²² que se concentrent les foyers de transmission de la fièvre de la vallée du Rift, étroitement liés à ce type de pratiques⁹.

Pâturage illégal de bétail et conséquences sur l'intégrité de l'écosystème naturel dans la zone de gestion de la faune sauvage d'Ifakara-Lupiro-Mang'ula (ILUMA), adjacente au Parc National de Nyerere (NNP)⁷



Indice d'Intégrité de l'Écosystème
■ 0 - 17 ■ 17 - 50,8 ■ 50,8 - 78,8 ■ 78,8 - 85,8 ■ 85,8 - 100

Troupeaux de bovins (grands et petits)

○ 1 - 5 ○ 5 - 9 ○ 9 - 14
■ NNP
■ Marais de Kilombero
■ ILUMA
— Route d'Ifakara

Le plus préoccupant n'est pas seulement le lieu de ces intrusions illégales, mais aussi le mode de vie des personnes concernées, entièrement exposées à la biodiversité environnante, ce qui

16 Yang et al. (2023) The species coalescent indicates possible bat and pangolin origins of the COVID-19 pandemic [Le coalescent des espèces indique des origines possibles chez les chauves-souris et les pangolins de la pandémie de COVID-19]. *Sci Rep* 13: 5571. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32622-4>.

17 Ahmad et al. (2026) Exploring Habitat Preferences, Suitability, and Illegal Trade Routes of Indian Pangolins in Western Pakistan: Implications for Conservation [Exploration des préférences d'habitat, de la pertinence écologique et des routes de commerce illégal des pangolins indiens dans l'ouest du Pakistan : implications pour la conservation]. *Ecology and Evolution* 16: e72610. <https://doi.org/10.1002/ece3.72610>.

18 Wilfred (2010) Towards sustainable Wildlife Management Areas in Tanzania [Vers des aires de gestion de la faune sauvage durables en Tanzanie]. *Trop Conserv Sci*. 3:103-16 ; Government of Tanzania (2023) National Wildlife Management Area Strategy (2023-2033). <https://doi.org/10.1177/194008291000300102>.

19 Kisingo & Kideghesho (2020) Community Governance of Wildlife Resources: Implications for Conservation, Livelihood, and Improvement in Democratic Space [Gouvernance communautaire des ressources fauniques : implications pour la conservation, les moyens de subsistance et le renforcement de l'espace démocratique]. In: Durrant et al. (eds). https://doi.org/10.1007/978-3-030-43302-4_8. Protected Areas in Northern Tanzania: Local Communities, Land Use Change, and Management Challenges [Aires protégées dans le nord de la Tanzanie : communautés locales, changements d'usage des terres et défis de gestion]. Cham: Springer International Publishing ; p. 113-20. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43302-4>.

20 Bluwstein et al. (2018) A quasi-experimental study of impacts of Tanzania's wildlife management areas on rural livelihoods and wealth [Étude quasi expérimentale des impacts des aires de gestion de la faune sauvage en Tanzanie sur les moyens de subsistance ruraux et la richesse]. *Scientific Data*. 5: 180087. doi: 10.1038/sdata.2018.87. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.87>.

21 Tarimo et al. (2025) The Role of Resident Custodian Communities in Devolved Forest Conservation: Lessons from a retrospective, mixed-method observational study of the Ifakara-Lupiro-Mang'ula Wildlife Management Area in Southern Tanzania [Rôle des communautés résidentes dépositaires dans la conservation forestière décentralisée : enseignements tirés d'une étude observationnelle rétrospective à méthodes mixtes de la Wildlife Management Area d'Ifakara-Lupiro-Mang'ula dans le sud de la Tanzanie]. <https://doi.org/10.1101/2025.10.20.683348>.

22 Tarimo et al (2025) Stakeholder perspectives on the effectiveness of the Ifakara-Lupiro-Mang'ula wildlife management area in Southern Tanzania. *Environmental Challenges* [Points de vue des parties prenantes sur l'efficacité de la Wildlife Management Area d'Ifakara-Lupiro-Mang'ula dans le sud de la Tanzanie]. 20:101214. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101214>.



constitue un facteur de risque bien connu pour les maladies zoonotiques²³. Alors que les visiteurs autorisés dans les zones de gestion de la faune sauvage portent généralement des bottes, dorment sous tente et disposent de l'équipement nécessaire pour maintenir une bonne hygiène, les braconniers, charbonniers et bûcherons clandestins se déplacent avec le strict minimum afin de pouvoir fuir rapidement en cas de contrôle. Leurs campements, rudimentaires, les exposent directement à la faune forestière : des rongeurs qui contaminent les ustensiles et les réserves alimentaires, aux chauves-souris qui se perchent au-dessus d'eux pendant la nuit, sans oublier les moustiques et les grands carnivores susceptibles de les attaquer pendant qu'ils dorment.



Campements clandestins rudimentaires où dorment les braconniers, charbonniers et bûcherons clandestins quand ils empiètent sur des zones de protection mal sécurisées, comme la WMA d'ILUMA.

© Gerard Killeen

EXEMPLES DE RÉUSSITES QUI AUTONOMISENT LES COMMUNAUTÉS LOCALES, PROTÈGENT LA BIODIVERSITÉ, CONTRIBUENT À ATTÉNUER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, TOUT EN NOUS PROTÉGEANT CONTRE LES PANDÉMIES

Heureusement, la plupart de ces risques peuvent être fortement atténués grâce à des solutions émergentes visant à financer l'application effective des règles de protection et à soutenir le développement socio-économique, afin de motiver les communautés locales tout en réduisant les risques sanitaires. Si certaines WMA ont déjà bénéficié du tourisme photographique,

cynégétique ou halieutique traditionnel, l'innovation la plus prometteuse réside sans doute dans le développement croissant d'initiatives de conservation communautaire capables de mobiliser des financements internationaux liés au climat. Si vous souhaitez réduire votre empreinte carbone de manière concrète, je vous invite à consulter le *Carbon Tanzania* de *Reforest Africa* websites. Il propose différentes opportunités de protection des forêts menacées, tout en contribuant à l'autonomisation socio-économique de communautés rurales africaines en situation de grande précarité.

Un exemple particulièrement encourageant est celui des communautés ayant accès au marché mondial du financement carbone via *Carbon Tanzania*. Des accords en cours permettent ainsi de protéger les magnifiques territoires ancestraux des chasseurs-cueilleurs Hadza et des éleveurs Datooga vivant autour du lac Eyasi, ainsi que ceux des éleveurs masais autour de la zone de gestion de la faune sauvage (WMA) de Makame, dans le nord de la vallée du Rift. Dans les régions plus humides du sud, où la capacité de séquestration du carbone est encore plus élevée, les forêts des monts Ntakata offrent un refuge à des centaines de chimpanzés de l'Est, une espèce menacée, tout en finançant divers services communautaires, dont l'accès à une couverture d'assurance maladie. Autre évolution positive : la WMA d'ILUMA, avec laquelle nous travaillons étroitement depuis six ans, avec le soutien inestimable de *Reforest Africa*, ont désormais conclu un accord pour un projet d'investissement en restauration forestière avec la société de commercialisation de crédits carbone *Lasting Forest Solutions*, visant à permettre à cette initiative communautaire prometteuse d'accéder aux financements internationaux du carbone au cours des cinq prochaines années.

CONCLUSION

Ces initiatives offrent également des emplois de qualité à de nombreux habitants des villages, qui peuvent devenir gardes-chasse ou agents de protection chargés de préserver ces écosystèmes exceptionnels contre les intrusions et les risques associés à la biodiversité. En soutenant, au niveau communautaire, l'application de règles de protection adaptées aux contextes locaux, il est possible non seulement de préserver des paysages d'une biodiversité remarquable et de favoriser le développement socio-économique là où il est le plus nécessaire, mais aussi de réduire significativement les risques d'épidémies zoonotiques locales et de pandémies mondiales liées à l'émergence de nouveaux agents pathogènes. En exprimant notre solidarité avec les communautés locales qui protègent la biodiversité tropicale avec des moyens financiers souvent limités, nous pouvons à la fois contribuer à réduire leur exposition aux maladies zoonotiques et renforcer notre propre protection face aux infections émergentes qui concernent l'ensemble de la population mondiale.

23 Salerno et al. (2017) Human-Wildlife Interactions Predict Febrile Illness in Park Landscapes of Western Uganda [Les interactions entre humains et faune sauvage permettent de prédire les maladies fébriles dans les paysages de parcs en Ouganda occidental]. *Ecohealth*. 14: 675-90. <https://doi.org/10.1007/s10393-017-1286-1> ; Sokolow et al. (2022) Ecological and socioeconomic factors associated with the human burden of environmentally mediated pathogens: a global analysis [Facteurs écologiques et socioéconomiques associés au fardeau humain des agents pathogènes d'origine environnementale : une analyse mondiale]. *Lancet Planet Health*. 6: e870-9. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00248-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00248-0).

À propos de l'auteur

Depuis six ans, le professeur **Gerard Killeen** et son équipe étudient l'écologie comportementale des moustiques vecteurs du paludisme en Afrique qui, en se nourrissant d'animaux sauvages et en se reproduisant loin des populations, de l'agriculture et du bétail, n'ont aucun contact avec les pesticides. Les chercheurs s'efforcent de rendre plus durables les stratégies entreprises pour lutter contre cette résistance des arthropodes. Au cours de cette étude fondamentale sur l'écologie des vecteurs, Gerard Killeen et son équipe ont travaillé en étroite collaboration avec une zone de gestion de la faune sauvage (Wildlife Management Area ou WMA) dans le sud de la Tanzanie, afin d'aider les communautés locales à atteindre un double objectif de protection de l'environnement et de développement rural.



Les oiseaux comme sentinelles écologiques : l'émergence des maladies aviaires face à la crise de la biodiversité

Tamara Szentivanyi : Chercheuse à HUN-REN Centre de recherche écologique à Vácrátót, Hongrie à l'Institut de métagénomique, Université de Debrecen, Hongrie

Les oiseaux ont toujours joué un rôle clé dans nos vies, autrefois en tant que messagers, aujourd'hui en tant qu'indicateurs des changements environnementaux. Dans toute l'Europe, la présence d'agents pathogènes transmis par les oiseaux est en hausse, notamment le virus du Nil occidental (VNO), le virus Usutu (USUV) et divers virus de la grippe aviaire ou influenza aviaire (AIV), ce qui révèle une tendance très inquiétante. Ces agents pathogènes circulent principalement chez les oiseaux, provoquant parfois des maladies graves, mais infectent rarement les humains et autres mammifères, généralement avec des symptômes bénins. Or, avec la fragmentation des habitats et le déclin de la biodiversité, les barrières naturelles contre l'émergence d'agents pathogènes s'affaiblissent.

CIRCULATION DES VIRUS DU NIL OCCIDENTAL (VNO) ET USUTU (USUV) : LE RÔLE DES OISEAUX ET MOUSTIQUES EN TANT QUE VECTEURS

Le VNO, transmis par les moustiques, est l'un des agents pathogènes aviaires les plus répandus. Comme il se propage avec les oiseaux le long des routes migratoires, il est désormais présent dans toute l'Europe. Les épidémies sont en hausse chez les oiseaux, les chevaux et les populations humaines. En 2025, 1112 cas humains ont été signalés dans 14 pays européens, principalement en Italie, en Grèce et en France, ainsi que 359 épidémies chez les oiseaux¹. Certaines espèces, comme les merles, les pies et les rapaces, agissent comme des réservoirs d'agents pathogènes². En revanche, les moustiques, tels que le moustique commun (*Culex pipiens*), sont des vecteurs : ils transmettent l'agent pathogène entre les hôtes. Si la plupart des infections humaines sont asymptomatiques, des cas neurologiques graves et des décès peuvent survenir, en particulier pendant les vagues de chaleur ou les périodes de fortes précipitations, qui favorisent le développement des

moustiques. Des centaines d'infections humaines sont signalées chaque année en Europe, avec une forte augmentation ces dernières années : 709 à 1400 cas par an entre 2022 et 2024, contre moins de 300 entre 2010 et 2017 et seulement quelques cas sporadiques au début des années 2000¹.

L'USUV est apparu en 1996 en Italie, avant de se propager en Europe centrale et occidentale³, principalement par l'intermédiaire des merles. Les humains, rarement touchés par la maladie, doivent tout de même rester attentifs aux mortalités périodiques d'oiseaux, qui constituent une alerte éco-épidémiologique.

GRIPPE AVIAIRE : QUAND LES OISEAUX MIGRATEURS RENCONTRENT DES ÉCOSYSTÈMES MENACÉS

Les oiseaux migrateurs sauvages sont également des réservoirs naturels du virus de la grippe aviaire (AIV), notamment les virus hautement pathogènes H5N1 et H5N8. En 2025, des épidémies ont été signalées dans 29 pays européens, touchant particulièrement les oiseaux aquatiques et les grues cendrées. En Allemagne, environ 20 000 grues seraient décédées lors de ces épidémies⁴. Et même si certaines de ces infections sont asymptomatiques, elles peuvent entraîner la mort massive d'oiseaux et se propager à la volaille, au bétail (bovins ou visons) et aux humains. Les conséquences sanitaires et économiques peuvent être considérables, notamment l'abattage de millions de volailles chaque année, plus de 70 cas de la maladie chez les humains et plusieurs décès dans le monde⁵.

La dynamique de transmission des maladies est également affectée par la perte de biodiversité, qui perturbe l'équilibre naturel entre les hôtes, les vecteurs et les agents pathogènes

¹ Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC). Infection du virus du Nil occidental. <https://www.ecdc.europa.eu/en/west-nile-virus-infection>.

² Ces animaux abritent l'agent pathogène qui peut s'y maintenir et se multiplier.

³ Engel, D., Jöst, H., Wink, M., Börstler, J., Bosch, S., Garigliany, M. M., ... & Schmidt-Chanasit, J. (2016). Reconstruction of the evolutionary history and dispersal of Usutu virus, a neglected emerging arbovirus in Europe and Africa [Reconstruction de l'histoire évolutive et de la dispersion du virus Usutu, un arbovirus émergent négligé en Europe et en Afrique]. *MBio*, 7(1), 10-1128. <https://doi.org/10.1128/mbio.01938-15>.

⁴ Günther, A. et al. (2025). High pathogenicity avian influenza virus H5N1 (clade 2.3.4.4b) drives mass mortality in Eurasian crane (*Grus grus*) populations in Germany [Le virus de la grippe aviaire hautement pathogène H5N1 (clade 2.3.4.4b) entraîne une mortalité massive dans les populations de grues cendrées (*Grus grus*) en Allemagne], 2025. Biorxiv, Prépublication. <https://doi.org/10.64898/2025.12.08.692485>.

⁵ Organisation mondiale de la santé animale (OMSA). Grippe aviaire. <https://www.woah.org/fr/maladie/influenza-aviaire/>.



Ces dernières années, les épidémies d'AIV ont tendance à devenir plus fréquentes et plus intenses. Entre septembre et novembre 2025, il y a eu six fois plus d'épidémies chez les oiseaux sauvages qu'en 2024 et douze fois plus qu'en 2023. Chez les oiseaux domestiques, sur la période de septembre à novembre 2025, il y a eu à peu près le même nombre d'épidémies qu'en 2024 et 2022, mais cinq fois plus qu'en 2023 et presque deux fois plus qu'en 2021¹.

Ces augmentations reflètent des changements environnementaux (perte d'habitat et de biodiversité, modification des routes migratoires) qui perturbent la dynamique naturelle des maladies. Il est désormais prouvé que la perte d'habitats dans les zones humides le long des voies migratoires entraîne une concentration des oiseaux aquatiques sur un nombre de sites d'escale réduits, ce qui renforce les taux de contact, la transmission du virus de la grippe aviaire et les risques d'épidémie⁶. Face à cet effacement des barrières entre la santé de la faune sauvage, du bétail et des humains, nous devons nous pencher sur les facteurs écologiques qui entraînent l'émergence des maladies.

LA BARRIÈRE ÉCOLOGIQUE : COMMENT LA BIODIVERSITÉ LIMITE LES RISQUES PATHOGÈNES

La position de l'Europe, le long des principales voies migratoires reliant l'Afrique et l'Asie, favorise l'échange de pathogènes tropicaux et tempérés, notamment la grippe aviaire et le virus du Nil occidental.

La dynamique de transmission des maladies est également affectée par la perte de biodiversité, qui perturbe l'équilibre naturel entre les hôtes, les vecteurs et les agents pathogènes. Plus la diversité d'hôtes aviaires est élevée, plus l'incidence du VNO est faible chez l'homme⁷, et plus la diversité d'oiseaux non-passereaux (par exemple, les pics) est élevée, plus le taux d'infection

Propagation mondiale de la grippe aviaire hautement pathogène (en marron) et du virus du Nil occidental (en rouge) par rapport à l'Europe



Source : Créé via BioRender (biorender.com) par Tamara Szentivanyi

par le VNO est faible chez les moustiques et les humains⁸. En effet, dans les environnements riches en biodiversité, « l'effet de dilution » réduit la probabilité qu'un agent pathogène trouve un hôte compétent. En revanche, quand la biodiversité diminue, le nombre d'espèces réservoirs tampons et incompetentes diminue, laissant la place à quelques « généralistes » (moineaux domestiques, merles ou pigeons sauvages) qui prospèrent dans des habitats perturbés et peuvent transmettre certaines maladies⁹.

Ainsi, les environnements peu variés, dominés par quelques espèces communes, notamment les élevages avicoles intensifs ou les zones urbaines, favorisent la multiplication des agents pathogènes et le nombre de vecteurs. En outre, ces mêmes espaces entretiennent une proximité entre la faune sauvage, le bétail et les humains, ce qui accroît le risque de propagation. Plus la biodiversité décline, plus le risque d'épidémie est élevé.

6 Yin, S. et al. (2022). Habitat loss exacerbates pathogen spread: An agent-based model of avian influenza infection in migratory waterfowl [La perte d'habitat exacerbe la propagation des agents pathogènes : un modèle basé sur les agents de l'infection par l'influenza aviaire chez les oiseaux d'eau migrateurs]. PLOS Computational Biology, 18(8), e1009577. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009577>.

7 Swaddle, J. P., & Calos, S. E. (2008). Increased Avian Diversity Is Associated with Lower Incidence of Human West Nile Infection: Observation of the Dilution Effect [Une diversité aviaire accrue est associée à une incidence plus faible de l'infection humaine par le virus du Nil occidental : observation de l'effet de dilution]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002488>.

8 Ezenwa, V. O. et al. (2006). Avian diversity and West Nile virus: testing associations between biodiversity and infectious disease [Diversité aviaire et virus du Nil occidental : mise à l'épreuve des associations entre biodiversité et maladies infectieuses]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 273(1582), 109–117. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3284>.

9 Keesing, F., & Ostfeld, R. S. (2021). Impacts of biodiversity and biodiversity loss on zoonotic diseases [Impacts de la biodiversité et de la perte de biodiversité sur les maladies zoonotiques]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(17), e2023540118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023540118>.

LA SANTÉ HUMAINE ET LE COÛT D'UNE BIODIVERSITÉ DÉGRADÉE

S'il est difficile de mesurer le poids des maladies aviaires sur la santé humaine, la tendance est claire : les zoonoses coûtent cher en soins de santé et réduisent la productivité des personnes et du secteur agricole, par l'absentéisme, l'abattage massif du bétail et de la volaille, la baisse de la production et la nécessité d'investir dans la surveillance et la lutte contre les vecteurs¹⁰. En outre, l'émergence d'agents pathogènes associés à la faune sauvage met en évidence le lien étroit entre la santé humaine et celle des écosystèmes.

La détection précoce des agents pathogènes aviaires dans les populations d'oiseaux sauvages permet d'agir rapidement pour limiter leur propagation et réduire le risque de transmission à l'homme. Un exemple bien documenté est celui de l'émergence du VNO aux États-Unis vers 1999-2000. Les signalements de corbeaux morts, qui ont révélé la présence du virus, ont permis de renforcer la surveillance, la lutte contre les moustiques et la sensibilisation du public à la protection individuelle. Grâce aux mesures prises, des oiseaux positifs au VNO ont été détectés plus de trois mois avant les premiers cas humains, ce qui a permis d'intervenir à temps¹¹.

Nous devons intégrer à nos politiques la préservation de la biodiversité, la surveillance des agents pathogènes et la santé publique, dans le cadre d'une stratégie *One Health* (Une seule santé)¹². La protection des habitats naturels

contribue à préserver la diversité aviaire et à limiter les épidémies. Les zones humides protégées, comme les sites Ramsar, sont moins propices aux épidémies de grippe aviaire, probablement parce qu'elles séparent les oiseaux aquatiques sauvages des zones dominées par l'homme et limitent la propagation aux environnements « domestiques »¹³.

La surveillance dans le cadre de *One Health*, qui consiste à effectuer un suivi de la faune sauvage, du bétail et des humains, permet de détecter la circulation d'agents pathogènes aviaires avant qu'ils ne provoquent une crise de santé publique. Citons par exemple le dépistage de l'AIV chez les oiseaux aquatiques migrateurs, la surveillance des chevaux malades et le dépistage précoce chez les ouvriers avicoles ou les riverains.

On voit désormais l'investissement dans la protection de la biodiversité, la préservation des espèces et l'urbanisme durable comme un effort préventif pour le bien de la santé humaine mondiale. En accordant la priorité aux espèces parapluies, dont la protection profite indirectement à plusieurs espèces coexistantes et à des habitats entiers, comme les oiseaux aquatiques migrateurs ou les oiseaux dépendants des zones humides, nous pouvons atténuer les épidémies en préservant l'intégrité des habitats et la diversité des communautés d'oiseaux, pour réduire le risque de surpeuplement et de propagation des agents pathogènes.

Si nous n'agissons pas maintenant, le coût pour la santé publique sera bien plus élevé demain. Les oiseaux sont des messagers : en nous signalant la menace que représente la perte de biodiversité pour la santé humaine, ils nous montrent la nécessité d'une conservation proactive.

10 Bernstein, A. S., Ando, A. W., Loch-Temzelides, T., Vale, M. M., Li, B. V., Li, H., & Dobson, A. P. (2022). The costs and benefits of primary prevention of zoonotic pandemics [Les coûts et les bénéfices de la prévention primaire des pandémies zoonotiques]. *Science Advances*, 8(5), eabl4183. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4183>.

11 Eidson, M., Kramer, L., Stone, W., Hagiwara, Y., Schmit, K., & New York State West Nile Virus Avian Surveillance Team. (2001). Dead bird surveillance as an early warning system for West Nile virus [La surveillance des oiseaux morts comme système d'alerte précoce pour le virus du Nil occidental]. *Emerging infectious diseases*, 7(4), 631. <https://doi.org/10.3201/eid0704.010405>.

12 Cunningham, A. A., Daszak, P., & Wood, J. L. (2017). One Health, emerging infectious diseases and wildlife: two decades of progress? [One Health, maladies infectieuses émergentes et faune sauvage : deux décennies de progrès ?] *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1725), 20160167. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0167>.

13 Wu, T., Perrings, C., Shang, C., Collins, J. P., Daszak, P., Kinzig, A., & Minter, B. A. (2020). Protection of wetlands as a strategy for reducing the spread of avian influenza from migratory waterfowl [Protection des zones humides comme stratégie de réduction de la propagation de l'influenza aviaire chez les oiseaux d'eau migrateurs]. *Ambio*, 49(4), 939–949. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01238-2>.

À propos de l'auteur

Dr Szentivanyi a obtenu son doctorat en 2020 à l'Université de Lausanne (Suisse), où elle a étudié l'écologie et l'évolution des chauves-souris sous l'angle de leurs agents pathogènes et de leurs parasites. Elle est actuellement chercheuse au Centre de recherche écologique HUN-REN ainsi qu'à l'Institut de métagénomique de l'Université de Debrecen (Hongrie). Ses travaux, soutenus par une bourse AXA, portent sur les maladies transmises par les moustiques et sur l'influence des facteurs écologiques et environnementaux, notamment le changement climatique, sur les relations entre les arbovirus et les oiseaux. Les instituts dans lesquels elle travaille mènent par ailleurs des recherches sur un large éventail de questions écologiques et environnementales liées à la santé humaine et à celle des écosystèmes.





Surveiller la santé des oiseaux et les agents pathogènes associés aux oiseaux permet d'observer la dynamique des maladies interspèces et d'identifier rapidement des menaces émergentes.
© Tamara Szentivanyi

3

**Préserver
la biodiversité,
protéger la santé :
quelles solutions ?**



L'indissociable lien entre stabilité des écosystèmes et santé humaine nécessite de dépasser le seul constat des dégradations pour s'engager dans des dynamiques de restauration du vivant. La préservation de la biodiversité appelle une action coordonnée à tous les niveaux, soutenue par une prise de conscience croissante du grand public. Les mobilisations suscitées en France par la proposition de loi Duplomb, qui cherchait à ré-autoriser l'acétamipride, pesticide interdit en France depuis 2018, ont mis en évidence une compréhension nouvelle des risques que fait peser l'affaiblissement des pollinisateurs sur la santé humaine et la sécurité alimentaire, révélant une évolution du débat public autour de la biodiversité et de notre dépendance à son égard.

Malgré l'échec global des Objectifs d'Aichi, des progrès en matière de protection des écosystèmes et de la biodiversité ont été accomplis. Le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique soulignait certains de ces progrès en 2020, tels que le succès de certaines politiques de gestion des pêches dans la restauration de populations piscicoles, la réduction du nombre d'extinctions d'espèces ou encore l'augmentation du nombre d'informations et données relatives à la biodiversité accessibles aux citoyens¹. Il est donc toujours possible de lutter contre l'érosion du vivant, à condition d'engager des actions de remédiation et de réduction des pressions anthropiques. Des réponses intégrées, menées simultanément aux échelles individuelle, locale, nationale et globale, peuvent générer des bénéfices substantiels pour la conservation du vivant et la santé. Cette troisième partie explore les actions mises en place à différents niveaux (institutionnels, globaux et locaux) afin de mobiliser et d'inverser les trajectoires actuelles de dégradation des écosystèmes.

Via l'exemple de Veolia, **Sébastien Daziano**, **Tiphaine Déas** et **Jean-Pierre Maugendre** analysent comment l'intégration de la biodiversité dans les pratiques industrielles permet de concilier performance opérationnelle et restauration des écosystèmes. En s'appuyant sur des actions locales et des solutions fondées sur la nature, Veolia transforme ses sites industriels en espaces favorables au vivant, propices à la réapparition ou à la protection d'espèces endémiques. Cette approche met en évidence la capacité d'actions locales structurées à générer des bénéfices environnementaux, sociaux et sanitaires mesurables.

Henri Bourgeois-Costa et **Pierre Mienville** proposent une lecture du concept de *One Health* (Une seule santé) vu de l'Océan, en soulignant l'interdépendance fondamentale entre santé humaine et santé des écosystèmes marins. Ainsi, il est vital d'intégrer pleinement cette interdépendance dans les stratégies de préservation de la biodiversité et de protection de la santé, en se fondant sur une approche scientifique et dés-anthropocentrée.

La mobilisation de financements privés en faveur de la restauration de la nature constitue un enjeu central pour atteindre les objectifs internationaux en matière de biodiversité et de climat. À travers l'exemple du produit d'assurance « Restore » développé par AXA et SCOR, **Aurélien Fallon Saint-Lô** souligne l'importance de l'émergence de solutions assurancielles innovantes comme un levier clé de sécurisation des investissements pour la restauration de la nature.

Au-delà des actions menées par les acteurs économiques, il est central de repenser les cadres de l'action publique pour ériger des barrières sanitaires efficaces. **Benjamin Roche** et **Audrey Arnal** analysent l'articulation entre cadres institutionnels internationaux et stratégies nationales et locales dans la lutte contre les zoonoses, afin de mettre en évidence la conservation de la biodiversité comme un levier de santé publique à part entière. La recherche écologique, la gouvernance multi-acteurs et la participation communautaire, telles que mises en place au Mexique et au Costa Rica, sont autant d'outils nécessaires pour concevoir des réponses cohérentes du global au local et renforcer durablement la résilience sanitaire.

Ensuite, afin de dessiner des plans stratégiques efficaces, il est crucial pour les initiatives publiques et privées de se doter d'une connaissance fine des liens entre érosion de la biodiversité et santé humaine. **David Nogués Bravo** met en évidence le rôle central des indicateurs intégrés sur la biodiversité et la santé pour éclairer les décisions susceptibles d'affecter simultanément les écosystèmes et la santé. Il montre que leur absence empêche d'anticiper à la fois les bénéfices sanitaires et les risques émergents liés à la nature, et souligne que le développement de telles métriques suppose une expertise interdisciplinaire, une meilleure intégration des données et un engagement institutionnel fort en faveur d'une approche systémique.

Face aux limites environnementales et sanitaires des modèles agricoles intensifs, des voies d'innovation offrent aujourd'hui des alternatives crédibles. **Johan Rodriguez-Melo**, **Soledad Traubenik**, et **Federico Ariel** mettent en évidence les nouvelles biotechnologies à base d'ARN qui permettent de réduire l'usage des pesticides tout en préservant l'efficacité agronomique. En s'appuyant sur des mécanismes biologiques ciblés et à faible persistance environnementale, ces solutions illustrent la capacité de l'innovation scientifique à alléger la pression exercée sur la biodiversité, tout en contribuant à la protection de la santé humaine et à la transition vers des systèmes agricoles plus durables.

Enfin, la pérennité des stratégies de préservation de la biodiversité repose sur leur appropriation par le grand public. Pour **Véronique Andrieux**, des récits inadéquats, perçus comme alarmistes ou trop techniques, freinent la mobilisation, malgré la diffusion massive des alertes environnementales, et mettent en évidence le rôle de la santé comme narratif fédérateur, capable de rendre les enjeux écologiques concrets. Pour **Afnan Agramont**, l'appropriation par les citoyens des données environnementales constitue un enjeu majeur, en particulier pour appréhender et mesurer la dégradation des milieux. La production de connaissances à l'échelle locale, notamment par des démarches de science citoyenne en Bolivie et au Kenya, permet de caractériser plus finement ces dynamiques et de documenter les interactions entre biodiversité, santé et conditions de vie.

¹ Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2020) Perspectives mondiales de la diversité biologique 5 – Résumé à l'intention des décideurs. Montréal. gbo-5-spm-fr.pdf, p.4-5. <http://cbd.int/gbo/gbo5/publication/gbo-5-spm-fr.pdf>.



Le concept de *One Health* vu de l'Océan : Protéger le vivant pour nous protéger nous-mêmes

Henri Bourgeois-Costa : Directeur des affaires publiques de la Fondation Tara Océan

Pierre Mienville : Chargé de plaidoyer de la Fondation Tara Océan

En 2023, l'Assemblée générale des Nations Unies a franchi une étape décisive en reconnaissant formellement le concept de *One Health*¹ (Une seule santé). Prenant acte de l'évolution de la compréhension scientifique des écosystèmes, et de ses limites, les agences onusiennes exhortent à traduire cette ambition en actions politiques concrètes², établissant que « *la santé des humains, des animaux domestiques et sauvages, des plantes et de l'environnement en général (y compris des écosystèmes) est étroitement liée et interdépendante* »³.

Compte tenu de l'attention croissante accordée à ce cadre conceptuel et de la multiplication des interprétations simplistes, la Fondation Tara Océan, forte de plus de vingt ans d'expéditions scientifiques, propose d'explorer la réalité de cette notion vue des sciences de l'Océan, un angle révélateur de sa profondeur et de sa complexité.

LA "BONNE SANTÉ" DE L'OcéAN EST UNE CONDITION INDISCUTABLE DU MAINTIEN DE NOTRE ESPÈCE EN BONNE SANTÉ

L'Océan participe aux grands cycles physico-chimiques (eau, carbone, etc.) définissant les équilibres de la biosphère, dont les espèces vivantes marines dépendent. Elles interagissent avec le milieu et entre elles, produisant notamment la biomasse et une part importante de l'oxygène. Les besoins vitaux des humains dépendent en grande partie de cet écosystème marin et de sa relative stabilité⁴. Un Océan en "bonne santé" peut donc être défini (du point de vue humain) comme la stabilité des conditions physico-chimiques permettant le maintien des communautés biologiques auxquelles appartient l'humain. Soit : un équilibre propice aux organismes,

préservant leur diversité spécifique et génétique, la richesse de leurs interactions et les conditions nécessaires à une libre évolution. Les 15 expéditions menées par la Fondation Tara Océan et ses partenaires, laboratoires et instituts de recherche académique, ont permis d'améliorer les connaissances sur la biodiversité océanique et les changements environnementaux. Elles ont notamment mis en avant le rôle fondamental du microbiome marin (ensemble des communautés microbiennes) dans ces processus océaniques : représentant plus des deux tiers de la biomasse totale de l'Océan⁵, les organismes microscopiques réalisent presque autant de photosynthèse que les plantes sur terre et participent largement au cycle du carbone. Ils occupent également le rôle de producteur primaire des réseaux trophiques océaniques⁶; le poisson représentant la source majoritaire de protéines pour environ 1 milliard de personnes⁷.

Les nombreuses dégradations des conditions physico-chimiques (réchauffement climatique, pollutions, acidification, etc.) et du vivant (surpêche, fractionnement des populations, etc.), menacent ces équilibres. L'Océan est ainsi devenu le révélateur des menaces directes mais également terrestres dont certaines s'y concentrent. Or, un Océan "malade" fragilise la santé humaine⁸. Ainsi, des activités, supposées bénéfiques pour l'espèce humaine (certaines pratiques de pêche, d'activité extractive industrielles, etc.), érodent en fait l'habitabilité de la terre⁹ pour notre espèce et ... bien d'autres.

1 Résolution 77/275 du 24 février 2023 de l'Assemblée Générale des Nations Unies portant sur les Portée, modalités, format et organisation de la réunion de haut niveau sur la prévention, la préparation et la riposte face aux pandémies.

2 Appel à l'action de l'Alliance quadripartite en faveur de l'approche « Une Seule Santé » pour un monde plus sûr, Communiqué commun de la quadripartite des organisations des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), pour l'environnement (PNUE), la Santé (OMS) et la santé animale (OMSA) du 27 mars 2023, Rome/Paris/Genève/Nairobi. <https://www.who.int/fr/news/item/27-03-2023-quadrupartite-call-to-action-for-one-health-for-a-safer-world>.

3 Définition à retrouver dans "One Health Definitions and Principles" [Définitions et principes de l'approche Une Seule Santé], publié par l'OHHLEP le 24 juillet 2023. <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/one-health/ohhlep/one-health-definition-and-principles-translations.pdf>.

4 IPCC (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère dans un climat en évolution]. [H.-O. Pörtner, et al. (eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/srocc/>

5 Bar-On, Y. & Milo, R., (2019). The biomass composition of the oceans: a blueprint of our blue planet [La composition de la biomasse des océans : un panorama de notre planète bleue]. *Cell*, 179, 1451–1454. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2019.11.018>.

6 Tara Ocean Foundation., Tara Oceans., European Molecular Biology Laboratory (EMBL), et al. (2022) Priorities for ocean microbiome research [Priorités pour la recherche sur le microbiome océanique]. *Nature Microbiology* 7, 937–947. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01145-5>.

7 United Nations, Department of Economic and Social Affairs - Sustainable Development, Oceans and Seas [Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales – Développement durable, océans et mers]. <https://sdgs.un.org/topics/oceans-and-seas>.

8 Voir notamment : Richardson, K., et al. (2023). Earth beyond seven of nine planetary boundaries. *Science Advances*, [La Terre au-delà de sept des neuf limites planétaires]. 9(37); <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>. Landrigan, P. J., et al. (2020). Human Health and Ocean Pollution. *Annals of Global Health*, 86(1), 151. (The Monaco Commission).

9 Voir notamment : IPBES (2019). Brondizio, E. S., et al. (eds.); Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [Rapport d'évaluation mondiale sur la biodiversité et les services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.383188> et IPBES (2020) sur les liens structurels entre perte de biodiversité et risques sanitaires mondiaux. https://www.ipbes.net/sites/default/files/2020-11/20201028%20IPBES%20Pandemics%20Workshop%20Report%20Plain%20Text%20Final_0.pdf.



Reconnaître l'existence d'une seule santé remet l'humain à sa juste place : non comme centrale, mais au sein d'un tissu vivant dont il dépend. Cette définition induit aussi une asymétrie de la dépendance. La santé humaine dépend de la santé des écosystèmes, cependant l'inverse n'est pas vrai : la santé de l'Océan ne dépend pas de la bonne santé des humains, mais bien de notre capacité à cesser de lui nuire.

Porter atteinte aux écosystèmes revient donc à porter atteinte à l'espèce humaine, en ce que nous dégradons nos propres conditions d'existence. Inversement, prendre soin du vivant dont nous faisons partie contribue à améliorer notre santé. Dès lors, pour résoudre la crise systémique affectant notre santé commune, il est essentiel de se doter des bons outils : ceux de la protection des écosystèmes. Sans cela, nous compromettons nos chances de réussite.

Ces compréhensions nous obligent à adopter une logique dés-anthropocentrée et de responsabilité vis-à-vis du vivant.

AGIR POUR PRÉSERVER LA SANTÉ COMMUNE

Le *One Health Joint Plan of Action* détermine une trajectoire durable compatible avec les équilibres du vivant¹⁰, appelant à ne pas seulement réagir aux crises, mais bien à transformer nos façons de produire, de prévenir et de décider.

Pour la Fondation Tara Océan, une stratégie *One Health* pragmatique devrait ainsi établir des objectifs de réduction d'impact, chiffrés, bornés temporellement et contraignants. Elle pourra s'appuyer sur les principes de prévention (réduire les risques dont le lien de causalité avec la dégradation de la santé est scientifiquement établi) et de précaution

La Fondation Tara Océan défend une vision, scientifiquement robuste, dans laquelle protéger l'Océan, sans laquelle protéger notre santé physique



La goélette scientifique Tara et le nouveau navire de recherche de la fondation Tara Océan dédié à la dérive transpolaire arctique, Tara Polar Station.
© Valentin Lauféron - Fondation Tara Océan.

(réduire les risques pour lesquels la science a des préoccupations sérieuses), disposant d'ancrages juridiques robustes en droit international¹¹ comme national¹².

La mise en œuvre d'une telle trajectoire implique de relever plusieurs défis :

- **S'accorder sur une approche One Health non réductrice**

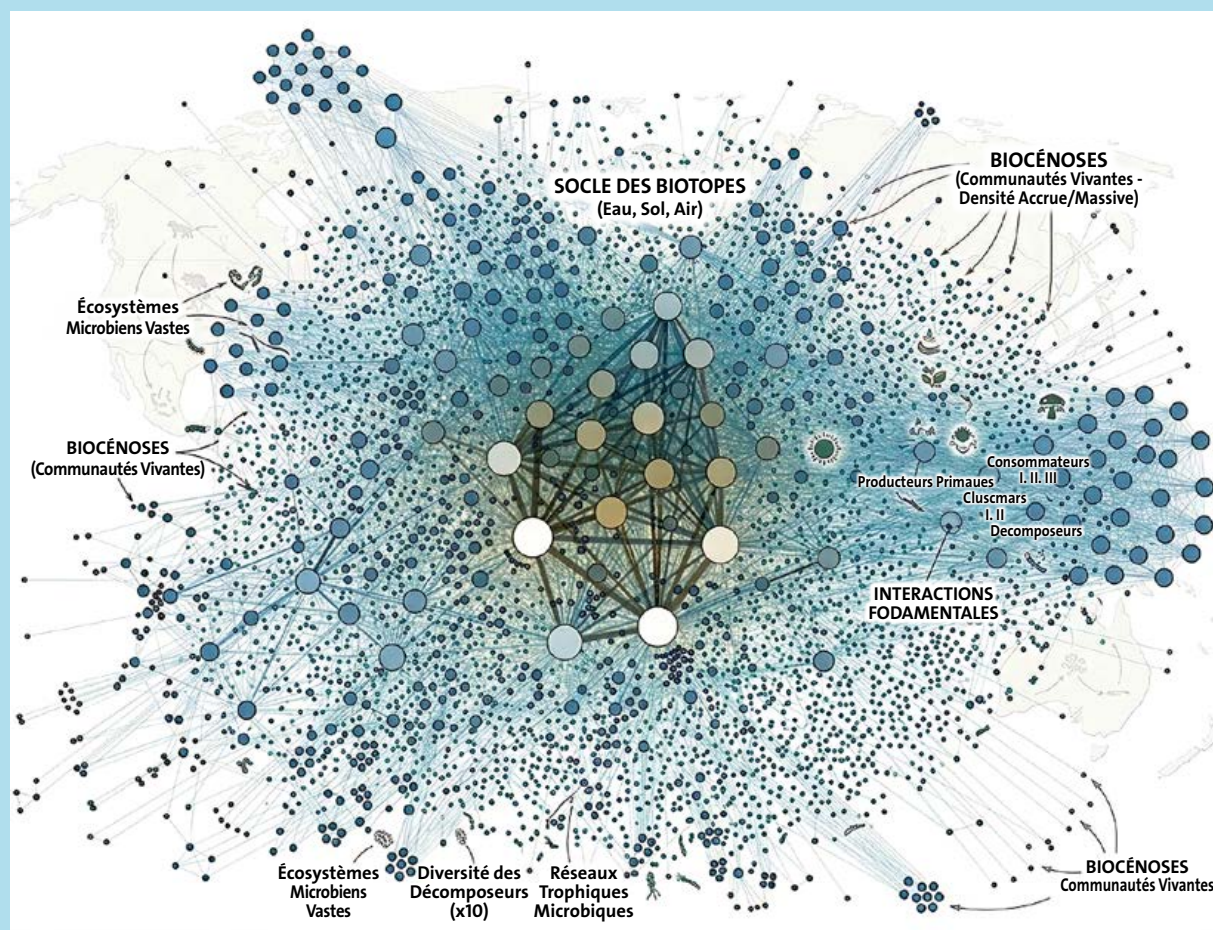
De nombreuses visions ne se fondent pas sur la science, ce qui mène souvent à un excès d'anthropocentrisme opposant santé humaine et reste du vivant, niant ainsi l'essence même d'une santé commune. Se baser sur les savoirs scientifiques permet d'appréhender le concept *One Health* dans son entière complexité. Partager une telle vision permettra la coopération, indispensable pour résoudre des problèmes qu'aucune administration ne peut gérer seule. Cela nécessite du temps, des données partagées, une gouvernance décloisonnée et des objectifs communs.

¹⁰ FAO, UNEP, WHO, and WOA. 2022. *One Health Joint Plan of Action (2022-2026). Working together for the health of humans, animals, plants and the environment [Plan d'action conjoint Une Seule Santé (2022-2026). Travailler ensemble pour la santé des êtres humains, des animaux, des plantes et de l'environnement]*. Rome.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240059139>.

¹¹ Assemblée Générale de l'ONU, *Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement*, 1992, A/CONF.151/26. <https://www.un.org/french/events/rio92/aconf15126vol1f.htm#:~:text=D%C3%A9claration%20de%20Rio&text=Les%20%C3%AAtres%20humains%20sont%20au,en%20harmonie%20avec%20la%20nature.&text=ne%20causent%20pas%20de%20dommages,relevant%20d%27aucune%20juridiction%20nationale>.

¹² En France par exemple, le principe de précaution a valeur constitutionnelle : il figure depuis 2005 dans l'Article 5 de la Charte de l'environnement.

L'immensité des interrelations de la biosphère



Notre santé se situe quelque part au croisement des interrelations des biocénoses et de leurs biotopes.

- **Développer une culture de la précaution**

Les fonctionnements du vivant nous sont encore largement inconnus¹³ (on ne connaît que 15% des espèces qui peupleraient réellement l'Océan¹⁴). Prétendre gouverner un monde que nous ne connaissons que très imparfaitement exige une grande précaution.

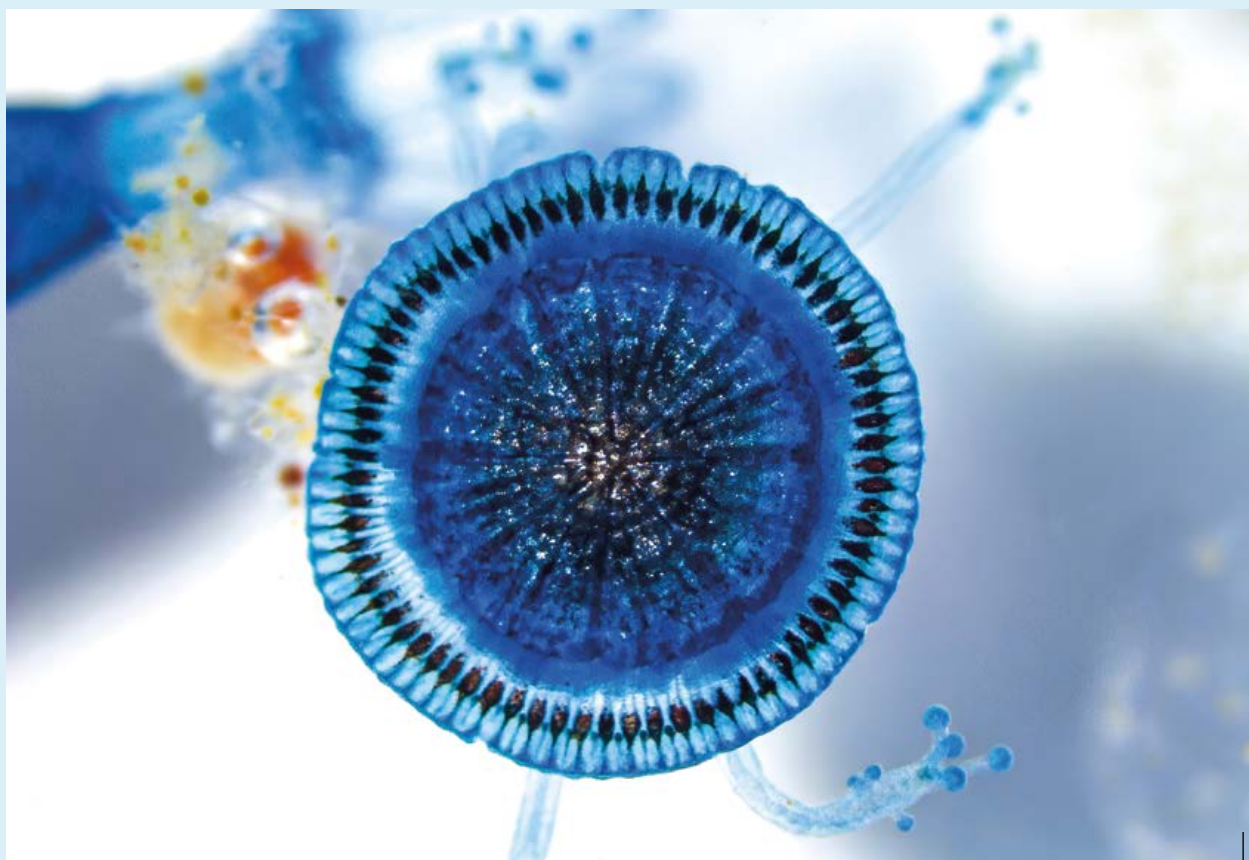
¹³ En 2026, environ 242 000 espèces marines sont recensées dans le Registre mondial des espèces marines (WoRMS). Voir Appeltans, W., et al. (2012). The Magnitude of Global Marine Species Diversity [L'ampleur de la diversité mondiale des espèces marines]. *Current Biology*, 22(23), 2189-2202. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.09.036>.

¹⁴ Moyenne des études de Mora et al. (2011), <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127>, publiée dans PLOS Biology, source de l'estimation haute de 2,2 millions d'espèces marines. Les auteurs ont utilisé une méthode statistique basée sur la taxonomie (la vitesse à laquelle nous découvrons de nouvelles familles et genres pour prédire le nombre d'espèces restantes) et d'Appeltans et al. (2012), <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.09.036>, publiée dans Current Biology, qui propose une fourchette plus conservatrice située entre 0,7 et 1 million d'espèces. Cette étude a mobilisé des dizaines d'experts par groupe taxonomique (poissons, mollusques, etc.) pour estimer ce qu'il reste à découvrir dans chaque catégorie.

- **Mettre en œuvre des transformations politiques concrètes**

Une stratégie pertinente devrait ainsi articuler : prévention, précaution, lutte contre les pollutions plastiques et chimiques, réduction des émissions fossiles, renaturation des habitats, limitation des activités extractives destructrices, obligation de vigilance, principe de pollueur-payeur et prudence accrue face à la géo-ingénierie. L'approche *One Health* ne peut déboucher que sur des choix concrets, parfois exigeants, amenant à réinventer nos modèles socio-économiques.





Plancton animal (Propita propita) observé au large de l'Afrique du Sud à bord de la goélette Tara.
© Maéva Bardy - Fondation Tara Ocean

CONCLUSION : PROTÉGER LE VIVANT POUR NOUS PROTÉGER NOUS-MÊMES

L'environnement ne peut plus être perçu comme un simple facteur de risque externe, mais comme le socle de notre stabilité commune. La Fondation Tara Océan défend une vision, scientifiquement robuste, dans laquelle protéger l'Océan revient à protéger notre santé physique, mentale, sociale et la continuité des grands cycles du vivant. C'est une ligne à la fois scientifique, politique et profondément humaine.

One Health nous invite à changer de regard. La santé n'est pas un territoire cloisonné entre hôpitaux, élevages, champs et Océan : c'est une réalité vivante, commune, fragile et interdépendante. Mieux que prévenir les crises, nous choisissons une manière plus juste d'habiter le monde, avec lucidité, méthode et la conviction que protéger le vivant, c'est nous protéger nous-mêmes.

À propos des auteurs

Henri Bourgeois-Costa, directeur des affaires publiques de la Fondation Tara Océan, expert en économie circulaire et pollution plastique, spécialiste en géographie des écosystèmes. Après un parcours dans les ONG dès 1997, il développe une expertise sur l'eau, la biodiversité et l'environnement industriel (éco-conception, plasturgie, valorisation). Depuis 2019, il œuvre à la Fondation Tara Océan où il développe le plaidoyer sur l'économie circulaire, notamment sur les plastiques et toxiques, et porte ces enjeux internationaux dans le cadre des négociations onusiennes. Le concept *One Health* est au cœur du travail de la Fondation Tara Océan, qui explore l'Océan pour mieux le comprendre et le protéger.

Pierre Mienville, chargé de plaidoyer de la Fondation Tara Océan.

Une illustration concrète du rôle d'une entreprise pour la protection de la biodiversité :

Le cas de Veolia

Sébastien Daziano

Directeur de la Stratégie
et de la Performance Plurielle -
Membre du Comité Exécutif
de Veolia

Jean-Pierre Maugendre

Adjoint au Directeur
du Développement Durable
et de la Performance Plurielle

Tiphaine Déas

Responsable des Engagements
biodiversité au sein du Pôle
Nature de la Direction
du Développement Durable
et de la Performance Plurielle

De par la nature de ses activités, Veolia, leader mondial des services à l'environnement, contribue à la protection de l'environnement et de la biodiversité en luttant contre le changement climatique, la pollution et la surexploitation des ressources. Le Groupe s'engage également à transformer les 2 000 sites industriels qu'il exploite à travers le monde en véritables réservoirs de biodiversité. Cette démarche se concrétise par le déploiement de plans d'action locaux et, si cela est pertinent, par l'adoption de solutions fondées sur la nature. Cet engagement, en résonance avec l'ancrage territorial de Veolia, se veut un outil de dialogue puissant avec les acteurs locaux, permettant un partage des analyses sur les bénéfices environnementaux et sociaux générés par ces actions.

INTRODUCTION

Le rapport "Entreprises et Biodiversité" de l'IPBES¹ paru en février 2026 a souligné que les entreprises étaient des acteurs-clés de la protection de la nature, grâce à leur capacité de déploiement opérationnel de politiques corporate, d'innovation et d'engagement de leur chaîne de valeur. Ceci afin de réduire leurs impacts négatifs, mais aussi d'accélérer le déploiement de leurs solutions à impact positif visant à restaurer et régénérer les milieux, ou à déployer les solutions fondées sur la nature.

Veolia a accueilli ce constat avec enthousiasme, en qualité bien sûr de spécialiste mondial des solutions de protection de l'environnement, mais aussi car, en qualité d'opérateur, il s'efforce de réduire au maximum les impacts que les activités des installations industrielles qu'il gère peuvent générer localement.

La combinaison de ces deux types d'actions crée une valeur environnementale et sociale multiple dans les territoires que nous vous proposons d'examiner plus complètement.

UN ENGAGEMENT POUR LA BIODIVERSITÉ INDISSOCIABLE DE LA NATURE DES MÉTIERS DE VEOLIA, ET INTÉGRÉ DANS SA STRATÉGIE COMME DANS SES MODES OPÉRATOIRES

Visant à dépolluer, décarboner et régénérer, les activités de Veolia contribuent à préserver les milieux naturels. Elles réduisent directement plusieurs des facteurs d'érosion de la biodiversité identifiés par l'IPBES (changement climatique, pollution, surexploitation des ressources) résultant de l'activité de ses clients municipaux et industriels. En effet, la collecte et le traitement des déchets limitent la diffusion de polluants dans les sols et l'atmosphère, tandis que le traitement des eaux usées garantit le rejet d'une eau de qualité protégeant les milieux aquatiques. De plus, le développement de réseaux de chaleur urbains et l'usage de biomasse certifiée diminuent l'empreinte carbone, alors que le recyclage et la réutilisation de l'eau (REUT) préservent les ressources naturelles et soutiennent l'écoulement des cours d'eau.

Les activités industrielles exercées sur les sites opérés par le Groupe, et dont il n'est dans la grande majorité des cas pas propriétaire, peuvent toutefois présenter localement des impacts sur les milieux, directs ou indirects, d'un ordre de grandeur plus faible que celui lié à la réduction des impacts de ses clients, et dont la maîtrise fait partie de la politique environnementale du Groupe. Par exemple, une station

¹ Titre complet du rapport : "Évaluation méthodologique de l'impact de l'activité des entreprises sur la biodiversité et sur les contributions de la nature aux populations et de la dépendance des entreprises à leur égard"
<https://www.ipbes.net/business-impact>. IPBES : Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, "le GIEC de la biodiversité".



d'épuration Veolia traite les eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel, évitant ainsi la pollution des rivières et des nappes phréatiques. Mais son fonctionnement génère aussi des impacts locaux : imperméabilisation des sols, éclairage nocturne, circulation d'engins... C'est pourquoi le site doit mettre en place des actions concrètes comme la gestion différenciée de ses espaces verts ou une limitation de l'éclairage la nuit pour préserver la faune locale.

L'engagement de Veolia pour la protection du vivant s'est structuré à travers plusieurs étapes clés. Dès 2015, le Groupe a formalisé ses premières orientations en s'inscrivant dans la Stratégie Nationale Biodiversité, avant d'ancrer la protection de l'environnement au cœur de ses statuts avec sa Raison d'être en 2019. Cette même année, l'adhésion de Veolia à l'initiative *Act4nature internationale*² a permis de transformer ces principes en objectifs datés et chiffrés alignés sur les cadres internationaux comme le GBF (*Global Biodiversity Framework*).

Concrètement, le Groupe s'engage aujourd'hui à :

- Restaurer et protéger : en déployant des plans d'actions sur-mesure sur 100 % des sites aux potentialités les plus fortes au plan écologique avec un objectif de réalisation de ≥ 85 % d'ici 2027.
- Transformer les pratiques : en généralisant la gestion écologique et l'abandon total des produits phytosanitaires sur 95 % de ses sites.
- Agir sur la chaîne de valeur : en visant 100 % de traçabilité et de certification pour ses approvisionnements en biomasse bois, garantissant un impact « Zéro déforestation ».

Le déploiement des plans d'action visant à atténuer les impacts sur les sites sensibles pour la biodiversité fait l'objet d'un indicateur dédié au sein de la démarche de performance plurielle du Groupe. Pour garantir le plus haut niveau d'engagement, cet objectif est soutenu par un sponsor, membre du comité exécutif et Directeur de la Stratégie, de l'Innovation et du Développement.

Les 154 sites identifiés au travers du monde couvrent une surface totale de plus de 20 000 hectares. Ils ont été sélectionnés selon une double approche : leur sensibilité et potentialité écologique (proximité d'aires protégées, présence d'espèces menacées) et les pressions potentielles liées à l'exploitation (rejets, prélèvements, imperméabilisation).

Sur ces sites dits "sensibles", une mesure de l'empreinte biodiversité permet d'évaluer les impacts négatifs et positifs, qu'ils soient directs ou indirects, exercés par les activités du site à une échelle locale.

Depuis janvier 2025, 124 000 arbres ont été plantés. Au-delà de la simple plantation d'arbres, ce projet poursuit d'autres objectifs écologiques : améliorer la qualité des eaux, favoriser le retour de la biodiversité et séquestrer durablement le carbone atmosphérique

Cet outil d'analyse d'empreinte, co-conçu en 2019 par Veolia, des écologues et des experts en analyse du cycle de vie, permet d'évaluer qualitativement et quantitativement les enjeux du site à l'échelle locale. L'analyse croise les données liées au process industriel (rejets, prélèvements, consommations) et au contexte écologique (caractérisation des milieux, proximité d'aires protégées, présence d'espèces rares ou menacées).

L'intervention d'un écologue expert de la biodiversité locale est obligatoire pour accompagner les entités opérationnelles dans la mesure des empreintes sur site.

L'écologue accompagne également le site dans la définition de son plan d'actions, défini en fonction des enjeux majeurs révélés par l'empreinte biodiversité. Il s'appuie sur une liste d'actions prédéfinies dont les objectifs sont la réduction des impacts identifiés et la préservation ou la restauration de la nature. Ces actions (15 actions génériques et des actions spécifiques) ciblent ainsi la réduction de l'impact sur l'artificialisation et la fragmentation des habitats, la préservation des espèces rares ou menacées, la gestion écologique des espaces verts, la protection de la ressource en eau, la lutte contre les espèces exotiques envahissantes, la réduction de la pollution lumineuse, la lutte contre les pollutions, la lutte contre le changement climatique et la sensibilisation des parties prenantes.

Sur tous les autres sites gérés par le Groupe sont appliqués des standards élevés de préservation de la biodiversité :

- Le déploiement d'une gestion écologique, formalisée par une charte « Espaces Verts ». Cette approche substitue l'entretien traditionnel par des pratiques respectueuses de la biodiversité. Elle inclut des mesures obligatoires telles que la pratique de la fauche tardive, l'aménagement de refuges pour la faune (nichoirs, tas de bois, pierres sèches) et une gestion différenciée des espaces selon leur usage.
- L'abandon des produits phytosanitaires. Ainsi, le Groupe s'engage à supprimer l'usage des pesticides (herbicides, fongicides, insecticides et biocides) pour l'entretien de ses espaces. Ce standard impose une transition vers des méthodes alternatives (mécaniques, thermiques) et une évolution des normes esthétiques pour intégrer davantage la nature au sein des sites industriels.

² Act4nature international, initiative lancée en 2018 par EpE (Entreprises pour l'Environnement), rassemble plus de 70 grandes entreprises françaises ou basées en France. Les engagements des entreprises sont revus et validés par un comité de pilotage multi-acteurs incluant des associations de protection de la nature, des associations professionnelles (Medef, Afep), des partenaires académiques et des organismes publics (Office Français de la Biodiversité).
<https://www.act4nature.com/en/>



Le déploiement de l'ensemble de ces actions est assuré par un réseau de plus de 50 correspondants biodiversité présents dans toutes les Business Units du Groupe, et il en est rendu compte dans le reporting annuel effectué par le Groupe dans son Document d'Enregistrement Universel sur l'avancement de ses engagements *Act4nature International*.

Enfin, le programme d'innovation du Groupe a inscrit au titre de ses priorités le développement de solutions fondées sur la nature associées à la gestion du grand cycle de l'eau, comme les zones humides artificielles, ou bien celui de solutions de *biomonitoring*, permettant de qualifier l'état des écosystèmes par la mesure de la présence de certaines espèces qui en sont représentatives. Ces solutions sont intégrées le plus largement possible dans les plans de protection de la biodiversité, et bien sûr aussi dans les offres du Groupe à ses clients potentiels.

DES ACTIONS DÉPLOYÉES SUR TOUTES LES ACTIVITÉS DU GROUPE, ET SUR TOUTES LES GÉOGRAPHIES OÙ IL EST PRÉSENT

En Amérique Latine, Veolia a intégré la protection de la biodiversité dans la transformation de l'ensemble des centres d'enfouissement technique des déchets qu'elle gère en Colombie, tel le site d'Antanas (**voir encadré**) en "parcs technologiques environnementaux", avec pour objectif d'être des centres de décarbonation, de décontamination et de régénération des ressources. Des plans d'action pour la préservation de la flore et de la faune ont été développés, incluant la sensibilisation à la protection de la biodiversité des salariés et des sous-traitants, l'interdiction totale de l'utilisation de produits phytosanitaires, le contrôle des espèces envahissantes, l'utilisation d'engrais biologiques et de compost, et la création d'habitats pour la faune, réalisant ainsi une harmonie entre les opérations et l'écosystème. Ces actions ont permis la restauration de près de 2 300 hectares, et la protection de 663 espèces animales et 552 espèces végétales. Au Brésil, la gestion écologique du site d'enfouissement d'Ipéro, près de Sao Paulo, qui gère les déchets de plus d'un million d'habitants, participe à la restauration de zones dégradées dans la Mata Atlântica, l'un des biomes les plus riches et les plus menacés dans le monde. A ainsi été créé lors de l'aménagement du site un corridor écologique communiquant avec l'espace protégé constitué par la forêt voisine.

En France, de nombreuses actions ont été mises en place sur les usines du Syndicat des Eaux d'Ile-de-France (SEDIF), situés en bord de rivières avec de forts enjeux environnementaux, dans le cadre du renouvellement du contrat confié à Veolia, comme en témoigne le document édité par le Syndicat sur l'usine de production d'eau potable de Choisy-le-Roi, en bord de Seine.

En Colombie, le parc technologique environnemental d'Antanas



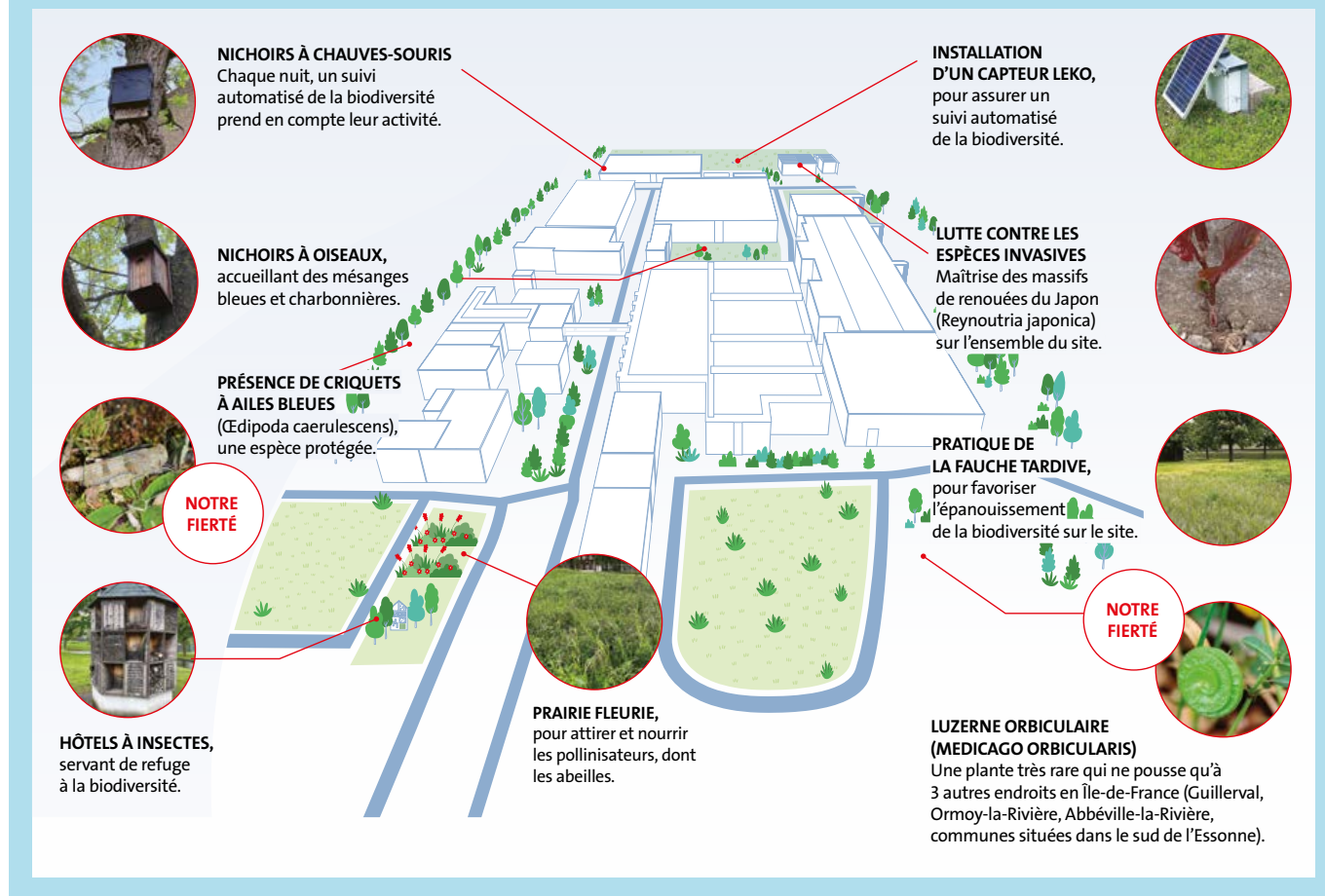
Situé dans la ville de Pasto, ce parc de 100 hectares sur un site d'enfouissement de déchets maintient depuis 2021 trois zones de conservation totalisant 73 hectares. La création d'une pépinière permet la disponibilité d'espèces endémiques pour la revégétalisation et la reforestation (*Quercus humboldtii*, *Clusia* sp, *Panopsis* sp ...) tandis que des jardins favorisent des pratiques durables utilisant des plantes locales. Trois itinéraires d'observation de la faune permettent un suivi scientifique participatif, et des corridors biologiques relient les forêts présentes sur le site pour améliorer la connectivité écologique. Des capteurs spécialisés ont été installés pour l'identification des espèces, permettant l'alimentation de modèles utilisant des techniques avancées incluant, outre les comptages directs, des enregistrements acoustiques automatisés et des algorithmes d'apprentissage automatique. Les responsables du site sensibilisent les employés et les communautés locales par le biais de visites, de conférences et d'une participation active aux initiatives de conservation de la biodiversité.

Le lancement de plans de protection de la biodiversité est par nature une action à caractère local, en relation forte avec le territoire

Pour les sites industriels, la réhabilitation d'une ancienne zone humide de 8 ha, comprenant 23 "terrasses" à proximité du complexe pétrochimique de Sinopec en Chine, a permis de restaurer la biodiversité. Cette initiative, menée par Veolia qui gère le cycle de l'eau du site, visait à optimiser la qualité des eaux traitées (60 % des eaux usées sont désormais réutilisées) avant leur réintroduction dans le milieu naturel. Chaque terrasse possède une végétation spécifique choisie pour ses qualités épuratoires. La zone humide ainsi réhabilitée sert de zone tampon intermédiaire avant le rejet final dans le réservoir de Niukouyu. La restauration de la zone humide a impliqué 2,7 ha plantés pour la phytoremédiation, contribuant à améliorer la qualité de l'eau. La création de différents habitats et paysages a enrichi la faune et la flore, avec l'identification de plus de 140 espèces d'oiseaux différentes (dont certaines figurant sur la liste des espèces en voie d'extinction de l'UICN, comme le vanneau huppé ou le paradoxornis du Yangtsé) et la réapparition de 9 espèces de poissons indigènes de Pékin dans la zone.



L'usine de Choisy-le-Roi est propriété du Syndicat des Eaux d'Île-de-France



À Gum Springs, dans l'Arkansas, un programme de plantation de 275 hectares a été lancé à proximité d'un site de traitement des déchets. Depuis janvier 2025, 124 000 arbres ont été plantés. Au-delà de la simple plantation d'arbres, ce projet poursuit d'autres objectifs écologiques : améliorer la qualité des eaux, favoriser le retour de la biodiversité et séquestrer durablement le carbone atmosphérique. La démarche se distingue également par son ancrage local et scientifique : des forestiers apportent leur expertise de terrain, tandis que des équipes universitaires surveillent activement le retour de la faune sauvage, de jour comme de nuit.

LA NATURE LOCALE DES ACTIONS DE PROTECTION DE LA BIODIVERSITÉ : DES PRÉREQUIS NÉCESSAIRES, MAIS AUSSI DE GRANDES OPPORTUNITÉS

Le lancement de plans de protection de la biodiversité est par nature une action à caractère local, en relation forte avec le territoire. Dans le cadre d'un contrat de gestion déléguée, il nécessite de plus, comme toute action relative à la vie du contrat, une convergence de vues entre le propriétaire de

l'installation (collectivité locale ou industriel) et son opérateur sur les objectifs à atteindre et les moyens à mettre en œuvre, en ayant conscience que la reconquête des bons états écologiques s'inscrit sur le temps long, et qu'il ne sera souvent pas possible de faire état de progrès tangibles avant plusieurs années.

Tout particulièrement, le plan d'action peut parfois s'illustrer par la "sanctuarisation" d'une partie du foncier disponible pour en faire une réserve écologique au détriment d'autres activités, par des investissements non prévus initialement au contrat (remplacement de l'éclairage conventionnel par des LED, afin de limiter la pollution lumineuse – action qui bénéficie par ailleurs d'un taux de retour sur investissement très significatif –, mise en place de solutions fondées sur la nature comme les zones humides artificielles, ...), ou bien par des changements de pratiques d'exploitation (suppression de l'emploi des biocides, alors que leur usage est parfois imposé dans certains cahiers des charges à l'international).

Ce caractère local a également pour conséquence le fait que le “copier-coller” des plans d'action est difficilement applicable. En effet, même pour des activités industrielles semblables, les enjeux écologiques peuvent être très différents d'un site à l'autre. Un centre d'enfouissement au Brésil aura pour objectif de sanctuariser la *Mata Atlantica*, son homologue en France se concentrera plutôt sur la reconstitution de milieux naturels dégradés (mares, bosquets arbustifs, abris à reptiles...)

Enfin, comme pour toute action locale, le rôle des opérateurs de terrain, sous la responsabilité des directeurs de sites, est essentiel : ce sont eux qui mettront en œuvre les actions identifiées en les intégrant dans leurs pratiques d'exploitation, qui sensibiliseront les sous-traitants à l'usage de celles-ci, et plus largement qui assureront le lien avec les parties prenantes locales intéressées par la protection de la nature.

En corollaire, l'ouverture d'un site aux visiteurs locaux, en montrant les aménagements réalisés sur celui-ci pour la préservation de la biodiversité, est aussi un formidable moyen d'illustrer localement la contribution de nos activités – décarbonation, dépollution, protection des ressources – à la préservation de l'environnement, et bien sûr de contribuer à leur acceptabilité locale.

CHANGER D'ÉCHELLE GRÂCE À UNE APPROCHE PARTAGÉE DE L'ENSEMBLE DES BÉNÉFICES LIÉS AUX SOLUTIONS DE PRÉSERVATION DU VIVANT

Nous sommes persuadés que la généralisation des plans de protection de la biodiversité mis en place sur les sites industriels, tout comme des solutions fondées sur la nature telles que la création ou la réhabilitation de zones humides, seraient largement facilitées par la prise en compte de l'ensemble des bénéfices environnementaux et sociaux que ces actions génèrent. À Alicante, le parc urbain de la Marjal a été créé en pleine ville pour servir de zone de rétention des crues en cas d'épisode pluvieux majeur. Il est maintenant

unanimentement apprécié comme lieu de promenade, et a contribué à l'attractivité du quartier avoisinant jusqu'ici peu apprécié car sujet aux inondations. Au Nord de Paris, le centre d'enfouissement technique du Plessis-Gassot apparaît paradoxalement comme une zone verte de plusieurs dizaines d'hectares dans un environnement marqué par l'agriculture intensive. C'est aussi le cas de la zone de rejet végétalisée de Sinopec en Chine, qui contribue à la qualité de vie dans un environnement fortement industrialisé.

Ainsi, un projet initialement conçu pour une fonction unique génère sur les territoires une valeur multiple qu'il serait utile d'objectiver – tout au moins au plan qualitatif – afin que les décideurs puissent l'appréhender. L'étude des référentiels de co-bénéfices associés aux nombreux projets de certificats “biodiversité”, que nous avons entamée chez Veolia, pourra sans doute contribuer à cet objectif⁴.

À propos des auteurs

Sébastien Daziano est directeur de la Performance plurielle et de la stratégie et membre du Comité exécutif du Groupe Veolia. Il est le sponsor de l'objectif “Dépollution et préservation de la biodiversité” du dispositif de Performance plurielle du Groupe, qui opérationnalise la mise en œuvre de sa Raison d'être³.

Jean-Pierre Maugendre a été de janvier 2022 à janvier 2026 directeur du Pôle Nature de la Direction Performance plurielle et Développement durable du Groupe Veolia ; il est maintenant adjoint au directeur de cette Direction.

Tiphaine Déas est responsable des engagements biodiversité de Veolia au sein de la Direction Performance plurielle et Développement durable du Groupe.

3 Plus d'informations sur <https://www.veolia.com/fr/groupe/rse-performance-plurielle>.

4 Pour en savoir plus : Rapport Biodiversité Veolia (2024) <https://www.veolia.com/sites/g/files/dvc4206/files/document/2025/08/veolia-rapport-biodiversite-190825.pdf>.





Politiques publiques et institutions :

Protéger la biodiversité pour prévenir les zoonoses, du global au local

Audrey Arnal

Chargée de recherche à l'IRD
et à UMR UM/CNRS/IRD MIVEGEC,
Montpellier, France

Benjamin Roche

Directeur de recherche à l'IRD

Prévenir les zoonoses implique de repenser les politiques publiques à l'interface entre biodiversité, santé humaine et dynamiques socio-écologiques. Alors que la dégradation des écosystèmes augmente les contacts à risque entre faune sauvage, animaux domestiques et humains, de nombreuses initiatives internationales et territoriales montrent que la conservation de la biodiversité peut constituer un véritable outil de santé publique. Cet article analyse comment des cadres institutionnels – de l'IPBES (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) à l'OHHLEP (*One Health High-Level Expert Panel*), en passant par le Cadre mondial de la biodiversité et les programmes PREZODE (*PREventing ZOonotic Disease Emergence*) ou ZODIAC (*ZOonotic Disease Integrated Action*) – interagissent et se nourrissent de façon réciproque avec les stratégies nationales et locales de prévention. À travers des exemples en Amérique latine et aux Caraïbes, il illustre comment la recherche écologique, la gouvernance multi-acteurs et la participation communautaire permettent de concevoir des interventions cohérentes du global au local. Il plaide pour une gouvernance intégrée, où la protection du vivant devient un levier central de résilience sanitaire.

INTRODUCTION

Les crises sanitaires récentes ont mis en lumière le rôle central de la dégradation environnementale dans l'émergence des maladies infectieuses¹. La perte de biodiversité modifie les équilibres écologiques et accroît les probabilités de transmission entre faune sauvage, animaux domestiques et humains. Si ces liens sont désormais bien établis scientifiquement, leur intégration dans les politiques publiques reste inégale. Face à cette situation, les institutions internationales et les gouvernements développent progressivement de nouveaux cadres d'action articulant biodiversité et santé. Cet article propose d'examiner comment ces cadres – du global au local – orientent la prévention, en s'appuyant sur des exemples concrets de dispositifs institutionnels et de programmes territoriaux.

DÉVELOPPER LA GOUVERNANCE MONDIALE ONE HEALTH ET SON IMPACT SUR LES POLITIQUES PUBLIQUES

L'émergence (académique) de l'approche *One Health* (Une seule santé), combinant santé humaine, animale et environnementale, remonte au début des années 2000². Si cette approche a été particulièrement importante pour renforcer notre compréhension des mécanismes d'émergence³, il faudra attendre la pandémie de SARS-CoV-2 en 2019 pour que la nécessité d'embrasser cette approche se manifeste pour développer des stratégies de prévention dite primaires (c'est à dire, se focalisant sur les causes de ces émergences chez l'animal plutôt que d'essayer d'empêcher la transmission interhumaine⁴).

Dans ce contexte, l'IPBES (plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques) a joué un rôle déterminant dans la reconnaissance internationale du lien entre dégradation

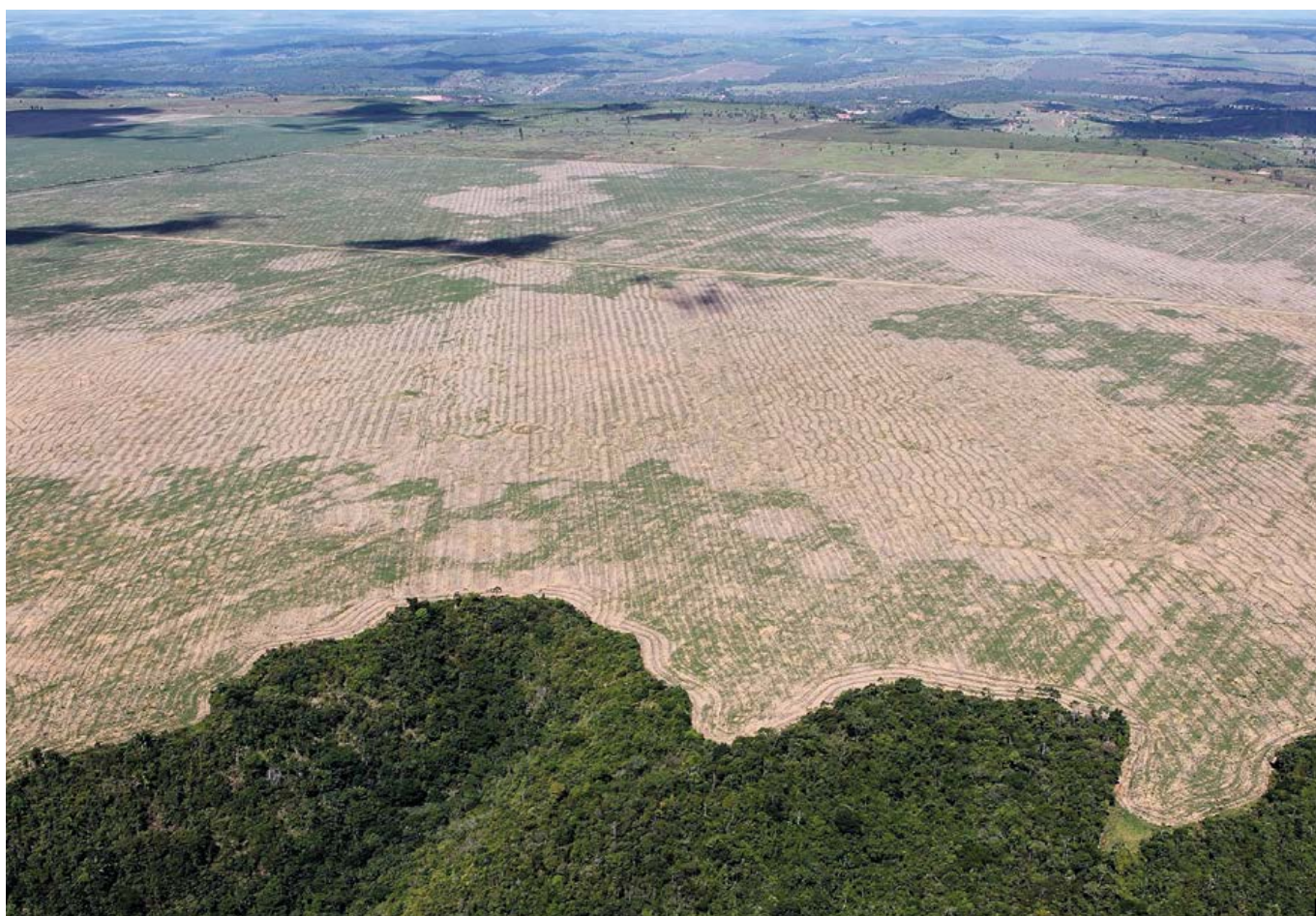
1 Jones, K. E., Patel, N. G., Levy, M. A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J. L., & Daszak, P. (2008). Global trends in emerging infectious diseases [Tendances mondiales des maladies infectieuses émergentes]. *Nature*, 451(7181), 990–994. <https://doi.org/10.1038/nature06536>.

2 Daszak, P., Cunningham, A. A., & Hyatt, A. D. (2000). Emerging infectious diseases of wildlife—threats to biodiversity and human health [Maladies infectieuses émergentes de la faune sauvage — menaces pour la biodiversité et la santé humaine]. *Science*, 287(5452), 443–449. <https://doi.org/10.1126/science.287.5452.443>.

3 Plowright, R. K., Parrish, C. R., McCallum, H., Hudson, P. J., Ko, A. I., Graham, A. L., & Lloyd-Smith, J. O. (2017). Pathways to zoonotic spillover [Voies de transmission zoonotique]. *Nature Reviews Microbiology* 2017 15:8, 15(8), 502–510. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.45>.

4 Bernstein, A. S., Ando, A. W., Loch-Temzelides, T., Vale, M. M., Li, B. V., Li, H., et al., Pimm, S. L., & Dobson, A. P. (2022). The costs and benefits of primary prevention of zoonotic pandemics [Les coûts et les bénéfices de la prévention primaire des pandémies zoonotiques]. *Science Advances*, 8(5). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl4183>.





Paysage naturel fortement anthropisé, marqué par la fragmentation des habitats naturels et la conversion des écosystèmes, dans ce cas, dans l'exploitation et le commerce illégaux de bois au sein de la réserve biologique de Gurupi et des terres indigènes Caru et Alto Turiaçu, dans l'État du Maranhão (2016).
© Felipe Werneck/Ibama

environnementale et émergence de maladies. Son rapport de 2020 sur les risques pandémiques a constitué une base scientifique majeure pour repositionner la prévention au cœur des politiques publiques⁵. Il montre notamment que les zoonoses représentent environ 70 % des maladies infectieuses émergentes et identifie plusieurs facteurs anthropiques clés de leur émergence, parmi lesquels les changements d'usage des terres (déforestation, fragmentation des habitats, expansion agricole et urbanisation), qui sont associés à plus de 30 % des émergences rapportées depuis les années 1960. Ces résultats soulignent le rôle central des pressions anthropiques sur les écosystèmes dans la dynamique contemporaine des risques zoonotiques. Le rapport propose également des mesures de prévention primaire, allant de la réduction des pressions environnementales à la régulation des interfaces à risque, afin d'intégrer explicitement les enjeux sanitaires dans la

La démonstration des liens entre biodiversité et émergence d'épidémies a permis l'intégration d'objectifs de santé publique au sein des stratégies nationales et internationales de protection de la biodiversité, et ainsi d'aligner la gestion des écosystèmes avec la prévention des risques d'émergence

gestion des écosystèmes et l'aménagement du territoire. Dans la continuité, la création de l'OHHLEP (*One Health High-Level Expert Panel*) par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), la FAO (*Food and Agriculture Organization*), l'OMSA (Organisation Mondiale de la Santé Animale (anciennement Office international des épizooties - OIE) et le PNUE (le Programme des Nations Unies pour l'Environnement) en 2021 a marqué une étape clé vers une gouvernance mondiale intégrée de l'approche *One Health*. Ce panel fournit aux gouvernements des recommandations harmonisées sur la prévention des risques zoonotiques, l'aménagement durable du territoire et la coordination intersectorielle.

La démonstration des liens entre biodiversité et émergence d'épidémies a permis l'intégration d'objectifs de santé publique au sein des stratégies nationales et internationales de protection de la biodiversité, et ainsi d'aligner la gestion des écosystèmes avec la prévention des risques d'émergence. Cette approche reconnaît que la conservation des habitats, la réduction de la fragmentation des paysages, et la régulation

⁵ IPBES. (2020). *Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. 108. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4147318>.

durable des interactions entre espèces influencent directement la dynamique des agents pathogènes. En intégrant explicitement la santé humaine dans les cadres de la biodiversité – comme dans le Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal – les gouvernements peuvent orienter leurs actions vers des mesures à co-bénéfices : restaurations écologiques réduisant les contacts à risque, surveillance éco-épidémiologique dans les zones sensibles, ou encore régulation du commerce d'espèces sauvages. Cette inclusion transforme les politiques environnementales en véritables outils de prévention sanitaire, permettant aux autorités de mieux anticiper les menaces et de protéger les populations.

Si cette reconnaissance a favorisé une prise de conscience globale, l'appropriation par les gouvernements reste contrastée. Certains pays ont intégré ces liens de manière proactive : le Costa Rica a renforcé la protection de ses écosystèmes et développé une surveillance éco-épidémiologique articulée à son réseau d'aires protégées⁶ ; et la Colombie expérimente, à l'échelle de paysages pilotes, des corridors écologiques⁷ tels que les *Corredor de Protección del Jaguar* en Guaviare (zone de gestion d'environ 496 000 ha). À l'inverse, dans de nombreuses régions, les politiques de conservation demeurent déconnectées des enjeux sanitaires ou insuffisamment financées, limitant leur impact. Ces mises en œuvre inégales soulignent la nécessité d'un renforcement des capacités, d'un meilleur soutien international et d'une coordination intersectorielle plus robuste pour traduire ces avancées conceptuelles en actions efficaces de prévention. Certaines initiatives internationales, comme PREZODE et ZODIAC, illustrent comment la protection de la biodiversité devient elle-même un instrument de santé publique. Ces programmes soutiennent la mise en place d'observatoires de terrain, de systèmes de surveillance intégrée et d'approches participatives visant à réduire la pression anthropique sur les écosystèmes, à stabiliser les communautés animales et à limiter les conditions favorables aux sauts d'espèces de pathogènes. Ils apportent également un soutien scientifique, technique, financier et institutionnel : PREZODE, lancée par la France et portée par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), le Cirad (le Centre de coopération Internationale en Recherche

La conservation n'est pas seulement une obligation écologique, mais un investissement stratégique pour la résilience sanitaire, économique et sociale des territoires

Agronomique pour le Développement) et l'INRAE (l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement), mobilise aujourd'hui plus de 220 institutions partenaires dans plus de 50 pays ainsi qu'une trentaine de gouvernements, finance des projets pilotes (50M euros), contribuant au déploiement de dispositifs de surveillance, au renforcement des capacités locales et à la structuration de réseaux de recherche et de prévention. ZODIAC, coordonné par l'AIEA (l'Agence Internationale de l'Energie Atomique), fournit des outils de diagnostic, des formations aux laboratoires nationaux et un appui opérationnel pour la surveillance à plus de 150 pays (avec un budget initial de 80M euros). Ces initiatives mobilisent États, agences sanitaires, chercheurs et acteurs de terrain pour renforcer la prévention à la source. En promouvant la restauration des habitats, une gestion durable des ressources naturelles, et des pratiques agricoles compatibles avec la santé des écosystèmes, ces initiatives aident les gouvernements à développer des politiques publiques qui

préviennent les risques à la source plutôt que d'y répondre après coup. Pour le moment, l'impact sur le long terme de ces initiatives est compliqué à caractériser car elles en sont encore au stade de renforcement des capacités et d'infrastructures. Leur volet scientifique commence néanmoins à démontrer que la conservation n'est pas seulement une obligation écologique, mais un investissement stratégique pour la résilience sanitaire, économique et sociale des territoires.

COMPRENDRE LES DYNAMIQUES LOCALES POUR CO-CONSTRUIRE DES STRATÉGIES DE PRÉVENTION – UN EXEMPLE EN AMÉRIQUE LATINE ET AUX CARAÏBES

Si les grandes initiatives internationales telles que PREZODE⁸ ou ZODIAC visent à articuler les politiques de biodiversité et de santé à l'échelle globale, leur succès repose sur la compréhension fine des dynamiques écologiques et sociales locales. En effet, la relation entre biodiversité et circulation des pathogènes varie considérablement selon les contextes environnementaux, les espèces animales impliquées et les interactions entre humains et faune sauvage.

Dans cette perspective, plusieurs travaux s'attachent à caractériser les liens entre biodiversité, circulation virale et exposition humaine au sein d'écosystèmes tropicaux en Amérique latine, notamment à travers les projets PREACTS-ASAMCO (2024-2028, 3 millions d'euros entre Mexique, Costa Rica et Haïti, 15 chercheurs et étudiants impliqués) et TRANSVI (2026-2028, 200k euros, 10 chercheurs et ingénieurs impliqués). Ces projets sont menés conjointement

6 Aguilar-Vargas F., Solorzano-Scott T., Baldi M., Barquero-Calvo E., et al. Passive epidemiological surveillance in wildlife in Costa Rica identifies pathogens of zoonotic and conservation importance [La surveillance épidémiologique intensive de la faune sauvage au Costa Rica permet d'identifier des agents pathogènes d'importance zoonotique et pour la conservation]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262063> ; Brumberg H., Furey S., Bouffard MG., Mata Quirós MJ., Ibid. Increasing Forest Cover and Connectivity Both Inside and Outside of Protected Areas in Southwestern Costa Rica [Augmenter la couverture forestière et la connectivité à la fois à l'intérieur et à l'extérieur des aires protégées dans le sud-ouest du Costa Rica]. *Remote Sensing*. 2024; 16(6):1088. <https://doi.org/10.3390/rs16061088>.

7 Sara Pineda-Zapata, Sergio González-Ávila, Dolores Armenteras, Tania Marisol González-Delgado, Alejandra Morán-Ordoñez, Mapping the way: identifying priority potential corridors for protected areas connectivity in Colombia [Cartographier la voie : identification des corridors potentiels prioritaires pour la connectivité des aires protégées en Colombie]. *Perspectives in Ecology and Conservation*, Volume 22, Issue 2, 2024, Pages 156-166, ISSN 2530-0644, <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.02.003>.

8 Peyre, Marisa et al. PREZODE: preventing zoonotic disease emergence [PREZODE : prévenir l'émergence de maladies zoonotiques]. *The Lancet*. Volume 397, Issue 10276, 792–793. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)00265-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)00265-8).





Prélèvement et manipulation d'un oiseau (*Melanerpes pygmaeus*) lors d'un travail de terrain au cœur d'une communauté locale.
© Aarón Rodríguez Blanco

par des institutions de recherche locales au Mexique, au Costa Rica et en Haïti, ainsi que par des équipes internationales, notamment françaises, en étroite collaboration avec les autorités sanitaires et environnementales de chaque pays. Ces recherches s'inscrivent dans le cadre de l'opérationnalisation de l'initiative PREZODE et visent à documenter les conditions écologiques, comportementales et sociales favorisant ou limitant la transmission de virus zoonotiques – en particulier les arbovirus (virus portés par les rongeurs et transmissibles à l'humain par inhalation d'aérosols contaminés ou par contact avec leurs excréments), hantavirus (virus transmis par des arthropodes hématophages, principalement les moustiques et les tiques) et coronavirus – afin de renforcer les capacités locales de prévention et de surveillance.

L'un des axes centraux du projet PREACTS-ASAMCO consiste à analyser, dans des zones à forte diversité biologique de chacun des pays partenaires, comment les changements d'usage des terres – tels que la déforestation, l'expansion agricole et l'élevage intensif, ou encore l'urbanisation – impactent la composition des communautés animales et influencent, en conséquence, la circulation et la transmission des pathogènes. L'approche combine des données écologiques, virologiques et sociales, afin d'évaluer dans quelle mesure la protection

de la biodiversité peut agir comme un levier de prévention des émergences zoonotiques. Ces données permettront de préciser dans quels contextes l'effet de dilution⁹ se manifeste, et dans lesquels au contraire la fragmentation des habitats ou la perte d'espèces clés amplifie le risque de transmission. Les premiers résultats issus de ces travaux montrent par exemple que, dans certaines zones agricoles du Yucatán, la simplification des paysages, liée à l'homogénéisation des usages des terres associée par exemple à l'intensification agricole, favorise la dominance d'espèces de rongeurs hautement compétentes pour certains virus (tel que les arbovirus ou les hantavirus), augmentant ainsi la circulation au sein des populations animales (environ 15 %), ce qui peut impacter le risque d'exposition humaine. Ces observations permettent d'identifier les configurations paysagères les plus à risque et d'orienter des recommandations de gestion du territoire.

⁹ L'effet de dilution désigne l'hypothèse selon laquelle une forte biodiversité peut réduire le risque de transmission de certains agents pathogènes. Lorsque plusieurs espèces hôtes coexistent, dont certaines sont peu compétentes pour transmettre le pathogène, elles « diluent » la transmission en interrompant les chaînes de transmission ou en détournant les contacts avec les vecteurs dans le cas des maladies vectorielles. À l'inverse, la perte de biodiversité tend à favoriser les espèces les plus compétentes, ce qui peut accroître le risque infectieux pour l'humain.



Chauve-souris (Artibeus jamaicensis) capturée dans le Yucatan (Mexique) et manipulée avec des gants de protection lors d'une session de terrain, dans le cadre d'un protocole de surveillance épidémiologique visant la détection et le suivi des virus chez la faune sauvage.

© Audrey Arnal

Le projet TRANSVI, financé par l'ANRS-MIE (l'agence de l'Inserm sur les Maladies Infectieuses Emergentes), adopte une approche plus mécanistique, centrée sur la caractérisation des chaînes de transmission entre la faune sauvage et les populations humaines dans la péninsule du Yucatán (Mexique). En étudiant la diversité génétique des virus circulant chez les chauves-souris et les rongeurs, ainsi que les modes d'exposition humaine liés aux pratiques agricoles, domestiques et professionnelles, il vise à mieux comprendre les interfaces d'émergence et les conditions écologiques favorisant la transmission croisée. En combinant les observations de terrain, les analyses génétiques et les approches comportementales, ce projet permet de mieux comprendre les mécanismes écologiques et évolutifs qui régissent la transmission des virus entre espèces. Ces connaissances sont essentielles pour concevoir des stratégies de gestion des écosystèmes capables de réduire durablement le risque de transmission à l'humain.

Ces consortiums incarnent une nouvelle manière de penser la gouvernance de la santé environnementale : coopérative, décentralisée et inclusive

Au-delà de la recherche fondamentale, il est essentiel de co-construire des stratégies de prévention durables et adaptées aux réalités locales, en s'appuyant sur des démarches participatives intégrant les savoirs et les besoins des communautés concernées. Dans les sites d'étude, ces communautés regroupent surtout des populations rurales, des petits producteurs, des éleveurs et, dans certains cas, des groupes autochtones vivant près des habitats naturels. Ces populations ont principalement besoin d'avoir accès à une information fiable sur les risques, le renforcement des capacités locales de surveillance et l'adoption de pratiques agricoles ou d'élevage limitant les interfaces à risque. Le projet FOCUS (2026-2029, 600 000 euros, 15 chercheurs et étudiants, financé par le Ministère de la Recherche Mexicain, SECIHTI) s'inscrit pleinement dans cette logique : il mobilise les acteurs de la santé, de l'environnement et de la société civile pour développer des capacités locales en matière de prévention des zoonoses. L'objectif est de transformer les résultats scientifiques en outils d'action concrets, en intégrant la gestion des écosystèmes et la santé publique dans une approche partagée *One Health*.

Ces programmes mettent en évidence que la prévention des maladies émergentes ne peut pas être dissociée de la justice environnementale et sociale. La participation des communautés rurales, des universités locales et des ONG est essentielle pour ancrer la prévention dans les territoires et renforcer la résilience face aux changements globaux. En Amérique latine, les contextes socio-écologiques sont marqués par une forte dépendance aux ressources naturelles et une grande diversité culturelle : la reconnaissance des savoirs locaux et la valorisation des dynamiques communautaires apparaissent ainsi comme des conditions indispensables à la durabilité des actions.

En reliant la recherche écologique, la surveillance virologique et les sciences sociales, ces initiatives contribuent à faire émerger une nouvelle approche intégrée de la prévention, qui replace la biodiversité au cœur des politiques de santé. L'enjeu n'est plus seulement de comprendre comment la perte de biodiversité favorise l'émergence des maladies, mais bien d'identifier comment sa protection peut devenir une stratégie de santé publique à part entière.

RELIER LES ÉCHELLES GLOBALES ET LOCALES : VERS UNE GOUVERNANCE INTÉGRÉE DE LA PRÉVENTION

Les défis liés à l'émergence des zoonoses dépassent largement les frontières disciplinaires et géographiques. Si les grandes initiatives internationales comme PREZODE ou ZODIAC posent les fondations d'une gouvernance mondiale reliant biodiversité et santé, leur efficacité dépend de leur capacité



à s'ancrer dans les territoires. C'est précisément dans cette articulation, entre coordination globale et actions locales, que se situe la clé d'une prévention durable.

Dans cette optique, la création de consortiums transnationaux permet de relier les échelles d'action et de recherche, en assurant la circulation des connaissances et des bonnes pratiques. Ces plateformes de coopération favorisent une approche réellement intégrée de la santé et de la biodiversité, où les politiques globales s'enrichissent des apprentissages issus du terrain, et où les innovations locales peuvent être diffusées à plus grande échelle.

L'un des exemples les plus significatifs de cette dynamique est la création, dans le cadre du projet Fonds Équipe France – Une Seule Santé, porté par l'Ambassade de France au Mexique et mis en œuvre par l'IRD, d'un réseau régional d'ONG et d'acteurs locaux répartis dans sept pays d'Amérique latine et des Caraïbes. Ce réseau favorise la mutualisation des compétences éducatives, scientifiques et opérationnelles autour de la prévention des zoonoses, de la santé environnementale et de la protection des écosystèmes. En soutenant la co-construction d'actions de terrain et la participation active des communautés locales, il contribue à renforcer la résilience des territoires face aux risques sanitaires émergents tout en ancrant les principes de l'approche *One Health* dans les pratiques régionales. Parmi les actions co-construites, plusieurs ONG du réseau ont développé avec les communautés rurales des ateliers de sensibilisation aux risques zoonotiques intégrant pratiques agricoles locales et savoirs traditionnels. Au Mexique, des modules éducatifs participatifs ont également été élaborés avec les écoles et comités communautaires pour améliorer la gestion des déchets, réduire les gîtes larvaires de moustiques et renforcer l'observation citoyenne de la faune. Ces initiatives illustrent comment la co-construction permet d'adapter les interventions aux réalités sociales et environnementales de chaque territoire.

Ces consortiums incarnent une nouvelle manière de penser la gouvernance de la santé environnementale : coopérative, décentralisée et inclusive. En reliant les échelles locales et globales, ils traduisent concrètement le fait que la biodiversité n'est plus seulement un enjeu écologique, mais un bien commun à protéger pour la santé de tous.

CONCLUSION

La multiplication des crises sanitaires souligne la nécessité de dépasser une approche strictement réactive pour inscrire la prévention des zoonoses dans des politiques publiques fondées sur la protection du vivant. Les exemples présentés montrent que les avancées scientifiques, lorsqu'elles sont articulées à une gouvernance internationale solide et à des dynamiques locales de co-construction, permettent d'orienter la gestion des territoires vers des mesures concrètes de réduction des risques. Toutefois, l'appropriation de ces cadres demeure inégale selon les pays, révélant des écarts persistants en matière de capacités techniques, de financement et de coordination intersectorielle. Renforcer ces dispositifs implique de soutenir les institutions nationales et les acteurs communautaires, d'encourager des pratiques productives compatibles avec la santé des écosystèmes et de consolider les réseaux de coopération régionale. En replaçant la biodiversité au cœur des stratégies de prévention, il devient possible de bâtir des systèmes de santé plus résilients, capables d'anticiper les émergences plutôt que d'y répondre trop tard.

À propos des auteurs

Audrey Arnal est chargée de recherche à l'IRD (l'Institut de Recherche pour le Développement) et spécialiste des interfaces entre biodiversité et santé. Elle travaille sur les dynamiques d'émergence virale et sur la co-construction de stratégies de prévention avec les acteurs locaux en Amérique latine. Elle a été nommée début 2026 au Conseil scientifique international de Santé publique France.

Benjamin Roche est directeur de recherche à l'IRD (l'Institut de Recherche pour le Développement), spécialisé en éco-épidémiologie et en gouvernance internationale *One Health*. En 2020, il a fait partie du groupe de travail « Biodiversité et pandémies » organisé par l'IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services), où il a été porte-parole francophone du rapport et responsable de la première section consacrée à l'état de l'art sur les liens entre biodiversité et santé. Il a également cofondé l'initiative internationale PREZODE (PREventing ZOonotic Disease Emergence). Ses recherches visent à intégrer la biodiversité dans les politiques publiques de prévention des zoonoses.



Indicateurs et données :

Des outils pour relier la biodiversité et la santé

Dr David Nogués Bravo

Professeur au Globe Institute de l'Université de Copenhague

Les indicateurs intégrés sur la biodiversité et la santé sont essentiels pour comprendre de quelle manière les évolutions de la biodiversité affectent la santé humaine et pour que les secteurs publics et privés puissent prendre des décisions qui pourraient affecter la biodiversité et la santé. Bien qu'il existe une demande pour de tels indicateurs au niveau international, ils restent rares et difficile à développer. Or, sans ces indicateurs, gouvernements et entreprises ne peuvent pas constater les effets croisés de leurs décisions, ne voyant ni les avantages pour la santé (par ex. l'exposition à la nature qui booste le système immunitaire) ni les risques (par ex. les maladies transportées par des vecteurs). Des métriques intégrées révéleraient aussi des risques composés, là où la dégradation de l'environnement amplifie les vulnérabilités de la santé. Pour les développer, il faudrait une expertise interdisciplinaire, une meilleure intégration des données et un engagement plus marqué des institutions envers la réflexion sur les systèmes.

LE BESOIN D'INDICATEURS INTÉGRÉS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LA SANTÉ

QUE VOULONS-NOUS DIRE PAR INDICATEURS ET MÉTRIQUES INTÉGRÉS ET POURQUOI CES INDICATEURS SONT-ILS ENCORE SI RARES ?

Les indicateurs intégrés sont des métriques qui nous aident à comprendre de manière combinée les effets positifs et négatifs de la biodiversité sur la santé humaine. Ils nous aident aussi à répondre à certaines questions, par exemple : l'évolution de la biodiversité, et notamment la perte de biodiversité affecte-t-elle notre santé de manière négative ou positive ?

Aujourd'hui, la recherche sur la biodiversité et la recherche sur la santé publique s'appuient sur des traditions radicalement différentes : la première utilise des indicateurs comme la diversité des espèces, des écosystèmes ou des fonctions, tandis que la seconde s'appuie sur des mesures telles que la mortalité, la morbidité ou l'incidence des maladies. Ces disciplines ont évolué de façon isolée, étudiant des objets différents et générant des métriques difficilement comparables. Malgré les progrès dans la compréhension des liens entre biodiversité et santé, l'absence d'indicateurs explicitement conçus pour les relier limite encore leur traduction en décisions concrètes.

POURQUOI AVONS-NOUS BESOIN D'INDICATEURS INTÉGRÉS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LA SANTÉ POUR ÉCLAIRER LES DÉCISIONS EN DEHORS DU MONDE UNIVERSITAIRE, NOTAMMENT DANS LE DOMAINE DES POLITIQUES PUBLIQUES ?

À ma connaissance, il n'existe pas d'indicateur intégré officiel sur lequel les décideurs puissent s'appuyer. Certaines études relient néanmoins biodiversité et santé, par exemple le déclin des pollinisateurs, susceptible de réduire certains apports en

vitamines et d'aggraver la malnutrition, causant chaque année environ 700 000 décès¹. D'autres approches économiques estiment les risques sanitaires, comme l'évaluation du coût du non-usage des ressources végétales à des fins thérapeutiques². Toutefois, ces travaux ne constituent pas de véritables indicateurs intégrés. En leur absence, les décideurs publics et privés manquent de visibilité sur les effets croisés de leurs décisions sur la biodiversité et la santé.

Le Danemark en est un bon exemple : le gouvernement investit massivement dans le reboisement en aidant les propriétaires fonciers à convertir leurs terres agricoles en espaces naturels, avec pour objectif de couvrir environ 10 % du territoire en nature et en forêts d'ici 2045³. Ces initiatives peuvent avoir des effets positifs sur la santé. Des recherches, notamment au Danemark⁴, montrent que les habitats naturels abritent une plus grande diversité microbienne que les terres agricoles ou urbaines. L'exposition à ce microbiome peut moduler le système immunitaire humain et réduire le risque de maladies inflammatoires et allergiques⁵. Toutefois, le reboisement comporte aussi des risques, comme une augmentation des cas

1 Smith M, Singh G, Mozaffarian D et al. Effects of decreases of animal pollinators on human nutrition and global health: a modelling analysis [Effets de la diminution des pollinisateurs animaux sur la nutrition humaine et la santé mondiale : une analyse par modélisation]. *The Lancet*, 2015; 386, 1964-1972, [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(15\)61085-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(15)61085-6).

2 Theodoridis S, Drakou EG, Hickler T, Thines M, Nogués-Bravo D. Evaluating natural medicinal resources and their exposure to global change [Évaluation des ressources médicinales naturelles et de leur exposition aux changements globaux]. *Lancet Planet Health*. Fév. 2023 ; 7(2):e155-e163. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00317-5](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00317-5).

3 La Commission Européenne, 2025 autorise un régime danois d'aides d'État d'un montant de 626 millions d'euros en faveur de la plantation de forêts.

4 Singleton et al., 2026, *Nature The Microflora Danica atlas of Danish environmental microbiomes* [Atlas Microflora Danica des microbiomes environnementaux danois]. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09794-2>.

5 Roslund, M.I. et al. (2020). Biodiversity intervention enhances immune regulation and health-associated commensal microbiota among daycare children [(2020). Une intervention en faveur de la biodiversité améliore la régulation immunitaire et le microbiote commensal associé à la santé chez les enfants en garderie]. *Science Advances*, 6(42), eaba2578. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2578>.



de la maladie de Lyme, le réchauffement climatique favorisant l'expansion des populations de tiques. Sans indicateurs intégrés, les ministères chargés de l'aménagement du territoire ou du développement forestier passent à côté de ces bénéfices et risques croisés.

Au niveau international, les pays signataires de la Convention sur la diversité biologique ont convenu, en novembre 2024, de prendre en compte les aspects sanitaires de la biodiversité et de mettre en œuvre un Plan d'action mondial sur la biodiversité et la santé, et notamment de travailler à « l'élaboration d'indicateurs scientifiques intégrés, de paramètres de mesure et d'outils de suivi des progrès sur la diversité biologique et la santé »⁶. Bien que non contraignant juridiquement, ce plan marque un tournant dans la reconnaissance de la planète comme un « système de systèmes » et de la nécessité d'une réflexion systémique sur toute décision liée à la biodiversité et à la santé. Cependant, aucune mesure concrète n'a encore été officialisée.

DANS LE SECTEUR PRIVÉ, LES RISQUES ASSOCIÉS À LA BIODIVERSITÉ ET À LA SANTÉ SONT SOUVENT ÉVALUÉS SÉPARÉMENT. QUELLES SONT LES CONSÉQUENCES DE CETTE SÉPARATION ?

Dans les secteurs économiques et financiers, les entreprises s'appuient sur des indicateurs pour prendre des décisions et évaluer leurs effets sur leurs propres activités et sur leurs clients. Ce sont les seules références pour la responsabilité et la traçabilité. Or, si les entreprises évaluent séparément les risques pour la santé et la biodiversité, ils perdent de vue les interactions entre ces dimensions et passent ainsi à côté d'informations essentielles.

Ce problème a été souligné en juin 2025, quand le Programme des Nations unies pour l'environnement et plusieurs grandes compagnies d'assurance, ont publié un rapport indiquant que les assureurs sous-estimaient peut-être les risques posés par l'évolution de la biodiversité pour la santé humaine, simplement parce qu'ils ne sont pas en mesure de faire le lien⁷. En effet, leurs cadres d'évaluation des risques ne tiennent pas compte des risques liés à la nature. Par exemple, peu d'évaluations ont été réalisées sur le risque accru de maladies liées à la diminution possible de produits naturels disponibles pour la recherche et le développement pharmaceutiques. Or, les entreprises du secteur dépendent fortement de la diversité végétale et fongique : environ la moitié des médicaments développés reposent sur des composés naturels ou s'en inspirent. C'est le cas du paclitaxel, dérivé de l'if du Pacifique, utilisé dans certains traitements des cancers du sein, de l'ovaire et du poumon⁸. La perte d'espèces végétales pourrait donc pénaliser les traitements actuels et futurs².

Dans les secteurs économiques et financiers, les entreprises s'appuient sur des indicateurs pour prendre des décisions et évaluer leurs effets sur leurs propres activités et sur leurs clients

Le secteur de la santé n'est pas le seul concerné. Dans l'industrie textile, la fabrication d'un simple jean nécessite des milliers de litres d'eau propre, largement filtrée par la biodiversité. De même, la construction dépend fortement des ressources naturelles extraites des écosystèmes, souvent dans d'autres régions du monde, où leur exploitation affecte la santé et les moyens de subsistance des populations locales. C'est le cas de la production de soja en Amazonie brésilienne, principale source d'alimentation animale importée en Europe. Cette culture, dans l'une des régions les plus riches en biodiversité, a entraîné une déforestation massive et un usage intensif de pesticides, parfois deux à trois fois supérieur aux taux des États-Unis. Des études montrent que ces substances, en contaminant les eaux locales, sont associées à une hausse de la mortalité par cancer chez les enfants des communautés voisines⁹. Ces populations, sans pouvoir de décision sur les modes de consommation européens et sans bénéfice économique, sont particulièrement exposées, tout comme les populations autochtones, parfois déplacées et affectées dans leurs moyens de subsistance. Les indicateurs actuels ne prennent pas en compte ces risques transfrontaliers complexes pour la biodiversité et la santé.

EN QUOI DES INDICATEURS INTÉGRÉS POURRAIENT-ILS AMÉLIORER L'ÉVALUATION DES RISQUES ET ÉVITER LA SOUS-ESTIMATION SYSTÉMIQUE ?

Quand les risques sont évalués séparément, il n'est pas possible d'identifier les risques combinés, c'est-à-dire les combinaisons de risques dont l'impact commun est plus grave que l'addition des risques seuls. En effet, il ne s'agit alors pas d'une addition, mais plutôt d'un phénomène d'amplification. Il convient donc de les évaluer en tant que système, et non de façon isolée.

Par exemple, lorsque les mangroves sont dégradées, écosystèmes essentiels qui protègent les zones côtières contre les ouragans et les inondations, les risques liés aux événements climatiques extrêmes (blessures, déplacements de population, impacts sur la santé mentale) augmentent. Si leur déclin n'est pas intégré dans les modèles de risque, la vulnérabilité réelle à ces phénomènes peut être fortement sous-estimée. Les pandémies suivent une dynamique similaire : lorsque les forêts sont défrichées pour l'urbanisation ou les infrastructures, des espèces auparavant isolées entrent en contact avec les humains, augmentant le risque de transmission zoonotique.

6 Décision adoptée par la Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique le 1^{er} novembre 2024.

7 United Nations Environment Programme (2025). Rooted in Risk: Framing Nature-Related Assessments for Insurers. Geneva. <https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2025/06/Rooted-in-Risk-1.pdf>.

8 Liu, J.C.T., De La Peña, R., Tocol, C. et al. Reconstitution of early paclitaxel biosynthetic network. Nat Commun 15, 1419 (2024) [Reconstitution des premières étapes du réseau biosynthétique du paclitaxel]. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45574-8>.

9 Skidmore, M.E., Sims, K.M., & Gibbs, H.K. (2023). Agricultural intensification and childhood cancer in Brazil [Intensification agricole et cancer infantile au Brésil]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(45), e2306003120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306003120>.



Enfin, des indicateurs intégrés pourraient contribuer à corriger un décalage fondamental : les rythmes des conseils d'administration et ceux des processus naturels ne sont pas synchronisés. Les écosystèmes évoluent sur des décennies, tandis que les cycles de décision des entreprises sont à court terme. Des indicateurs permettraient de rendre visibles ces dynamiques écologiques à long terme dans des horizons décisionnels plus courts. Cette logique rejoint le cadre des limites planétaires, fondé sur une pensée systémique où climat, biodiversité, contaminants, aérosols et autres processus sont interconnectés. À titre d'exemple, je peux citer mes travaux dans les hautes terres du Lesotho¹⁰, où l'augmentation des tempêtes a accéléré l'érosion des sols et réduit le nombre d'espèces végétales clés. La baisse de la végétation a dégradé les conditions de pâturage, affaiblissant le bétail et réduisant en retour les ressources alimentaires des familles. Aucun indicateur ne prend aujourd'hui en compte cette chaîne de causalité, de la dégradation des écosystèmes à la santé du bétail puis à la nutrition humaine. Pourtant, cet exemple, invisible sans indicateurs intégrés, illustre fortement l'interdépendance entre biodiversité et santé.

LES DIFFICULTÉS DU DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS INTÉGRÉS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LA SANTÉ

QUELS SONT LES PRINCIPAUX OBSTACLES QUI ONT JUSQU'À PRÉSENT FREINÉ LE DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS INTÉGRÉS SUR LA BIODIVERSITÉ ET LA SANTÉ ?

Divers obstacles expliquent l'absence d'indicateurs intégrés malgré l'urgence croissante. Le premier est le manque d'expertise intégrée : ces indicateurs se situent à la croisée de plusieurs disciplines cloisonnées. Or, les carrières et travaux interdisciplinaires sont très peu reconnus.

Un deuxième obstacle concerne les structures de financement. Pour demander des subventions, les chercheurs sont souvent contraints de classer leur projet dans une catégorie stricte, qui n'est pas forcément pertinente. En outre, les comités d'évaluation ne savent pas comment évaluer des travaux qui recoupent plusieurs catégories. Et même si les subventions interdisciplinaires augmentent lentement (ex. subventions Synergy accordées par le Conseil européen de la recherche), cette inadéquation avec les schémas classiques freine les progrès.

Un troisième défi, d'ordre institutionnel, concerne les données. L'écologie et la santé publique génèrent toutes deux des quantités considérables de données : surveillance de terrain, télédétection, analyses génomiques et dossiers médicaux

couvrant toute la vie des patients. Or, ces données sont difficiles à comparer, mal alignées dans l'espace et le temps, et réparties entre différents ministères et institutions. Les relier supposerait de lever ces barrières institutionnelles et de créer des infrastructures de données partagées, encore inexistantes.

Sur la scène internationale, la nécessité de disposer d'indicateurs intégrés a été soulevée pour la première fois en séance plénière lors de la dernière réunion à Panama préparant la prochaine COP sur la biodiversité en octobre 2025, une étape importante, mais qui montre également à quel point ce domaine est encore récent et sous-développé¹¹.

LES INTERACTIONS ENTRE LA BIODIVERSITÉ ET LA SANTÉ SONT INTRINSÈQUEMENT COMPLEXES. COMMENT DES INDICATEURS PEUVENT-ILS RENDRE COMPTE DE CETTE COMPLEXITÉ TOUT EN RESTANT EXPLOITABLES ?

La biodiversité est intrinsèquement complexe et s'articule autour de trois niveaux : diversité génétique, des espèces et des écosystèmes. Chacun interagit avec la santé de manière positive ou négative. Les indicateurs, sans pouvoir rendre pleinement compte de cette complexité, permettent d'en simplifier la lecture et de traduire des processus écologiques complexes en informations exploitables par les décideurs, comme dans le cadre des limites planétaires, où un indicateur clé a été défini pour chaque limite. Ainsi, la limite du changement climatique correspond à une concentration atmosphérique de CO₂ supérieure à 350 ppm (parties par million)¹².

Un débat est en cours au sein de la communauté scientifique quant à la nécessité de développer un indicateur global de la biodiversité ou de s'appuyer sur plusieurs indicateurs complémentaires. Un indicateur phare, comparable aux mesures d'équivalent CO₂ en politique climatique, pourrait créer une mobilisation en vue d'agir, mais je ne préconise pas une solution unique. À mon sens, il faudrait associer deux approches : développer des mesures pour rendre le problème visible, mais aussi construire un ensemble diversifié d'indicateurs adaptés à chaque enjeu, secteur et région.

La biodiversité est intrinsèquement complexe et s'articule autour de trois niveaux : diversité génétique, des espèces et des écosystèmes. Chacun interagit avec la santé de manière positive ou négative

La question fondamentale est de savoir si l'indicateur répond à nos besoins : il doit refléter le lien que nous cherchons à mesurer, rester applicable et fonctionner dans divers contextes. Il doit être testé, validé et amélioré au fil du temps. En effet, aucun indicateur ne peut, à lui seul, rendre compte de toutes les dimensions de la biodiversité ni de l'ensemble des liens entre évolutions écologiques et bien-être humain¹³.

¹⁰ EU MAPOSDA project (Management and Policy Options for the Sustainable Development of Communal Rangelands and their Communities in Southern Africa [Projet MAPOSDA de l'UE (Options de gestion et de politique pour le développement durable des pâturages communaux et de leurs communautés en Afrique australe)], INCO-DEV, Contract No. ICA4/CP/2000/50006).

¹¹ Convention on Biological Diversity, 27th Meeting of the Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice [Convention sur la diversité biologique, 27^e réunion de l'Organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques, techniques et technologiques]. (SBSTTA-27), Panama City, 22 October 2025.

¹² Katherine Richardson et al., Earth beyond six of nine planetary boundaries. [La Terre au-delà de six des neuf limites planétaires]. Sci. Adv. 9, eadh2458 (2023). DOI:10.1126/sciadv.adh2458.

¹³ Nogués-Bravo D, Whitmee S, Willetts L. Metrics for biodiversity and health policy integration [Indicateurs pour l'intégration de la biodiversité et de la santé dans les politiques publiques]. PLOS Glob Public Health. Jul. 2025 ; 5(7) : e0004624. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0004624>.



SUR LA VOIE DES INDICATEURS INTÉGRÉS

LES CADRES INTERNATIONAUX DE GOUVERNANCE VISENT DÉJÀ À PROMOUVOIR DES INDICATEURS INTÉGRÉS. COMMENT RENFORCER CES EFFORTS ?

Des cadres internationaux tels que la Convention sur la diversité biologique (1992) et le Cadre mondial pour la biodiversité de Kunming-Montréal (2022) jouent un rôle important en soulignant la nécessité d'indicateurs intégrés et en encourageant les pays à s'engager dans cette voie. Toutefois, s'ils fixent des objectifs pour ces indicateurs, le travail scientifique nécessaire à leur élaboration reste à faire, et aucun ensemble opérationnel n'existe encore. Le Cadre mondial pour la biodiversité inclut des indicateurs liés à la santé, comme la proportion de plans d'eau de bonne qualité, les concentrations de pesticides, la présence d'espèces pollinisatrices ou la mortalité liée aux catastrophes. Ces indicateurs sont utiles, mais demeurent peu intégrés. Ils relèvent de la biodiversité et font référence à la santé, sans pour autant mesurer le lien entre les deux.

Pour être efficaces, les indicateurs doivent présenter plusieurs caractéristiques essentielles. Ils doivent être applicables et comparables dans différents contextes (géographiques, culturels ou économiques) afin d'orienter les décisions politiques internationales de manière cohérente. Ils doivent être modulables, de l'échelle nationale à la mise en œuvre locale, et suffisamment souples pour s'adapter à des situations diverses. La transparence est également essentielle : les utilisateurs doivent comprendre comment les indicateurs sont élaborés pour pouvoir les reproduire. Enfin, ils doivent être itératifs, capables d'évoluer à mesure que de nouvelles données deviennent disponibles et qu'ils sont testés par des entreprises et des organismes publics.

Les indicateurs intégrés peuvent s'inscrire dans une approche préventive plus large, la nature elle-même fonctionnant comme une forme de médecine préventive. Sans eux, il est impossible de relier les actions en faveur de la biodiversité à leurs implications sanitaires ou d'anticiper les risques et les bénéfices qu'elles engendrent.

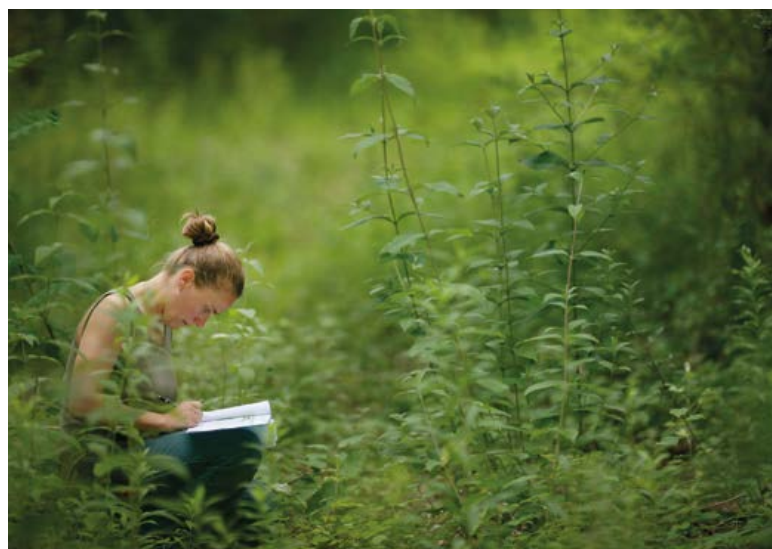
QUE PEUT-ON FAIRE POUR ACCÉLÉRER L'ÉLABORATION ET L'ADOPTION D'INDICATEURS INTÉGRÉS ?

Plusieurs conditions sont nécessaires pour avancer dans ce domaine. Premièrement, nous avons besoin d'investissements importants, et ce rapidement. L'engagement politique et le soutien réglementaire sont essentiels pour garantir l'élaboration et l'adoption de ces indicateurs.

Deuxièmement, nous devons renforcer la collaboration intersectorielle en impliquant les institutions publiques, les entreprises privées et le monde universitaire. Il est essentiel de former des experts capables d'évoluer dans ces différents domaines. Pour combler cette lacune, nous lançons un master d'un an à l'Université de Copenhague sur la pensée systémique, la santé planétaire et les interactions entre biodiversité et santé, afin de constituer la masse critique d'expertise nécessaire et de mettre en relation les étudiants avec des entreprises intéressées. Ces indicateurs sont essentiels non seulement pour comprendre la dynamique actuelle, mais aussi pour anticiper les besoins des systèmes de santé dans les décennies à venir.

Troisièmement, les indicateurs doivent bénéficier à tous, et non à quelques acteurs seulement. Les conséquences de la perte de biodiversité affectent particulièrement les pays aux systèmes de santé limités. Les communautés autochtones et locales dépendent directement d'écosystèmes sains pour leur alimentation, leur accès à l'eau et leurs plantes médicinales traditionnelles. Ils doivent donc être élaborés avec elles, et non simplement pour elles.

Enfin, les scientifiques doivent traduire ces indicateurs dans un langage compréhensible par les décideurs. De nombreuses organisations n'en perçoivent pas encore la valeur, non par résistance, mais parce que leurs bénéfices restent abstraits. Des concepts comme le risque composite permettent de rendre visible ce qui ne l'est pas. En fin de compte, les indicateurs rendent les problèmes visibles et donc plus susceptibles d'être résolus.



À propos de l'auteur

Dr David Nogués Bravo est professeur au Globe Institute de l'Université de Copenhague et spécialiste des interactions entre la biodiversité et la santé humaine. Il s'appuie sur plus de vingt ans d'expérience pour faire progresser des approches intégrées reliant les changements écologiques aux vulnérabilités, expositions et effets sur la santé. Ses travaux portent sur les modèles quantitatifs, le développement conceptuel et la conception d'indicateurs capables de rendre compte des dynamiques entre biodiversité et santé, de manière à soutenir l'élaboration des politiques publiques et la prise de décision dans le secteur privé.

Agriculture durable :

La promesse des technologies basées sur l'ARN

Johan Rodriguez-Melo
Chief Technology Officer
chez APOLO Biotech

Soledad Traubenik
Country Manager Europe
chez APOLO Biotech France

Federico Ariel
Cofondateur et Chief Science
Officer chez APOLO Biotech

Sous l'effet du changement climatique, de la croissance de la demande alimentaire dans le monde et de la nécessité de réduire l'impact environnemental de nos activités, l'agriculture est en pleine mutation. Les systèmes fondés sur l'agrochimie ont permis des gains de productivité historiques mais ont aussi engendré des problèmes majeurs : apparition de résistances, érosion de la biodiversité et pollution de l'eau et du sol. Dans ce contexte, les technologies basées sur l'acide ribonucléique (ARN) apparaissent comme une alternative prometteuse. Elles offrent la possibilité, grâce à l'interférence ARN (RNAi), de réguler de façon ciblée l'expression génique et le silençage de gènes essentiels chez les ravageurs et les agents pathogènes, tout en limitant les effets hors cible et la persistance environnementale. Les approches utilisant des ARN exogènes, comme le silençage génique induit par pulvérisation (*spray-induced gene silencing* ou SIGS), offrent une solution non transgénique, flexible et rapidement adaptable pour la protection des cultures. Les ARN peuvent également moduler la physiologie végétale, ouvrant des perspectives pour l'amélioration des cultures et leur tolérance aux stress. À la croisée de la biologie de l'ARN, des nanotechnologies et des systèmes de production extensive, ces technologies pourraient jouer un rôle central dans l'agriculture de demain. Cet article présente les limites des approches conventionnelles, l'essor des alternatives biologiques et le potentiel transformateur des technologies ARN pour une production agricole durable.

INTRODUCTION

L'agriculture fait face à des défis sans précédent sous l'effet du changement climatique et de la hausse continue de la demande alimentaire mondiale. Parallèlement, les coûts environnementaux et sanitaires des systèmes conventionnels, fondés sur l'usage des agrochimiques, sont de plus en plus visibles et appellent au développement d'alternatives innovantes et durables. Dans ce contexte, les technologies basées sur l'ARN émergent comme une approche prometteuse, offrant des solutions précises, adaptables et respectueuses de l'environnement pour la protection et l'amélioration des cultures. En exploitant les mécanismes naturels de régulation génétique, l'ARN peut agir comme un outil programmable permettant de contrôler les ravageurs, de renforcer la résilience des plantes et de réduire la dépendance aux intrants chimiques. Cet article examine comment l'ARN redéfinit l'avenir de l'agriculture et accompagne la transition vers des systèmes agricoles plus intelligents et durables.

utiles, comme les pollinisateurs¹. Un exemple bien documenté est celui des insecticides néonicotinoïdes, qui causent le déclin des populations d'abeilles et altèrent la pollinisation². Par ailleurs, l'usage répété de ces produits favorise l'émergence des ravageurs et de pathogènes résistants, ce qui réduit leur efficacité à long terme et nécessite de développer de nouvelles molécules en permanence. Cette dynamique accroît à la fois les coûts de production et la pression environnementale³.

Les conséquences sont tout aussi problématiques pour la santé publique. Chaque année, des millions de personnes sont exposées à ces produits, notamment les travailleurs agricoles des pays à faible et moyen revenu⁴. Dans certaines régions d'Argentine et du Brésil, l'exposition fréquente au glyphosate et aux organophosphorés est associée à un risque accru de troubles neurologiques, perturbations endocriniennes,

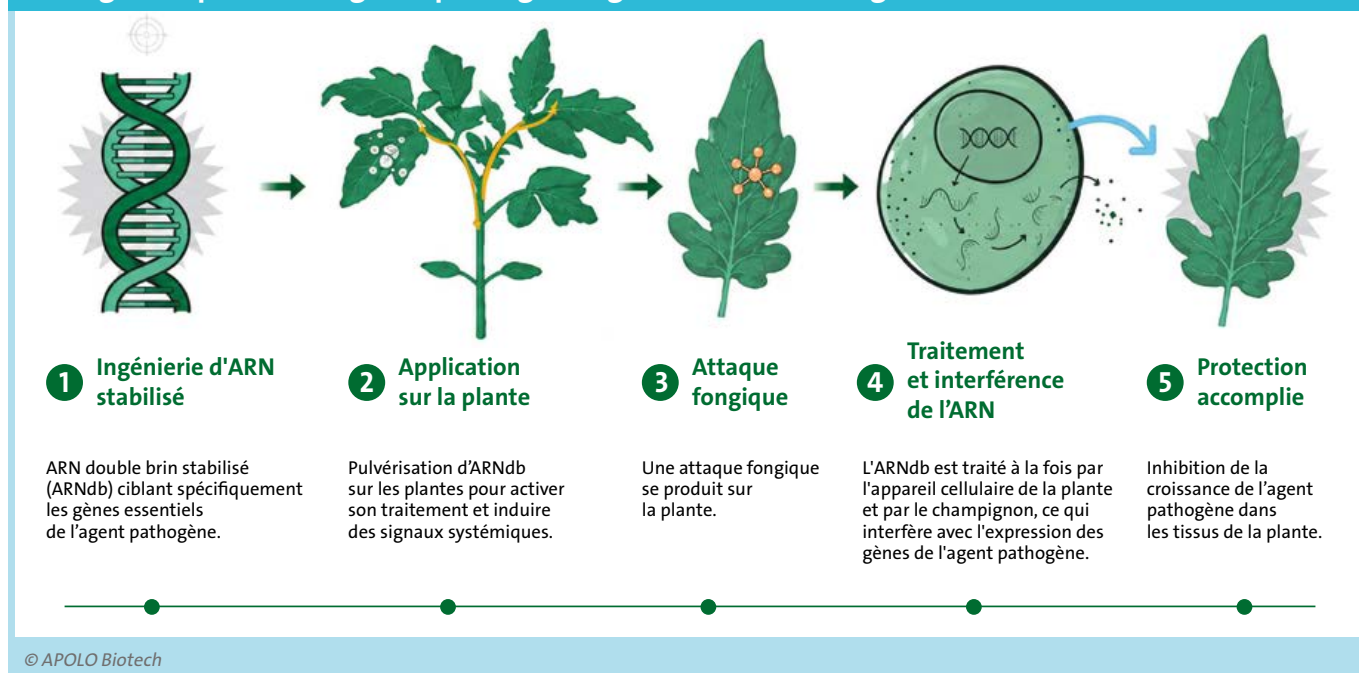
LES COÛTS CACHÉS DE L'AGRICULTURE MODERNE

L'agriculture moderne s'est construite sur l'usage intensif d'intrants agrochimiques de synthèse visant à maintenir des rendements élevés. À l'échelle mondiale, cela s'élève à plus de 4 millions de tonnes de pesticides par an, parallèlement à des apports massifs en engrais azotés et en herbicides, notamment le glyphosate. Ces intrants boostent la productivité mais ont un coût environnemental et social élevé. Leur utilisation massive contamine les écosystèmes, perturbe le microbiome des sols et affecte négativement des organismes non-cibles, entraînant une perte de biodiversité et le déclin d'espèces

- 1 Carvalho FP. 2017. Pesticides, environment, and food safety [Pesticides, environnement et sécurité alimentaire]. *Food and Energy Security* 6: 48–60. <https://doi.org/10.1002/fes3.101>.
- 2 Goulson D, Nicholls E, Botias C, Rotheray EL. 2015. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers [Le déclin des abeilles dû à un stress combiné lié aux parasites, aux pesticides et au manque de fleurs]. *Science* 347: 1255957. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>.
- 3 Fisher MC, Henk DA, Briggs CJ, Brownstein JS, Madoff LC, McCraw SL, Gurr SJ. 2018. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health [Menaces fongiques émergentes pour la santé des animaux, des plantes et des écosystèmes]. *Nature* 484: 186–194. <https://doi.org/10.1038/nature10947>.
- 4 Nicolopoulou-Stamati P, Maipas S, Kotampasi C, Stamatis P, Hens L. 2016. Chemical pesticides and human health [Les pesticides chimiques et la santé humaine]. *Frontiers in Public Health* 4: 148. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>.



Protéger les plantes d'agents pathogènes grâce à la technologie ARN



problèmes de reproduction, ainsi que certains cancers⁵. Des résidus de pesticides ont également été détectés dans certains produits alimentaires et sources d'eau, ce qui soulève la question d'une exposition chronique de la population générale. Parallèlement, les pertes de récoltes causées dans le monde par les ravageurs et les agents pathogènes restent considérables, généralement entre 20 et 40 % par an, ce qui souligne les limites des stratégies de protection actuelles⁶. Il est donc essentiel d'identifier des alternatives innovantes, durables et hautement spécifiques, capables de limiter les impacts environnementaux tout en maintenant la productivité agricole.

VERS DES SOLUTIONS SANS PRODUITS CHIMIQUES

La transition vers l'agriculture durable a entraîné un intérêt croissant pour les approches biologiques et écologiques, qui permettent de réduire la dépendance aux intrants synthétiques. En utilisant des micro-organismes bénéfiques, en gérant le microbiome du sol et en adoptant des pratiques agricoles régénératrices, il est possible de renforcer la résilience des plantes et de rétablir l'équilibre de l'écosystème⁷. Les micro-organismes favorisant la croissance des plantes (plant growth-promoting mechanisms ou PGPM)

À l'échelle mondiale, cela s'élève à plus de 4 millions de tonnes de pesticides par an, parallèlement à des apports massifs en engrais azotés et en herbicides, notamment le glyphosate

et les champignons mycorhiziens améliorent l'absorption des nutriments, stimulent l'immunité des plantes et luttent contre les agents pathogènes, par le mécanisme de la résistance systémique induite ou acquise⁸.

Certaines pratiques axées sur le sol permettent d'améliorer la santé des sols, la diversité microbienne et la durabilité à long terme, notamment en labourant moins, en amendement la terre avec des produits organiques et en pratiquant la rotation des cultures⁹. Toutefois, ces mesures bénéfiques pour l'environnement sont souvent moins précises, moins prévisibles et moins évolutives que les produits agrochimiques de synthèse. Par exemple, l'efficacité des PGPM varie fortement selon la composition du sol, la température, l'humidité ou encore la communauté microbienne en place, entraînant des résultats variables selon les parcelles et les saisons. De même, la rotation des cultures et les amendements

organiques agissent généralement par des mécanismes indirects (amélioration de la structure du sol ou stimulation de l'immunité des plantes) qui nécessitent du temps avant d'apporter une protection mesurable contre des ravageurs ou agents pathogènes spécifiques. En outre, ces stratégies ne sont pas conçues pour cibler un organisme précis au niveau moléculaire. Leurs effets sont donc souvent imprécis, dépendants du contexte et peu prévisibles.

5 Kim KH, Kabir E, Jahan SA. 2017. Exposure to pesticides and the associated human health effects [L'exposition aux pesticides et ses effets sur la santé humaine]. *Science of the Total Environment* 575: 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>.

6 Rodríguez Melo J, Mammarella MF, Ariel F. 2023. Exogenous RNAs: promising tools for the second green revolution [Les ARN exogènes : des outils prometteurs pour la deuxième révolution verte]. *Journal of Experimental Botany* 74: 2323–2337. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad023>.

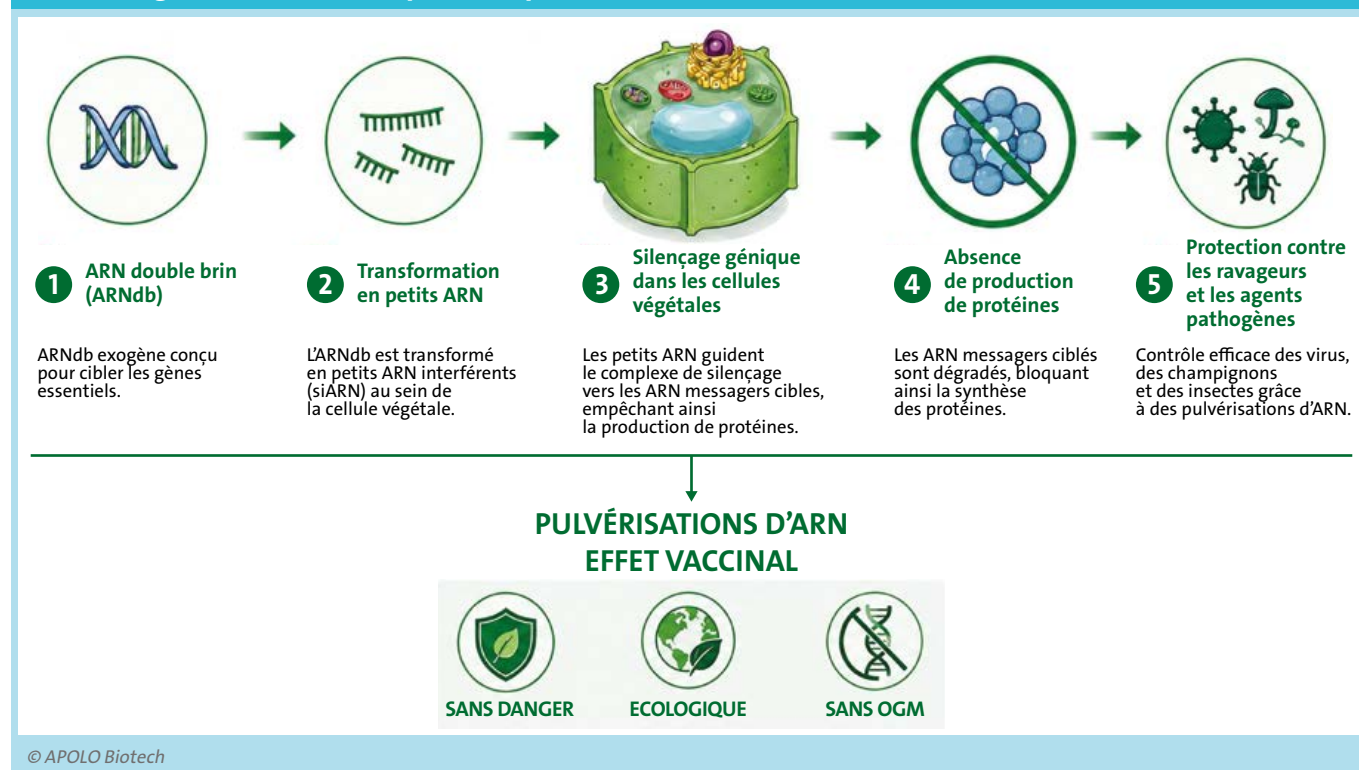
7 Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. 2002. Agricultural sustainability. *Nature* 418: 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>.

8 Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith DL. 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and road map to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture [Rhizobactéries favorisant la croissance des plantes : contexte, mécanismes d'action et feuille de route pour la commercialisation de biostimulants au service d'une agriculture durable]. *Frontiers in Plant Science* 9: 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>.

9 Lal R. 2020. Regenerative agriculture for food and climate [L'agriculture régénérative au service de l'alimentation et du climat]. *Journal of Soil and Water Conservation* 75: 123A–124A. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.5.123A>.



Technologies à base d'ARN pour les plantes



Les technologies basées sur l'ARN comblent cette lacune en associant la compatibilité biologique et la précision moléculaire. L'ARN, molécule naturelle présente chez tous les organismes vivants, joue un rôle essentiel dans l'expression des gènes. Les molécules d'ARN peuvent être conçues pour cibler spécifiquement des gènes essentiels chez les ravageurs et les agents pathogènes, offrant ainsi un mode d'action hautement sélectif. En s'hybridant à une séquence génétique précise, elles inhibent l'expression d'un gène cible et perturbent des fonctions vitales de l'organisme sans affecter les autres espèces¹⁰. Contrairement à de nombreux pesticides conventionnels, les solutions basées sur l'ARN sont biodégradables et présentent généralement une faible persistance dans l'environnement, car elles sont rapidement dégradées par le rayonnement UV, la température et les enzymes naturellement présentes¹¹. Cette faible persistance, associée à leur spécificité d'action, permet de limiter les effets sur les organismes non ciblés, tels que les pollinisateurs, les micro-organismes du sol et d'autres espèces bénéfiques.

S'agissant de la santé humaine, les données actuelles indiquent que les produits basés sur l'ARN présentent un faible risque dans des conditions normales d'utilisation. L'ARN est une molécule naturelle rapidement dégradée dans

les systèmes biologiques, dont l'activité dépend de son absorption cellulaire et de la reconnaissance spécifique de sa séquence. Dans ces applications, les molécules actives sont généralement de l'ARN double brin (ARNdb), constitué de deux brins appariés portant une information génétique spécifique capable de déclencher le silencage d'un gène cible et de bloquer une infection. Cette faible persistance, associée à la spécificité de son mode d'action, contribue à limiter les effets non intentionnels et à favoriser un impact plus ciblé sur les écosystèmes agricoles.

Soulignons qu'il est possible d'adapter les technologies basées sur l'ARN aux menaces émergentes, et ce rapidement. La possibilité de redessiner les séquences d'ARN double brin en réponse à l'évolution des agents pathogènes offre une approche dynamique et réactive pour la protection des cultures¹², à l'instar des vaccins à ARN développés en continu durant la pandémie de COVID-19 face à l'apparition de nouveaux variants. L'intégration des outils fondés sur l'ARN aux intrants biologiques et aux technologies d'agriculture de précision marque un changement de paradigme vers des systèmes agricoles plus intelligents et fondés sur les données. Cette convergence permet de développer des solutions durables, à la fois efficaces et respectueuses de l'environnement.

¹⁰ Dalakouras A, Wassenegger M, McMillan JN, Cardoza V, Maegele I, Dadami E, Runne M, Krczal G. 2020. Induction of silencing in plants by high-pressure spraying of in vitro-synthesized small RNAs [Induction du silencage chez les plantes par pulvérisation à haute pression de petits ARN synthétisés in vitro]. *Frontiers in Plant Science* 11: 1067. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01067>.

¹¹ Petrick JS, Brower-Toland B, Jackson AL, Kier LD. 2016. Safety of RNA-based crops [Sécurité des cultures à base d'ARN]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 66: 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.jyrtp.2014.12.003>.

¹² Mitter N, Worrall EA, Robinson KE, Li P, Jain RG, Taochy C, et al. 2017. Clay nanosheets for RNAi delivery [Nanofeuilles d'argile pour l'administration de l'ARNi]. *Nature Plants* 3: 16207. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.207>.



L'ARN, UN NOUVEAU LANGAGE BIOLOGIQUE POUR L'AGRICULTURE

Dans tous les domaines du vivant, les molécules d'ARN jouent un rôle fondamental dans la régulation de l'expression génique. Parmi elles, les petits ARN, notamment les microARN (miARN) et les petits ARN interférents (siARN), sont des acteurs clés de l'interférence ARN (RNAi), un mécanisme conservé permettant un silençage génique spécifique à une séquence. Ces courts fragments d'ARN agissent comme régulateurs en guidant la machinerie cellulaire vers des gènes ciblés afin d'en réduire l'expression. Les miARN sont produits naturellement par l'organisme pour moduler finement l'activité de ses propres gènes, tandis que les siARN sont souvent générés en réponse à des signaux externes, tels que des virus ou de l'ARN introduit expérimentalement, permettant de neutraliser des informations génétiques indésirables. Ce processus est déclenché par l'ARN double brin, qui est clivé en petites molécules d'ARN guidant la cellule pour reconnaître et neutraliser les messages génétiques correspondants¹³.

Chez les plantes, l'ARNi n'est pas seulement un mécanisme de régulation, mais aussi un système de défense essentiel contre les agents pathogènes, notamment les virus. Le mécanisme d'ARNi détecte et traite l'ARN double brin (ARNdb) d'origine pathogène, déclenchant une réponse immunitaire spécifique à la séquence qui limite l'infection¹⁴. Ce système de défense naturel a servi de base au développement de technologies de protection des cultures fondées sur l'ARN. Les applications de l'ARN en agriculture se divisent principalement en deux approches : transgénique et non transgénique. Le silençage génique induit par l'hôte (HIGS) repose sur l'expression d'ARN double brin au sein de plantes génétiquement modifiées, permettant une production continue de molécules de silençage ciblant des ravageurs ou des agents pathogènes¹⁵. Bien que très efficace, cette approche se heurte à des défis réglementaires et d'acceptation par le public. Par exemple, des cultures comme le maïs conçu pour exprimer un ARN ciblant la chrysomèle occidentale des racines du maïs sont efficaces sur le terrain, mais leur déploiement est soumis à des réglementations strictes sur les OGM, notamment en Europe, où les procédures d'autorisation sont longues et le public beaucoup plus prudent.

Les technologies basées sur l'ARN peuvent ainsi réduire les effets indésirables sur les organismes bénéfiques et offrir une protection des cultures plus sélective

En revanche, les méthodes d'application exogène d'ARN, telles que le silençage génique induit par pulvérisation (SIGS), constituent une alternative non transgénique. Cette approche consiste à appliquer de l'ARN double brin (ARNdb) à la surface des plantes, où il peut être absorbé par les tissus végétaux ou directement capté par les ravageurs et les agents pathogènes. Une fois internalisé, l'ARNdb déclenche un mécanisme d'ARNi ciblant des gènes essentiels, ce qui réduit la virulence des agents pathogènes ou l'apparition des symptômes des maladies¹⁶.

Plusieurs études ont démontré l'efficacité de l'ARN double brin (ARNdb) exogène contre un large éventail d'agents pathogènes. Par exemple, *Botrytis cinerea*, le champignon responsable de la pourriture grise chez de nombreuses cultures, peut être contrôlé en ciblant des gènes impliqués dans le traitement de l'ARN, essentiels à sa croissance et à son pouvoir infectieux. De même, des applications d'ARNdb ont permis de réduire les infections causées par d'autres champignons phytopathogènes majeurs, tels que *Fusarium* et *Sclerotinia*, responsables d'importantes pertes agricoles à l'échelle mondiale¹⁷. Les stratégies fondées sur l'ARN se sont également révélées efficaces contre certains insectes ravageurs, en ciblant des gènes indispensables à leur survie ou à leur reproduction, ce qui entraîne une augmentation de la mortalité et une diminution de la croissance des populations.

Alors que d'autres technologies agissent contre un large éventail d'agents pathogènes, l'un des principaux atouts des approches basées sur l'ARN réside dans leur grande spécificité. Les séquences d'ARN double brin peuvent être conçues pour cibler des régions uniques du génome d'un agent pathogène donné, absentes chez les autres organismes. Cette précision permet de neutraliser des gènes essentiels chez l'organisme cible tout en limitant les effets sur les espèces non ciblées, dont les séquences génétiques diffèrent. Les technologies basées sur l'ARN peuvent ainsi réduire les effets indésirables sur les organismes bénéfiques et offrir une protection des cultures plus sélective. Cette spécificité est un avantage considérable par rapport aux pesticides chimiques à large spectre¹⁸.

Malgré leurs nombreux avantages, les technologies basées sur l'ARN se heurtent encore à des défis liés à la stabilité, à la délivrance et aux coûts de production. Les molécules d'ARN double brin (ARNdb) non protégées sont sensibles à la dégradation par des facteurs environnementaux tels que le rayonnement UV, ce qui limite leur persistance et leur efficacité.

13 Baulcombe D. 2004. RNA silencing in plants [Le silençage de l'ARN chez les plantes]. *Nature* 431: 356–363. <https://doi.org/10.1038/nature02874>.

14 Pumplin N, Voinnet O. 2013. RNA silencing suppression [Suppression de l'interférence par l'ARN]. *Current Opinion in Plant Biology* 16: 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.06.003>.

15 Baum JA, Bogaert T, Clinton W, Heck GR, Feldmann P, Ilagan O, Johnson S, Plaetinck G, Munyikwa T, Pleau M, et al. 2007. Control of coleopteran insect pests through RNA interference [Lutte contre les ravageurs coléoptères par interférence ARN]. *Nature Biotechnology* 25: 1322–1326. <https://doi.org/10.1038/nbt1359>.

16 Dalakouras A, Wassenegger M, McMillan JN, Cardozo V, Maegele I, Dadami E, Runne M, Krczal G. 2020. Induction of silencing in plants by high-pressure spraying of in vitro-synthesized small RNAs [Induction du silençage chez les plantes par pulvérisation à haute pression de petits ARN synthétisés in vitro]. *Frontiers in Plant Science* 11: 1067. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01067>.

17 McLoughlin AG, Wytinck N, Walker PL, Girard JJ, Rashid KY, de Kievit T, Fernando WGD. 2018. dsRNA targeting fungal pathogens [ARNdb ciblant les agents pathogènes fongiques]. *Plant Biotechnology Journal* 16: 1651–1660. <https://doi.org/10.1111/pbi.12872>.

18 Petrick JS, Brower-Toland B, Jackson AL, Kier LD. 2016. Safety of RNA-based crops [Sécurité des cultures à base d'ARN]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 66: 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2014.12.003>.



Pour surmonter ces contraintes, divers systèmes de délivrance ont été développés. Certaines approches utilisent des nanoparticules à base d'argile, comme les hydroxydes doubles lamellaires (LDH), capables de protéger l'ARN de la dégradation à la surface des plantes. D'autres reposent sur des polymères naturels, tels que le chitosane, qui encapsulent l'ARN et facilitent son absorption par les cellules végétales. Ces vecteurs protègent les molécules d'ARN, améliorent leur acheminement vers leur cible et prolongent leur durée d'action en conditions réelles¹⁹. Parallèlement, les technologies de production ont beaucoup progressé. En effet, il est possible d'envisager la fabrication d'ARNdb à grande échelle à des coûts de plus en plus compétitifs via la transcription *in vitro* ou les plateformes microbiennes.

Ces différentes avancées font de l'ARN un nouveau langage biologique pour l'agriculture, capable de permettre des interactions précises, programmables et respectueuses de l'environnement avec les systèmes vivants. En tirant parti de la capacité régulatrice inhérente à l'ARN, il devient possible de concevoir des solutions à la fois hautement spécifiques et adaptables à des défis agricoles en constante évolution.

PARLER LE LANGAGE DES PLANTES : LES NOUVELLES PERSPECTIVES DES TECHNOLOGIES BASÉES SUR L'ARN FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Au-delà de leur rôle dans la protection des cultures, les technologies basées sur l'ARN ouvrent des perspectives pour moduler la physiologie des plantes face aux contraintes environnementales. Au cœur de cette approche se trouve le transcriptome non codant, qui regroupe les ARN ne codant pas pour des protéines mais jouant un rôle essentiel dans la régulation de l'expression génique. Parmi eux figurent les petits ARN (miARN et siARN) ainsi que les longs ARN non codants (lncARN), aujourd'hui reconnus comme des régulateurs majeurs du développement et des réponses au stress²⁰. Chez les plantes, ces ARN interviennent dans l'adaptation à la sécheresse, aux températures extrêmes, à la salinité ou encore aux attaques de pathogènes en modulant des réseaux de gènes impliqués dans la signalisation hormonale, l'équilibre osmotique, la détoxification des espèces réactives de l'oxygène et les réponses immunitaires²¹. Cette couche de régulation constitue une sorte de langage moléculaire, qui permet aux plantes de percevoir et d'interpréter leur environnement²². Des avancées récentes suggèrent que ce langage pourrait être exploité de manière

externe grâce à des applications d'ARN exogènes. Initialement développées pour le silençage génique des ravageurs et des agents pathogènes, ces approches pourraient également délivrer des ARN régulateurs imitant les signaux de stress naturels de la plante²³. Il devient ainsi envisageable de préparer les mécanismes de défense et d'adaptation avant l'apparition d'éventuels dégâts. Des études ont montré que des ARN appliqués par voie externe pouvaient moduler l'expression de gènes en lien avec les réponses au stress, ce qui laisse envisager de nouvelles stratégies d'adaptation climatique. Certains ARN pourraient ainsi activer des mécanismes d'économie d'eau en période de sécheresse, tandis que d'autres pourraient renforcer la tolérance à la chaleur ou au froid en modulant des réseaux de gènes protecteurs²⁴. Cette capacité d'intervention rapide, ciblée et réversible, répond au besoin croissant de solutions flexibles pour maintenir la productivité agricole dans un contexte d'instabilité climatique.

QUI MÈNE LA RÉVOLUTION DE L'ARN ? LE RÔLE CLÉ DE LA RÉGLEMENTATION

Parallèlement aux avancées scientifiques et technologiques, le cadre réglementaire jouera un rôle déterminant dans le déploiement des solutions basées sur l'ARN en agriculture. Aux États-Unis, les produits fondés sur l'ARNi sont généralement classés comme biopesticides par l'Agence de protection de l'environnement (*Environmental Protection Agency* ou EPA), ce qui offre un cadre relativement clair et favorable à l'innovation pour leur évaluation et leur commercialisation. Cette approche reconnaît la nature biologique, la spécificité et le profil environnemental favorable des molécules d'ARN double brin, facilitant leur transfert depuis les laboratoires vers les applications de terrain. En outre, des acteurs majeurs de l'agriculture mondiale, comme le Brésil, ont rapidement adopté des solutions biologiques pour maintenir la productivité tout en réduisant l'usage d'intrants chimiques, ce qui montre un intérêt grandissant pour les technologies fondées sur l'ARN comme composante de l'agriculture de demain. L'Europe, en revanche, se trouve à un moment charnière. Les approches réglementaires, historiquement fondées sur le principe de précaution, pourraient évoluer pour mieux soutenir l'innovation, en cohérence avec la stratégie « De la ferme à la table » et le Pacte vert pour l'Europe, qui visent à réduire l'utilisation des pesticides chimiques et à promouvoir des alternatives plus durables. Forte de son expertise en biologie et en biochimie de l'ARN, l'Europe dispose d'une réelle opportunité pour développer des cadres réglementaires proportionnés et fondés sur les connaissances scientifiques. Elle pourrait ainsi favoriser l'adoption de ces technologies, la durabilité des systèmes agricoles et sa compétitivité dans le domaine des biotechnologies agricoles.

19 Schwartz SH, Hendrix B, Hoffer P, Sanders RA, Zheng W. 2020. Carbon dots for efficient small interfering RNA delivery and gene silencing in plants [Les points de carbone pour une administration efficace d'ARN interférents de petite taille et l'inhibition génique chez les plantes]. *Plant Physiology* 184: 647–657. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00733>.

20 Zhang YC, He RQ, Cheng Y, Wang D, Ariel F, Chen YQ. Long noncoding RNAs as molecular architects: Shaping plant functions and physiological plasticity [Les ARN non codants longs, véritables architectes moléculaires : ils façonnent les fonctions des plantes et leur plasticité physiologique]. *Mol Plant*. 2025 Oct 6;18(10):1643-1671. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2025.09.008>.

21 L'équilibre osmotique correspond à une concentration stable d'eau et de sels à l'intérieur des cellules végétales.

22 Chorostecki U, Bologna NG, Ariel F. 2023. The plant noncoding transcriptome: a versatile environmental sensor [Le transcriptome non codant des plantes : un capteur environnemental polyvalent]. *The EMBO Journal* 42: e114400. <https://doi.org/10.15252/embj.2023114400>.

23 Mammarella MF, Lucero L, Hussain N, Muñoz-Lopez A, Huang Y, Ferrero L, Fernandez-Milmanda GL, Manavella P, Benhamed M, Crespi M, Ballaré CL, Gutiérrez-Marcos J, Cubas P, Ariel F. 2023. Long noncoding RNA-mediated epigenetic regulation of auxin-related genes controls shade avoidance syndrome in *Arabidopsis* [La régulation épigénétique des gènes liés à l'auxine, médiée par des ARN non codants longs, contrôle le syndrome d'évitement de l'ombre chez *Arabidopsis*]. *The EMBO Journal* 42: e113941. <https://doi.org/10.15252/embj.2023113941>.

24 Attallah C, Conti G, Zuljan F, Zavallo D, Ariel F. 2025. Noncoding RNAs as tools for advancing translational biology in plants [Les ARN non codants : des outils pour faire progresser la biologie translationnelle chez les plantes]. *The Plant Cell* 37: koaf054. <https://doi.org/10.1093/plcell/koaf054>.



Les plants de tomate ont été traités avec un ARNdb formulé exogène ciblant *Botrytis cinerea*. Vingt-quatre heures après l'application de l'ARNdb, les plants ont été pulvérisés avec une suspension de spores de *B. cinerea*. Les photographies ont été prises 5 jours après l'inoculation (JPI).



Plante non traitée



Plante traitée avec l'ARN

© APOLO Biotech

CONCLUSION

La demande croissante pour une agriculture durable nécessite des technologies capables de concilier productivité, protection de l'environnement et santé humaine. Les technologies fondées sur l'ARN constituent une alternative prometteuse aux agrochimiques conventionnels, car elles offrent des solutions précises, adaptables et respectueuses de l'environnement pour la protection et l'amélioration des cultures. Elles s'inscrivent dans un changement de paradigme vers des systèmes agricoles plus intelligents, plus précis et plus durables. Intégrées à des pratiques agronomiques améliorées et à des intrants biologiques, elles pourraient renforcer la sécurité alimentaire mondiale, en stabilisant les rendements malgré des pressions environnementales croissantes. Autre intérêt : ces approches permettraient de réduire le recours aux agrochimiques de

synthèse et donc de limiter contamination des écosystèmes et les risques d'exposition pour les agriculteurs et les consommateurs. Les ARN ne sont plus de simples intrants : ils deviennent des outils d'information, capables d'interagir avec les réseaux de régulation des plantes et d'en moduler le fonctionnement de manière ciblée. En exploitant le potentiel régulateur du transcriptome non codant, les technologies basées sur l'ARN s'imposent comme un levier essentiel d'une agriculture résiliente face au changement climatique, vers des systèmes alimentaires plus sûrs, durables et compatibles avec la santé humaine et environnementale à long terme.

À propos des auteurs

Johan Rodriguez-Melo est Chief Technology Officer chez APOLO Biotech et chercheur à l'IFIBYNE (UBA-CONICET, Argentine), où il travaille sur les technologies basées sur l'ARN appliquées à la protection des cultures.

Soledad Traubenik est Country Manager Europe chez APOLO Biotech France et chercheuse à l'IPS2 (Université Paris-Saclay, France). Ses travaux portent sur la biologie de l'ARN et les réponses des plantes aux stress environnementaux.

Federico Ariel est cofondateur et Chief Science Officer d'APOLLO Biotech, chercheur indépendant au CONICET (IFIBYNE, Argentine) et titulaire de la chaire AXA (2025–2029). Ses recherches soutenues par une chaire AXA portent sur les ARN non codants et leurs applications en agriculture durable.

Images, récits et imaginaires :

Leviers d'action pour préserver la biodiversité

Véronique Andrieux
Directrice Générale du WWF France

L'effondrement de la biodiversité s'accélère et ses effets sont de plus en plus tangibles. Pourtant, la mobilisation en faveur de la préservation de la biodiversité peine à se concrétiser, du fait de discours institutionnels inadaptés ou accaparés générant une méfiance propice à l'attentisme. Repenser la préservation du vivant suppose donc de refonder les discours et les imaginaires de la biodiversité. Dans cette perspective, la santé émerge comme un narratif puissant, capable de fédérer les aspirations variées d'une opinion publique fragmentée. Remettre en lumière une biodiversité locale et ordinaire permet par ailleurs d'outiller le grand public avec des leviers de préservation concrets. Enfin, des formats courts adaptés aux réseaux sociaux, des messages accessibles et connectés à la culture populaire, constituent un levier pour rapprocher les citoyens des enjeux écologiques locaux. Repenser les narratifs devient un moyen essentiel de sensibiliser aux enjeux biodiversité et sanitaires. Il s'agit, en définitive, de rendre tangibles les effets positifs de l'action citoyenne sur la restauration de la biodiversité.

INTRODUCTION

Afin d'asseoir nos constats sur des données objectivées, nous avons fondé notre mobilisation sur la solidité des preuves scientifiques. Le rapport *Planète Vivante* du WWF¹, souligne ainsi l'effondrement de la biodiversité : depuis 1970, les populations de vertébrés sauvages ont chuté de 68 %. Les causes de cet appauvrissement – déforestation, conversion des sols, surexploitation, changement climatique, pollutions et espèces invasives – sont connues ; tout comme les solutions : réformer le système alimentaire, protéger et restaurer les écosystèmes, réorienter les financements.

Malgré la richesse des connaissances disponibles, les discours institutionnels peinent à s'imposer dans le débat public. En 2025, le changement climatique ne figure plus qu'à la septième place parmi les priorités des Français, derrière la santé². Pourtant, l'érosion du vivant accroît directement les risques sanitaires. Un constat s'impose : ce n'est pas l'information qui fait défaut, mais le sens collectif. Dès lors, comment comprendre cette contradiction et renouveler l'imaginaire écologique d'ici 2030 ?

LES ANTI-RÉCITS QUI GÈNÈRENT RÉSISTANCES ET SENTIMENT D'IMPUISSANCE

Le recul de l'écologie dans les priorités des Français ne traduit pas un défaut de prise de conscience. Au contraire, 96 % d'entre eux s'y déclarent sensibles, selon un sondage WWF Ipsos réalisé à

l'été 2025³. Ce décalage provient peut-être d'un sentiment d'une dépossession de moyens concrets d'agir. Alors que les partis politiques ne semblent pas répondre aux attentes des citoyens en matière de solutions face aux enjeux environnementaux. D'après l'enquête menée par *Destin Commun* (2025), 58 % des Français jugent que les élus doivent agir davantage contre le changement climatique et protéger la population⁴.

En réalité, certains récits contribuent fortement à éloigner les populations des enjeux écologiques. Tout d'abord, le portrait d'une biodiversité condamnée alimente un certain climat de catastrophisme. Bien que les alertes sur la double crise climat-biodiversité s'appuient sur des travaux scientifiques solides, notamment ceux GIEC⁵ et de l'IPBES⁶, ces derniers ne sont pas toujours efficaces pour susciter la mobilisation du grand public. Ils peuvent générer anxiété, résignation et paralysie du pouvoir d'agir plutôt que mobilisation. Par ailleurs, le jargon scientifique et le déficit d'émotion n'aident pas à démocratiser les messages : « services écosystémiques », « biodiversité fonctionnelle », chiffres en TWh ou en ppm. Autant de notions maîtrisées par les initiés mais largement incomprises du grand public. Ce langage peut instaurer une distance, voire un rejet des citoyens qui ne se reconnaissent pas dans les lanceurs d'alerte.

Le combat pour la biodiversité est parfois associé à une écologie dite « punitive ». L'écologie est trop souvent présentée comme synonyme d'une accumulation de contraintes moralisatrices et culpabilisantes, en occultant le coût pour la collectivité des externalités négatives des destructions et dégradations

1 WWF France (2024) Rapport Planète Vivante 2024 – Un système en péril. WWF France. <https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2024-10/Rapport%20Planete%20Vivante%202024%20-%20WWF%20France.pdf>.

2 Ipsos Bva (2025) Ce qui préoccupe les Français - Septembre 2025 | Ipsos.

3 Ipsos BVA. (2025). La perception par les Français du lien entre écologie et politique – Octobre 2025. WWF France. <https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2025-11/Ipsos%20bva%20pour%20WWF%20-%20Ecologie%20et%20politique%20-%20Octobre%202025.pdf>.

4 Destin Commun (2025) Elections municipales 2026 : à quatre mois du scrutin, les Français expriment des attentes claires pour leurs communes.

5 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

6 Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.



environnementales. Le grand public est dépossédé de moyens concrets d'action lorsque l'accompagnement et le financement de la transition n'est pas garanti. L'augmentation de la taxe carbone en 2018 en est un exemple emblématique : elle a cristallisé un sentiment d'injustice et contribué à l'émergence du mouvement des Gilets jaunes. Pour la majorité des citoyens se joue le combat de la fin du monde contre la fin du mois, et les questions de pouvoir d'achat se hissent au sommet des priorités des Français⁷. Pourtant, il est illusoire d'opposer ces combats. Le changement climatique accentue les inégalités : les populations les plus modestes, alors que peu responsables car ayant une empreinte environnementale moindre, sont les plus exposées. Dans les quartiers populaires, des logements mal isolés aggravent les effets des canicules et du froid, révélant l'interdépendance entre justice sociale et transition écologique.

Parallèlement, l'évolution du débat public ne favorise ni l'apaisement ni les pensées complexes. Les mutations de l'arène médiatique, structurée par les réseaux sociaux, imposent des formats courts et fortement guidés par des logiques algorithmiques. Les nouveaux récits devront ainsi composer avec des codes nouveaux tout en conservant rigueur scientifique et capacité explicative.

Le changement climatique accentue les inégalités : les populations les plus modestes, alors que peu responsables car ayant une empreinte environnementale moindre, sont les plus exposées

LE POUVOIR DES RÉCITS ET DES IMAGINAIRES : L'EXPÉRIENCE DU WWF FRANCE

De nouveaux récits soumis à consultation citoyenne

En 2025, le WWF France a mené une expérience ambitieuse. Il a réuni pendant neuf mois un collectif pluridisciplinaire (chercheurs, acteurs de terrain, artistes et experts) afin de croiser les regards et faire émerger des récits écologiques ancrés dans les imaginaires contemporains. Ces récits ont ensuite été confrontés au réel au travers d'enquêtes, d'échanges scientifiques et d'une large consultation citoyenne, afin d'identifier les narrations capables de susciter émotion, engagement et adhésion du grand public (10 000 participants)⁷. Les pistes identifiées (santé, patrimoine, géopolitique et économie) ont ensuite été validées par sondage en collaboration avec Ipsos Bva⁸. Les résultats sont sans appel.

La santé apparaît comme le levier le plus puissant de mobilisation : 79 % des participants estiment le lien entre biodiversité et santé « parlant », et 19 % d'entre eux déclarent que la santé environnementale affecte leur bien-être mental. Les récits ancrés dans les trajectoires personnelles sont les plus efficaces : le récit santé a trouvé son point d'ancrage le plus fort avec l'exemple des clusters de cancers pédiatriques en Charente-Maritime liés aux pesticides. Ces récits confirment que les citoyens agissent lorsqu'ils se sentent personnellement concernés (création de collectifs locaux, carte d'exposition, enquêtes épidémiologiques, etc.)⁷.

Selon les termes d'un participant « *On ne protège pas la planète par altruisme pur, mais parce qu'on protège ce qui compte pour nous : sa santé, sa maison, son territoire, son portefeuille* ». À l'inverse, les enjeux géopolitiques (ex : guerres de l'eau, dépendance à l'uranium) restent abstraits et constituent le récit le moins mobilisateur.

En s'appuyant sur des histoires personnelles et concrètes, l'écologie devient impossible à ignorer. Pour éviter l'anxiété paralysante, il est indispensable de proposer des pistes concrètes, telles que :

- « *Voici comment réduire l'exposition aux pesticides : acheter bio, soutenir les agriculteurs en conversion, exiger des zones tampons près des écoles* »
- « *En Loire-Atlantique, des parents ont obtenu l'interdiction des épandages près des habitations. Et ça fonctionne* »

L'argument économique est par ailleurs déterminant pour les classes moyennes propriétaires : la dépréciation immobilière de leurs résidences principales illustre clairement le lien entre économie et climat. Savoir que sa prime d'assurance habitation pourrait doubler d'ici 2050 rend la menace tangible, mais souvent lointaine. Pour la rendre immédiate, il convient de s'appuyer sur des solutions accessibles comme

isoler son logement, végétaliser son quartier ou restaurer des zones humides.

Faire le lien entre le quotidien des Français et la biodiversité

Les « big five » : des symboles puissants, entre levier de mobilisation et source d'inaction

Les « big five » (lion, éléphant, léopard, buffle, rhinocéros) et autres espèces emblématiques (tigre, ours blanc, grands singes...) restent de puissants leviers de mobilisation. « *Le lion est un symbole de la nature sauvage, un archétype qui parle à notre imaginaire collectif. Lorsqu'il disparaît, c'est une part de notre humanité qui s'éteint* », analyse Alexandra Palt, présidente du WWF France⁹. Ces animaux stars concentrent la beauté du monde sauvage. Leurs images provoquent systématiquement des pics de partage sur les réseaux sociaux. Ce mécanisme a déjà été exploité par le WWF, notamment avec la campagne #LastSelfie (2014). Diffusés sur Snapchat, des selfies accompagnés du message « *Don't let this be my #LastSelfie* », étaient devenus viraux¹⁰.



7 WWF (2025) Récits pour une écologie populaire - renouer avec les préoccupations des Français.pdf.

8 Ipsos BVA. (2025). La perception par les Français du lien entre écologie et politique – Octobre 2025. WWF France.
<https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2025-11/Ipsos%20bva%20pour%20WWF%20-%20Ecologie%20et%20politique%20-%20Octobre%202025.pdf>.

9 WWF (2026) Faire la Paix avec les lions (p. 5).

10 JUPDLC (2014) WWF surfe sur la vague des selfies pour défendre les espèces menacées.

Dans certains cas, une communication trop centrée sur ces espèces peut être contre-productive. Certains s'interrogent sur la pertinence de préserver les écosystèmes sauvages à l'autre bout de la planète lorsqu'ils peinent eux-mêmes à assumer leurs dépenses essentielles immédiates. Pour beaucoup, notamment dans les milieux populaires ou urbains, la protection de la biodiversité apparaît exotique, voire élitiste. Rapprocher les narratifs autour d'une biodiversité ordinaire et locale peut faciliter la compréhension des enjeux et l'interdépendance qui nous lie à une nature en bonne santé.

La biodiversité locale : un levier méconnu mais efficace

La biodiversité locale est omniprésente mais souvent invisible malgré son rôle central dans notre alimentation et notre santé. Une campagne du WWF en 2025¹¹ consacrée aux vers de terre, « *Sans eux, pas de sols fertiles... et pas de nourriture dans votre assiette* », a rencontré un succès inattendu auprès des agriculteurs, parce qu'elle parlait directement de leur métier et de leur survie économique.

« *Un sol sans vers de terre, c'est comme un corps sans intestins : il ne digère plus rien* », témoigne un agriculteur breton. En quelques semaines, la campagne a généré des milliers de partages et des dizaines de demandes de formation en agroécologie.



D'autres campagnes WWF sur Instagram visent à clairement lier biodiversité locale, santé des écosystèmes et santé humaine comme pour l'appel à la pétition « *Hands off Nature* » (2026) contre les ambitions de démantèlement de lois de protection de la nature au niveau européen¹².

Deux stratégies principales émergent pour rapprocher la biodiversité du quotidien. Il convient d'une part de mettre en avant des espèces emblématiques de nos territoires – loups, renards, hérissons, blaireaux – incarnant notre capacité à coexister avec le vivant, nourrissant émerveillement et émotion. D'autre part, il importe de communiquer sur le rôle des espèces ordinaires comme garants de notre bien-être :

- « *Un moineau dans votre jardin, c'est le signe d'un quartier sain.* », cette espèce ne survivant que dans des environnements offrant végétation, air et nourriture de qualité.
- « *Des chauves-souris près de chez vous ? Elles mangent jusqu'à 3 000 moustiques par nuit.* », leur présence permettant de réguler les populations de moustiques et de freiner la transmission de certaines maladies.

Ces récits rendent l'écologie accessible et incarnée. « *Protéger la nature, ce n'est pas seulement sauver l'Amazonie, c'est aussi prendre soin de la rivière près de chez soi* », comme le résumait un participant à notre consultation citoyenne. La biodiversité ordinaire permet ainsi d'ancrer l'action dans le quotidien, via des outils concrets comme grâce au guide « *Ouvrez un hôtel pour les abeilles* » du WWF pour apprendre à préserver la biodiversité des balcons et des jardins¹³.

COMMUNIQUER LA BIODIVERSITÉ À L'ÈRE DES RÉSEAUX SOCIAUX : CAPTER L'ATTENTION EN TROIS SECONDES

La diffusion de ces récits à l'ère des réseaux sociaux requiert une stratégie adaptée à la baisse de l'attention et aux algorithmes qui privilégient l'émotion immédiate. Elle repose sur trois ingrédients clés : la simplicité, l'émotion et les relais inattendus. Aujourd'hui, ONG, citoyens, influenceurs et parfois entreprises participent à raconter la biodiversité, à condition de disposer des cadres adéquats pour.

Les défis des formats courts

Le temps d'attention disponible moyen a fortement chuté¹⁴. Le principal écueil consiste à réduire la biodiversité à des images sensationnalistes (ours polaire isolé, forêt en flammes) susceptibles de provoquer du rejet ou de la lassitude. Une réponse efficace repose sur des formats courts, émotionnels et interactifs, capables de transmettre un récit en quelques secondes. Ce type de format été déployé sur Instagram par le WWF, comme lors d'un partenariat en 2025 avec le média Konbini à l'occasion de la mini-série en deux épisodes « *Enraciné.e.s* » pour aller à la rencontre d'initiatives locales de la préservation de la biodiversité¹⁵.



11 WWF (2025) Le ver de terre | WWF France.

12 WWF (2026) Hands off nature.

13 WWF (2019) Des balcons et des jardins vivants pleins de fleurs et d'abeilles.

14 Stanford University, Fargol Rozati (2025) Analyzing the Effects of TikTok on the Attention Span of Evolving High School Students [Analyse des effets de TikTok sur la capacité d'attention des lycéens en pleine évolution] | Intersect: The Stanford Journal of Science, Technology, and Society.

15 Konbini (2025) En Tunisie, Féris part à la rencontre de ceux qui luttent contre la crise climatique.



S'appuyer sur des relais non-experts

Pour toucher de nouveaux publics, il est essentiel de sortir des incarnations écologistes traditionnelles et de s'appuyer sur des voix de proximité et du quotidien. Les influenceurs deviennent ainsi de nouveaux conteurs de la biodiversité. Ainsi, Mamadou Dembélé (@TheImpactStory, plus de 600 000 abonnés) et sa vidéo « Pourquoi les vers de terre sont les super-héros de nos assiettes » ont dépassé les 2 millions de vues, dont 40 % auprès des 18 – 25 ans. Sur Instagram¹⁶, la série de publications « Petites discordes entre voisins » promeut le programme CIBEL sur la cohabitation entre humains et animaux sauvages au Congo grâce à un format doublé par les comédiennes Camille Lellouche, Sabrina Ouazani et le rappeur Youssoupha¹⁷.

Les citoyens ambassadeurs apportent des témoignages authentiques qui renforcent la légitimité des messages. Leurs interventions doivent s'appuyer sur un langage clair et sans jargon tel que « la nature nous rend service » plutôt que « services écosystémiques ». Leur capacité à simplifier des notions complexes font rayonner la mobilisation pour la biodiversité au-delà des cercles militants.



Vers une communication segmentée

Les attentes, systèmes de valeurs et préoccupations des citoyens ne sont pas homogènes. Le *think tank* Destin Commun a analysé que la société se structure en six familles d'opinion aux attentes et aux sensibilités très différentes : militants désabusés, identitaires, attentistes, libéraux optimistes, laissés pour compte et stabilisateurs¹⁸. Une telle hétérogénéité implique d'ajuster les récits aux attentes propres à chaque groupe, un discours uniforme étant voué à perdre en efficacité.

¹⁶ WWF (2025) campagne publiée sur Instagram.

¹⁷ https://youtu.be/By9cZ_9qrOM.

¹⁸ Destin Commun (2019) Les six familles de Français.

Pour les jeunes publics engagés, les thèmes dominants restent la justice sociale et la santé, relayés via des réseaux comme Tiktok, Instagram ou Twitch. Le WWF utilise ces plateformes pour sensibiliser les plus jeunes de façon ludique¹⁹. Quant aux publics ruraux ou d'âge moyen, la transition est souvent liée à la préservation de leur patrimoine et l'évolution des pratiques agricoles²⁰. Il est donc crucial de cadrer les campagnes de communication à destination de ces publics en liant directement pratiques agricoles et action climatique : « Et si les vaches pouvaient être aussi une solution pour le climat ? Mais à une condition : qu'elles broutent dans des prairies ! », ou encore « Sans haies, vos terres perdent 20 % de fertilité ».



CONCLUSION

Travailler la transition écologique comme un problème technique ne suffit plus. La transition ne se fera pas seulement dans les institutions ou les rapports d'experts mais aussi dans la tête et dans la vie quotidienne de tous les publics et sur tous les territoires. Il est désormais vital d'investir avec la même expertise et la même implication dans les sciences cognitives, le sociétal et la culture populaire. Il faut miser sur le développement de la demande citoyenne de durabilité et illustrer de manière concrète l'influence directe de la santé environnementale sur notre santé physique et psychologique. A titre d'exemple, les bénéfices sanitaires de politiques locales de réduction de la pollution peuvent être directement perçus et compris par les citoyens : moins d'asthme, une baisse des infarctus, moins de décès prématurés.

Pour créer un élan collectif suffisant, il faudra sortir l'écologie du registre de la contrainte ou de la culpabilité. Montrer que protéger la nature, ce n'est pas revenir en arrière, mais inventer une manière plus juste et plus désirable de vivre, porteuse de sens et de la promesse d'une meilleure qualité de vie. En bref, il s'agit de faire entrer la nature dans les mœurs pour qu'elle devienne une évidence culturelle, et le socle concret d'un réflexe partagé.

¹⁹ WWF (2022) campagne de sensibilisation ludique pour WWF - WOO.

²⁰ Destin Commun (2022) ParlonsClimat_Etude_062022.pdf.

À propos de l'auteure

Véronique Andrieux, directrice générale du WWF France, est spécialiste en développement international. Elle a été Directrice Régionale d'Oxfam pour l'Amérique du Sud et les Caraïbes et pour l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Elle a également été Conseillère Senior sur les politiques de développement au ministère des Affaires étrangères espagnol et au Club de Madrid. Ancienne Directrice générale d'Action Contre la Faim, elle dirige depuis 2019 le WWF France, dont la mission est de mettre fin à la dégradation de notre environnement et de protéger les milieux naturels et les espèces. En 2024, on lui décerne le grade de Chevalier de l'Ordre du Mérite National en France.



Ce que l'eau nous révèle grâce à la science citoyenne :

Enseignements tirés de la Bolivie et du Kenya

Afnan Agramont

Chercheur en gouvernance de l'eau et de l'environnement
au département Eau et Climat de la Vrije Universiteit Brussel (VUB)

Des millions de personnes dépendent d'une eau qui n'est jamais analysée. Ce fossé est particulièrement marqué dans les pays à revenu faible et intermédiaire, d'où proviennent moins de 3 % des données mondiales sur la qualité de l'eau¹. Les systèmes de surveillance sont souvent coûteux et techniquement complexes, ce qui limite leur déploiement dans les communautés rurales. En conséquence, les risques socio-environnementaux restent largement invisibles, même lorsqu'ils affectent directement la santé humaine et la biodiversité dont dépendent les moyens de subsistance.

S'appuyant sur des expériences menées en Bolivie et au Kenya, cet article montre comment le manque d'informations accessibles sur la qualité de l'eau influence la perception et les réactions des communautés face aux changements environnementaux. Dans le bassin de la rivière Katari, les communautés autochtones vivent au quotidien avec la pollution, sans disposer des données nécessaires pour étayer leurs revendications en matière d'injustice environnementale. Dans le marais de Yala, la science citoyenne montre comment la zone humide améliore la qualité de l'eau, tout en révélant les pressions croissantes qui menacent cette fonction. Ces différents cas montrent que le défi ne consiste pas seulement à collecter davantage de données, mais aussi à rendre les informations pertinentes et exploitables. La science citoyenne peut contribuer à combler ce fossé, mais les résultats dépendront surtout du renforcement des liens entre les connaissances locales et les processus décisionnels à tous les niveaux.

INTRODUCTION

Dans de nombreuses régions du monde, la pollution de l'eau n'est pas seulement un problème environnemental, mais une réalité quotidienne souvent invisible. Là où les systèmes de surveillance sont défaillants ou inexistant, les communautés dépendent d'une eau dont elles ne peuvent évaluer la qualité, ce qui rend les risques difficiles à comprendre, à communiquer ou à contester. Cette situation reflète des inégalités plus profondes dans la production et l'accès aux connaissances environnementales.

La science citoyenne, qui implique les populations locales dans la collecte et l'interprétation des données environnementales, permet de combler ce fossé. Dans le domaine de la qualité de l'eau, elle aide les communautés à mieux comprendre les risques auxquels elles sont exposées, notamment les maladies hydriques² et les impacts sur la biodiversité dont dépendent leurs moyens de subsistance. Elle renforce également la prise de conscience des liens entre qualité de l'eau, santé et systèmes alimentaires³.

Cette approche se développe dans le monde entier et, dans des pays comme la Zambie ou la Sierra Leone, les données issues de la science citoyenne sont déjà intégrées aux rapports officiels sur la qualité de l'eau (ODD 6.3.2).

Notre travail en Bolivie et au Kenya repose sur une idée simple mais forte : quand les communautés produisent elles-mêmes leurs données sur la qualité de l'eau, elles prennent conscience d'une réalité dont elles n'avaient pas conscience.

VIVRE AVEC LA POLLUTION : LE BASSIN DE LA RIVIÈRE KATARI

Dans le bassin de la rivière Katari, qui se jette dans le lac Titicaca, la pollution de l'eau est une préoccupation quotidienne. Les communautés situées en aval dénoncent depuis longtemps la pollution issue des activités en amont : 2 millions de m³ de déchets miniers, 20 millions de m³ d'eaux usées urbaines non ou mal traitées, ainsi que le ruissellement agricole⁴.

1 PNUE. (2024). Progrès relatifs à la qualité de l' eau ambiant (résumé visuel). https://www.unwater.org/sites/default/files/2025-02/SDG6_Visual_Summary_Indicator_Report_632_Progress-on-Ambient-Water-Quality_2024_FR.pdf.

2 Agramont, A., Martinez, A. B., Gharesifard, M., Philippsborn, L. V., Lizarazo-Rodriguez, L., & van Griensven, A. (2026). Indigenous community-based approaches to environmental justice through citizen science [Approches fondées sur les communautés autochtones en matière de justice environnementale par le biais de la science participative]. <https://doi.org/10.1007/s00550-026-00588-2>.

3 Gharesifard, M., Ceccaroni, L., Gold, M., Berti Suman, A., & Das, K. (2025). Citizen science and the nexus approach: unlocking synergies for sustainable development [Science participative et approche nexus : libérer des synergies pour le développement durable]. <https://doi.org/10.1007/s00550-025-00562-4>.

4 Agramont, A., Van Cauwenbergh, N., Van Griesven, A., & Craps, M. (2022). Integrating spatial and social characteristics in the DPSIR framework for the sustainable management of river basins: case study of the Katari River Basin, Bolivia [Intégration des caractéristiques spatiales et sociales dans le cadre DPSIR pour la gestion durable des bassins hydrographiques : étude de cas du bassin de la rivière Katari, en Bolivie] *Water International*, 47(1), 8-29. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1997021>.



Le bassin porte les traces de décennies de pressions environnementales, de l'héritage minier à la croissance rapide d'El Alto, où la faible couverture du réseau d'égouts entraîne le rejet massif d'eaux usées non traitées dans les rivières locales.

Pour les familles vivant à Chojasivi, une communauté autochtone Aymara située à l'embouchure de la rivière Katari dans le lac Titicaca, il ne s'agit pas d'un problème environnemental abstrait, mais d'une réalité qui façonne leur quotidien. La biodiversité locale a été gravement affectée, avec la disparition de populations de poissons andins indigènes comme le karachi et le mauri, autrefois principales sources de protéines et de subsistance pour la communauté⁵. La pollution a aussi dégradé les sols, rendant impropres à la culture des terres auparavant agricoles. Enfin, des traces de métaux ont été détectés dans la chaîne alimentaire locale, où elles s'accumulent dans les organismes vivants et représentent un risque sanitaire important pour la communauté⁵.

Bien que la contamination quotidienne soit évidente, les communautés peinent à en démontrer l'ampleur, ayant besoin de données locales fiables pour pouvoir dialoguer avec les autorités⁶. Une initiative de surveillance communautaire a été menée à Chojasivi dans cette optique. Pendant quatre mois, des étudiants et des membres de la communauté ont prélevé 46 échantillons d'eau, dont 38 ont été validés après un contrôle qualité. À l'aide d'outils simples et peu coûteux, ils ont mesuré plusieurs indicateurs clés, notamment la turbidité (clarté de l'eau), les solides dissous et les nutriments.

Les résultats permettent de mieux caractériser la qualité de l'eau sur l'ensemble des sites étudiés. Plusieurs paramètres clés, dont la turbidité, les solides dissous totaux (SDT) et le phosphate (PO₄), dépassent systématiquement les normes nationales boliviennes pour les eaux de surface de classe C². La turbidité est particulièrement préoccupante : pour un seuil légal de 50 NTU⁷, les mesures indépendantes indiquent des moyennes d'environ 240 NTU et des pics supérieurs à 1000 NTU, révélant une forte dégradation de la qualité de l'eau. Les TDS dépassent également la limite de 500 mg/L, atteignant jusqu'à 1890 mg/L dans la rivière Katari. Enfin, les concentrations de phosphate restent élevées, avec des valeurs jusqu'à 4,0 mg/L, bien au-delà de la norme de 0,5 mg/L.

Bien que la contamination quotidienne soit évidente, les communautés peinent à en démontrer l'ampleur, ayant besoin de données locales fiables pour pouvoir dialoguer avec les autorités



Un responsable de la communauté autochtone aymara de Chojasivi observe le dispositif de contrôle de la qualité de l'eau utilisé dans le cadre des efforts de surveillance locale.
© Afnan Agramont

L'analyse temporelle met en évidence une nette tendance saisonnière. Les concentrations de polluants – notamment la conductivité, les SDT et la salinité – augmentent progressivement de mars à juin, correspondant au passage de la saison des pluies à la saison sèche, lorsque la diminution du débit des cours d'eau réduit la capacité de dilution du système. Les nutriments présentent également des pics ponctuels, avec des concentrations élevées de phosphate après la saison des pluies et des hausses de nitrate en mai, probablement liées au ruissellement agricole et urbain. Malgré une période de suivi limitée à quatre mois, ces tendances concordent avec les observations de longue date des membres de la communauté, renforçant la cohérence entre données mesurées et expérience locale.

Le processus s'est avéré particulièrement significatif car les résultats faisaient écho aux expériences des participants. Ils ont décrit des signes visibles de pollution – eau plus sombre, odeurs désagréables, présence de déchets – ce qui a permis à beaucoup d'entre eux de faire le lien entre ces conditions, le déclin des populations de poissons et certains problèmes de santé. Pour certains, cette surveillance a permis de quantifier ce qu'ils vivaient depuis longtemps.

En outre, cette expérience a mis en évidence des difficultés majeures. Si les participants ont mieux compris la qualité de l'eau, beaucoup ne savaient pas comment mobiliser ces données pour influencer les décisions ou interpellier les institutions. Plusieurs ont également exprimé leur frustration face à la réponse limitée des autorités, malgré les preuves recueillies.

Cela met en évidence un point important : la collecte de données est une première étape essentielle, mais elle ne conduit pas automatiquement à un changement. Elle peut néanmoins rendre les enjeux environnementaux plus visibles et ouvrir un espace de discussion, au sein des communautés, pour éventuellement aller plus loin.

⁵ Gloria Rodrigo, M., Ortuño, T., Isela, R., Becerra, C., Choque, R., & Ibañez, C. (2018). Contaminación por metales pesados y su efecto sobre organismos vivos en un gradiente de la cuenca Katari. Universidad Mayor de San Andrés : La Paz, Bolivie [Pollution par les métaux lourds et son effet sur les organismes vivants le long d'un gradient du bassin de Katari. Universidad Mayor de San Andrés : La Paz, Bolivie]

⁶ Agramont Akiyama, A., Peres-Cajías, G., Villafuerte Philippsborn, L., Van Cauwenbergh, N., Craps, M., & Griensven, A. V. (2022). Framing Water Policies: A Transdisciplinary Study of Collaborative Governance ; the Katari River Basin (Bolivia) [Elaboration des politiques de l'eau : une étude transdisciplinaire sur la gouvernance collaborative ; le bassin de la rivière Katari (Bolivie)] Water, 14(22), 3750. <https://doi.org/10.3390/w14223750>.

⁷ NTU désigne l'unité de turbidité néphélométrique utilisée pour mesurer la turbidité d'un fluide.



Des élèves de la communauté indigène de Chojasivi réalisent une analyse de la qualité de l'eau dans leur communauté.
© Afnan Agramont

DES MARAIS QUI PURIFIENT L'EAU

Dans l'ouest du Kenya, à l'extrémité nord-est du lac Victoria, le marais de Yala constitue l'une des plus vastes zones humides d'eau douce du pays et une zone clé pour la biodiversité. Dominé par de grands peuplements de papyrus (*Cyperus papyrus*), il abrite des espèces comme l'antilope sitatunga ainsi que des oiseaux dépendants du papyrus, tels que le gonolek des papyrus et la paruline jaune des papyrus. Le marais sert également de refuge à plusieurs espèces de cichlidés disparues du lac Victoria⁸.

La zone humide piège les sédiments et les polluants de la rivière Yala qui la traverse. La qualité de l'eau est ainsi améliorée avant son rejet dans le lac. Bien que cette fonction de filtration soit largement reconnue, elle a rarement été documentée de manière systématique et à partir d'observations locales.

Pour mieux comprendre ce processus, une initiative de science citoyenne a mobilisé pendant un an des élèves du secondaire à l'entrée et à la sortie du marais. Chaque mois, ils ont collecté des données sur la qualité de l'eau tout au long des quatre saisons, constituant ainsi un suivi continu des transformations de l'eau lors de son passage à travers la zone humide.

Les résultats mettent en évidence le rôle de la zone humide. Quelle que soit la saison, l'eau qui en sortait présentait systématiquement une meilleure qualité qu'à l'entrée. La turbidité – principal indicateur des polluants en suspension – était nettement plus faible en aval tout au long de l'année, soulignant la forte capacité de rétention des sédiments. D'autres paramètres, comme la conductivité électrique, les solides dissous totaux et la salinité, diminuaient également, avec toutefois des variations en fonction des saisons.

Une fois regroupées dans un indice de qualité de l'eau, les données rendent la tendance encore plus claire : l'eau en sortie se situe systématiquement dans la catégorie « bonne », tandis que celle en entrée varie entre « mauvaise » et « passable ». Ainsi, l'eau qui arrive dans le marais n'est plus la même quand elle en ressort.

Pour les élèves participant, l'expérience dépassait les simples chiffres. Comparer l'amont et l'aval leur a permis d'observer concrètement le rôle du marais comme système de filtration naturel. Beaucoup l'ont décrit comme un « purificateur d'eau », étant donnée sa capacité à retenir les débris, à absorber des polluants et à ralentir le flux de l'eau. Ces interprétations correspondant aux tendances mesurées ont renforcé les liens entre observations et expérience sur le terrain.

Dans le même temps, le suivi a mis en évidence une réalité plus complexe. La capacité du marais à réguler la qualité de l'eau n'est pas constante : les précipitations saisonnières et les conditions d'écoulement influencent l'efficacité de rétention des polluants, en particulier des substances dissoutes. À certaines périodes, cette fonction devient donc moins stable et plus difficile à prévoir.

Les données révèlent aussi des pressions croissantes et interdépendantes sur la zone du marais. Parmi les principales menaces, les élèves ont identifié les déchets d'origine humaine, la jacinthe d'eau (une espèce envahissante) et la conversion des terres. Ces observations concordent avec les preuves scientifiques⁹ montrant que la croissance démographique et la demande en terres favorisent l'empiètement agricole dans le marais de Yala. Le brûlage du papyrus pour l'agriculture dégrade les habitats et perturbe la reproduction des poissons, des oiseaux et d'espèces comme le sitatunga. Par ailleurs, les activités humaines, telles que l'usage d'engrais et de produits agrochimiques, l'extraction de sable, la fabrication de briques et la surexploitation du papyrus, contribuent à la pollution, à l'eutrophisation et à une dégradation écologique globale, aggravée par les sécheresses et les inondations.

Ces pressions ne sont pas abstraites : elles compromettent directement le fonctionnement écologique de la zone humide. À mesure que les zones sont asséchées, cultivées ou dégradées, leur capacité à retenir les sédiments, filtrer les polluants, réguler les crues et préserver la biodiversité diminue.

Dans ce cas précis, la surveillance a non seulement mis en évidence un problème, mais aussi montré la valeur d'un écosystème souvent méconnu, et de ce qui pourrait disparaître si les tendances actuelles se poursuivent.

8 Aloo, P. A. (2003). Biological diversity of the Yala Swamp lakes, with special emphasis on fish species composition, in relation to changes in the Lake Victoria Basin (Kenya): threats and conservation measures [Diversité biologique des lacs du marais de Yala, avec un accent particulier sur la composition des espèces de poissons, en lien avec les changements observés dans le bassin du lac Victoria (Kenya) : menaces et mesures de conservation] *Biodiversity & Conservation*, 12(5), 905-920. <https://doi.org/10.1023/A:1022869624524>.

9 Maua, J. O., Mbuvi, M. T. E., Matiku, P., Munguti, S., Mateche, E., & Owili, M. (2022). The difficult choice to conserve the living filters or utilizing the full potential of wetlands: Insights from the Yala swamp, Kenya [Un choix difficile : préserver ces filtres vivants ou exploiter pleinement le potentiel des zones humides ? Le cas du marais de Yala, au Kenya] *Environmental Challenges*, 6, 100427. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100427>.



CONCLUSION

En Bolivie comme au Kenya, on observe la même évolution. Dans les deux cas, la science citoyenne a transformé la surveillance, qui n'est plus un exercice technique et abstrait, mais une pratique ancrée localement. Les communautés n'ont pas seulement été réceptrices des informations : elles ont observé, mesuré et interprété les changements environnementaux à partir de leur propre expérience.

Ce processus a produit plusieurs résultats importants. Des risques environnementaux auparavant difficiles à documenter ont gagné en visibilité. Les habitants ont mieux compris la situation, en reliant les observations à la réalité vécue par leur écosystème. De nouveaux espaces de dialogue ont également émergé, au sein des communautés et entre les groupes partageant les mêmes ressources en eau.

Il est important de noter que ces processus peuvent contribuer à la prise de décision locale. À mesure que les communautés s'approprient les données, elles développent une culture de l'eau, c'est-à-dire la capacité à interpréter et discuter les informations liées à l'eau dans leur quotidien. Cette évolution peut favoriser la réflexion sur les pratiques locales, renforcer le débat collectif et encourager une gestion plus responsable de l'environnement et des écosystèmes.

Parallèlement, ces deux cas mettent en évidence le fait que ces résultats dépendent aussi de l'échelle : si les connaissances produites localement peuvent renforcer la compréhension et l'action au sein des communautés, leur influence a tendance à diminuer quand elles remontent vers des niveaux de gouvernance plus élevés.

En Bolivie, les communautés ont obtenu des preuves plus concrètes de la pollution, mais ont été confrontées à des obstacles majeurs au moment de les traduire en réponses institutionnelles. Au Kenya, la reconnaissance du rôle écologique de la zone humide s'est renforcée, mais son bon fonctionnement a continué à subir la pression de la conversion des terres et de la pollution.

Pris ensemble, ces cas suggèrent que la production de données locales peut renforcer la compréhension et soutenir l'action à l'échelle communautaire, mais qu'elle ne suffit généralement pas, à elle seule, pour influencer les décisions institutionnelles. La science citoyenne peut rendre le changement environnemental plus visible et socialement significatif, mais son impact dépend de son articulation avec les processus décisionnels, les institutions et les cadres de gouvernance. Sans ces liens, même des preuves locales solides risquent de rester marginales dans les instances officielles.

Passer de l'observation à l'action nécessite plus que des données. Cela exige des processus capables de reconnaître, d'intégrer et de prendre en compte les connaissances produites localement à différents niveaux de gouvernance, afin que les observations des communautés puissent mieux éclairer les décisions qui façonnent leur environnement et leur vie.



Des participants effectuent des contrôles de la qualité de l'eau à la sortie de la zone humide, aux côtés d'un habitant de la communauté locale qui prélève de l'eau pour un usage domestique.
© Afnan Agramont

À propos de l'auteur

Afnan Agramont est chercheur en gouvernance de l'eau et de l'environnement au département Eau et Climat de la Vrije Universiteit Brussel (VUB). Ses travaux portent sur l'implication des communautés locales dans les processus décisionnels à différentes échelles, avec une attention particulière pour les populations rurales et autochtones des pays du Sud. Il s'intéresse notamment à la science citoyenne, à l'adaptation participative au changement climatique et à la justice socio-environnementale. Il contribue à des travaux de recherche inter- et transdisciplinaires combinant surveillance environnementale, participation des parties prenantes et approches orientées vers les politiques pertinentes afin de répondre à des défis socio-environnementaux complexes.

L'assurance, un levier stratégique du financement de la restauration de la nature

Aurélie Fallon Saint-Lô

Directrice Durabilité pour l'assurance chez AXA

L'économie et la santé mondiales dépendent étroitement de la santé de nos écosystèmes. Cependant, les investissements dans la restauration de la nature restent nettement inférieurs aux seuils nécessaires pour assurer une nature durable. Le salut ne peut provenir uniquement des mécanismes de financement traditionnels, majoritairement publics, qui demeurent insuffisants. Il faut donc réussir à mobiliser de nouveaux capitaux privés en créant des solutions innovantes qui limitent l'incertitude et le profil de risques. Pour ce faire, AXA, en partenariat avec SCOR, a lancé un produit d'assurance qui prend en charge le coût de la remise en état d'écosystèmes naturels à la suite d'un sinistre, dans le cadre de projets de restauration de la nature. Grâce à un processus rigoureux, fondé sur une *due diligence* approfondie et un réseau international d'experts, les trajectoires de restauration sont sécurisées et fiabilisées, afin d'encourager les investisseurs à financer la restauration de la nature.

Le World Economic Forum nous rappelle qu'environ 50 % de l'économie mondiale dépend directement ou indirectement d'écosystèmes sains¹. Il faut donc non seulement protéger les écosystèmes naturels des pressions anthropiques, mais également les restaurer. L'intérêt accru pour la restauration de la nature se manifeste par un accroissement de la législation et de la réglementation ces dernières années, comme le Cadre mondial pour la biodiversité de Kunming-Montréal adopté en 2022, le Règlement 2024/1991 du Parlement européen et du Conseil du 24 juin 2024 relatif à la restauration de la nature², la législation sur le gain net de biodiversité en Angleterre³, la Loi sur la conservation de la nature au Japon⁴, et la Loi 2173 de 2021 en Colombie : Promotion de la restauration⁵.

Les différentes Conférences des Parties à la Convention des Nations unies sur la diversité biologique à Cali (« COP16 ») et sur le climat à Belém (« COP30 ») ont souligné les défis persistants liés au financement de la restauration et de la conservation de la nature. Le but fixé lors de la COP15 en 2022, à savoir lever 200 milliards de dollars américains par an pour la protection de la biodiversité d'ici 2030, n'a pas été atteint à ce jour et semble peu probable de l'être à l'avenir. Selon le Programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP)⁶,

le financement nécessaire pour la restauration doit quadrupler, et passer de 64 milliards de dollars en 2022 à environ 296 milliards d'ici 2030, pour atteindre les objectifs globaux en matière de biodiversité et de climat.

Les désaccords persistent entre les nations sur la manière dont la restauration et la conservation doivent être financées, et il se peut que les gouvernements ne soient pas en mesure de prendre les engagements économiques nécessaires pour relever ces défis. Des écosystèmes stables et une biodiversité saine sont essentiels pour soutenir l'atténuation du changement climatique, tout en étant cruciaux pour l'adaptation et la résilience face aux impacts physiques d'un climat en mutation, et constituent par ailleurs un fondement déterminant de la santé humaine. Protéger et reconstruire la nature et la biodiversité est plus important que jamais. C'est une nécessité stratégique pour la résilience économique, la souveraineté alimentaire, la santé publique et la sécurité nationale.

FINANCER LA RESTAURATION DE LA NATURE

Afin de protéger la biodiversité, indispensable à notre santé, sont mis en œuvre des projets de restauration de la nature. De tels projets consistent à redonner vie à des écosystèmes dégradés, comme des zones humides, des forêts ou des prairies, afin d'améliorer la qualité des sols, des eaux et accueillir la biodiversité. Ces écosystèmes naturels retrouvent ainsi leur rôle écologique et leurs services écosystémiques. Cela passe par des actions concrètes telles que la renaturation, la désartificialisation des sols, la (re)plantation et l'évolution des pratiques afin d'accroître la résilience des communautés locales face aux aléas climatiques.

1 World Economic Forum (2020) Nature Risk Rising: Why the Crisis Engulfing Nature Matters for Business and the Economy [Les risques liés à la nature s'intensifient : pourquoi la crise qui frappe la nature est-elle importante pour les entreprises et l'économie ?]

2 Regulation - EU - 2024/1991 - EN - EUR-Lex.

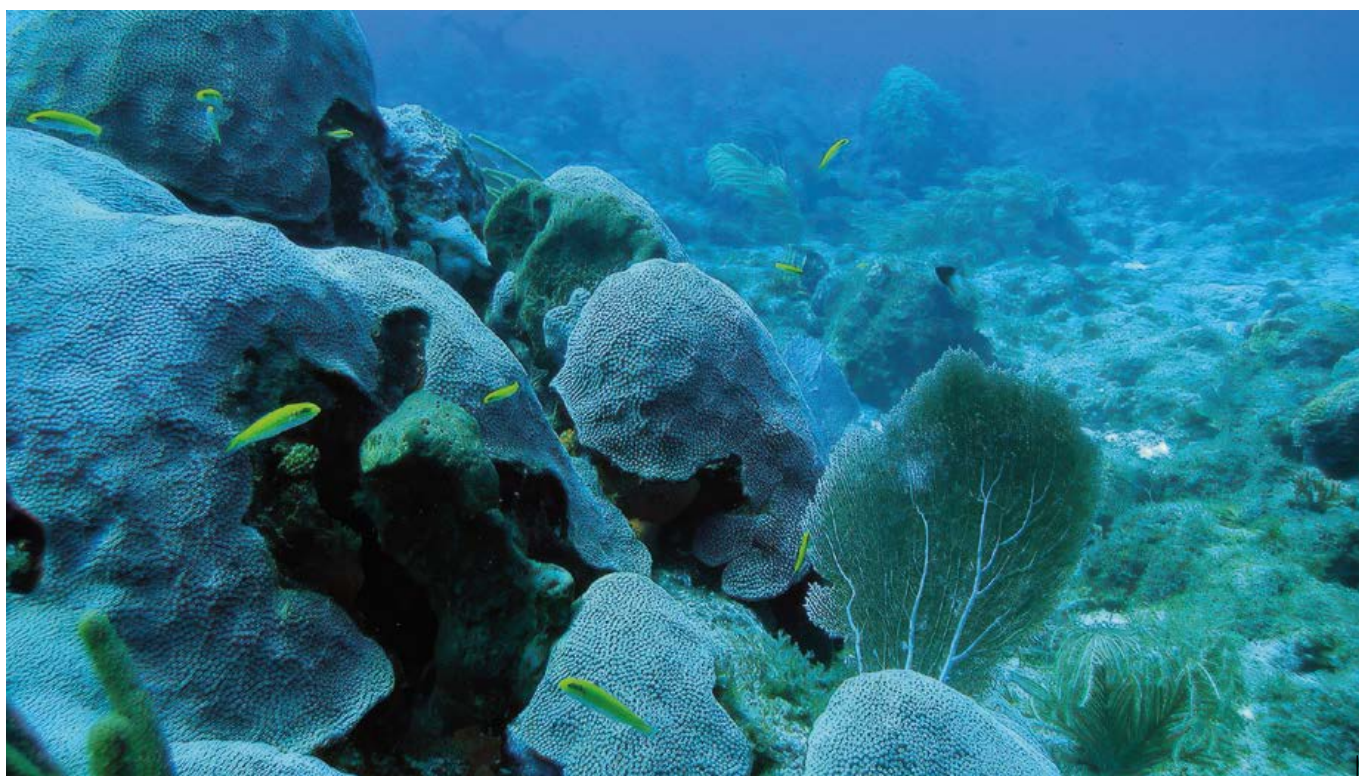
3 Biodiversity net gain - GOV.UK.

4 Direction générale du Trésor (2018) Les politiques japonaises pour la biodiversité.

5 Ley 2173 de 2021 – Restauración Ecológica a través de la siembra de árboles y creación de bosques en el territorio nacional [Loi n° 2173 de 2021 – Restauration écologique par la plantation d'arbres et la création de forêts sur le territoire national].

6 UNEP (2026) State of Finance for Nature 2026 report [Rapport 2026 sur l'Etat de la Finance pour la Nature].





Récifs coralliens⁷.

À titre d'exemple, restaurer une zone humide, comme une mare agricole, une grande tourbière ou un marais alluvial, consiste à rétablir son fonctionnement hydrologique, écologique et biologique, en s'appuyant sur un diagnostic réalisé au préalable sur le régime de l'eau, les sols, la biodiversité, les usages humains, et les causes de la dégradation. Ces dernières peuvent être multiples, comme un drainage, un remblai, une rectification des cours d'eau, de la pollution, des espèces invasives, l'artificialisation des sols, ou encore les aléas climatiques amplifiés par le changement climatique qui en est à la fois une cause et une conséquence. Restaurer les zones humides est crucial notamment afin de restaurer leur rôle d'éponge et de réduire les risques d'inondation.

De tels projets nécessitent des financements conséquents, octroyés par divers acteurs. Les mécanismes traditionnels de financement reposent principalement sur des financements publics^{8,9}. Malgré ce rôle central, les niveaux d'investissement publics restent insuffisants au regard des besoins croissants. Le financement privé de la restauration écologique demeure quant à lui relativement limité, évalué à 27 % des flux totaux. Les autres canaux, tels que le financement d'ONG de conservation, la philanthropie et l'investissement à impact restent marginaux.

Des écosystèmes stables et une biodiversité saine sont essentiels pour soutenir l'atténuation du changement climatique

Ainsi, plus des 2/3 des financements privés transitent par des mécanismes de compensation écologique, qui consistent à compenser les impacts d'un projet (par exemple un projet d'extraction minière) par la restauration ou la protection d'écosystèmes ailleurs⁶. Ce sont principalement les marchés volontaires du carbone, sur lesquels s'échangent les crédits carbone, et les crédits biodiversité qui mobilisent les financements privés.

Tout porteur d'un projet visant à réduire ou capturer des émissions de CO₂ (comme la reforestation) peut émettre un crédit carbone par tonne de CO₂ évitée ou stockée. Ces crédits sont ensuite acquis par des tiers afin de compenser leurs propres émissions, permettant ainsi le financement du projet. Cependant, les controverses passées obligent le marché volontaire du carbone à prouver son intégrité climatique, et générer des co-bénéfices sociaux et environnementaux en s'appuyant sur des cadres et des standards rigoureux. En effet, seule une part très limitée des crédits correspond effectivement à des réductions additionnelles d'émissions¹⁰, et certaines analyses montrent un effet pervers de ces crédits et une intensification des pressions anthropiques dans les zones concernées¹¹.

7 "Coral Reef" publiée par le Service océanographique national de la NOAA, est accompagnée de la mention « Public Domain Mark 1.0 ».

8 UNEP (2024) Growing the Green: How and why restoration finance needs to quadruple by 2030 - State of Finance for Nature - Restoration Finance Report [Growing the Green : Comment et pourquoi le financement de la restauration doit quadrupler d'ici 2030 - État des finances pour la nature - Rapport sur le financement de la restauration]. p.8. Nairobi. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46730>.

9 UNEP (2024) La nature fait son retour : Les Nations unies désignent sept programmes phares de la restauration mondiale.

10 The Guardian (2023) Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows [Une étude révèle que plus de 90 % des crédits carbone liés à la forêt tropicale émis par le plus grand organisme de certification n'ont aucune valeur]. Carbon offsetting.

11 Zhou Z. & Almond D. (2024) Biodiversity Co-Benefits in Carbon Markets? Evidence from Voluntary Offset Projects [Des avantages connexes pour la biodiversité sur les marchés du carbone ? Les enseignements tirés des projets de compensation volontaire], p.15.



Les zones humides du Parc de Gouldsboro¹³.

Quant aux crédits biodiversité, ils financent des actions ayant des impacts positifs sur la biodiversité, par exemple *via* la protection ou la restauration d'écosystèmes. Les acteurs achètent ces crédits pour soutenir des gains écologiques mesurés selon des indicateurs spécifiques, bien qu'ils soient moins standardisés et plus complexes à quantifier que les crédits carbone. Ce marché des crédits biodiversité, qui se limite à 8 millions de dollars annuels, est encore émergent et pourrait, s'il est structuré autour de standards communs rigoureux et soutenu par des politiques favorables, atteindre 2 milliards de dollars annuels en 2030¹².

La mobilisation de capitaux privés est essentielle pour atteindre les montants nécessaires à la restauration de la nature, mais nécessite des garanties solides, offertes notamment par l'assurance. Les projets de restauration de la nature sont en effet exposés à de nombreux risques, tels que des incendies, manque de précipitations ou inondations. En raison de ces risques, les gouvernements, les entreprises, les institutions financières, les ONG et les individus peuvent être réticents à financer des projets liés à la

Ce sont principalement les marchés volontaires du carbone, sur lesquels s'échangent les crédits carbone, et les crédits biodiversité qui mobilisent les financements privés

restauration d'écosystèmes naturels : la nature intrinsèquement imprévisible et la dynamique complexe des écosystèmes et des facteurs qui les impactent peuvent rendre hésitants les investissements. C'est pourquoi des solutions innovantes d'assurance sont indispensables pour rassurer les investisseurs, en garantissant la qualité et la durabilité des projets, tout en les protégeant contre les impacts négatifs.

LA MOBILISATION DU GROUPE AXA POUR LA RESTAURATION DE LA NATURE

Le Groupe AXA, en garantissant la résilience d'écosystèmes côtiers et marins menacés par les événements climatiques extrêmes par son assurance paramétrique élaboré par AXA Climate, a été pionnier dans la protection de ces écosystèmes. Les récifs coralliens sont essentiels pour protéger les littoraux contre l'érosion, préserver la santé des écosystèmes marins et soutenir les moyens de subsistance des communautés

locales. Les programmes d'assurance paramétriques mis en place pour le récif corallien de San Andrés¹⁴, ou pour les aires marines protégées aux Philippines avec « Blue Finance »

¹² WEF (2023) Biodiversity Credits: Demand Analysis and Market Outlook [Crédits biodiversité : analyse de la demande et perspectives du marché], p.37.

¹³ « GboroSP Wetland », par Nicholas, de Pennsylvanie (États-Unis), est sous licence CC BY 2.0.

¹⁴ AXA (2025) A Pioneering Parametric Insurance Programme to Protect the Caribbean's Second-Largest Coral Reef [Un programme d'assurance paramétrique novateur destiné à protéger le deuxième plus grand récif corallien des Caraïbes].



protègent contre les conséquences des cyclones tropicaux qui affectent les communautés dépendantes des ressources naturelles en offrant des paiements rapides et prévisibles. Cependant, l'intensification croissante des événements météorologiques extrêmes exerce une pression sévère sur ces écosystèmes.

En complément de ce dispositif, l'assurance « Restore » lancée en partenariat entre SCOR et AXA en 2026 marque une inflexion notable en ce qu'il vise à sécuriser le financement même des projets de restauration de la nature, en particulier pour des écosystèmes terrestres. Ce produit offre une indemnisation durant la période où les conditions de restauration sont en cours de mise en œuvre conformément au plan de restauration du projet. C'est une étape essentielle dans la chaîne de restauration écologique qui est particulièrement critique car elle détermine la réussite à long terme des projets, qui peuvent durer plusieurs décennies. La phase initiale est souvent la plus risquée en raison de la faible intégrité écologique du site concerné, et doit être menée de façon rigoureuse pour garantir la pérennité du projet.

« Restore » propose ainsi de combler le « gap » entre le besoin et le désir de financement de projets écologiques en dé-risquant ces opportunités. Ainsi, AXA et SCOR mettent à profit expérience et expertise notamment dans la gestion des catastrophes naturelles pour créer des solutions innovantes, afin d'aider à transférer le risque des investisseurs et financeurs. Le produit fonctionne de la manière suivante : après la mise en œuvre d'un projet de restauration, si la trajectoire de restauration initiale du niveau d'intégrité de l'écosystème définie dans le plan de restauration est impactée négativement par un péril assuré prédéfini (tel qu'un tremblement de terre, un incendie ou une inondation), l'assurance indemniserait les coûts financiers liés à la création des conditions de restauration nécessaires pour ramener l'écosystème à sa trajectoire initiale de restauration prévue (ou révisée).

La mobilisation de capitaux privés est essentielle pour atteindre les montants nécessaires à la restauration de la nature, mais nécessite des garanties solides, offertes notamment par l'assurance

La qualité et la durabilité de ces opérations sont garanties par la collaboration avec des experts, notamment ceux de la Society for Ecological Restoration¹⁵, qui assurent une *due diligence* rigoureuse. Ces experts évaluent chaque projet selon plusieurs critères, tels que la diversité des espèces plantées, l'impact social, la planification financière, le respect des écosystèmes de référence, etc. Seuls les projets présentant une forte intégrité environnementale, sociale et économique sont retenus, ce qui permet de minimiser les risques et d'assurer la pérennité de la restauration. La collaboration entre AXA et SCOR, notamment via le partenariat avec Lloyd's, constitue une étape stratégique pour déployer cette approche à l'échelle mondiale. L'expertise, la capacité financière et le réseau mondial permettent de couvrir des projets complexes, souvent de grande envergure, à travers le monde.

Cette assurance accompagne déjà un très large projet de restauration de zones humides terrestres en Louisiane, et la plantation de plus de 2 millions d'arbres indigènes dont des cyprès chauves. Ce projet permettra de réduire les risques liés aux ouragans et aux inondations,

tout en améliorant la qualité de l'eau, en créant de la valeur économique et en augmentant la résilience des communautés locales. Il vise également à séquestrer plus de 900.000 MT CO₂ eq sur une période de 40 ans.

CONCLUSION

Étant donné la nouveauté de cette classe d'actifs et le manque de données historiques, cette assurance joue un rôle clé pour atténuer les risques perçus par les investisseurs, facilitant ainsi l'expansion de solutions financières innovantes dédiées à la biodiversité et à la résilience climatique. Elle concrétise la feuille de route d'AXA en faveur de la biodiversité, en assurant des projets visant à restaurer des écosystèmes dégradés et à renforcer leur résilience face aux impacts climatiques tels que les inondations, les incendies ou la sécheresse. En favorisant l'investissement privé dans la nature, cette approche contribue à la création d'écosystèmes plus sains, capables d'atténuer les risques climatiques tout en préservant la biodiversité.

¹⁵ Society for Ecological Restoration [Société pour la Restauration Ecologique].

À propos de l'auteure

Aurélié Fallon Saint-Lô est la Directrice Durabilité pour l'assurance chez AXA. Elle a suivi des études en sciences de l'environnement, notamment aux Mines de Paris, et dispose de plus de 20 ans d'expérience dans la gestion des risques environnementaux, la conception de solutions d'assurance durables et la promotion des enjeux liés à la biodiversité. Elle a créé et présidé le comité RSE chez AXA XL France et a été nommée aux Trophées de la Femme dans l'Assurance en 2015. Elle a également été conseillère municipale déléguée à l'environnement et au développement durable à Nogent-sur-Marne et elle participe à des groupes de travail au sein du Programme des Nations unies pour l'Environnement (UNEP) – principes pour l'assurance durable.



CONCLUSION

Biodiversité et santé humaine : Réconcilier les systèmes pour transformer l'action

Cédric Baecher - Partner chez Wavestone



À mesure que se précise notre compréhension des liens entre biodiversité et santé, une évidence s'impose : ces deux dimensions ne peuvent plus être pensées séparément. Les contributions réunies dans cette édition de FACTS Reports montrent avec force que la biodiversité ne constitue pas seulement un cadre environnemental de la santé humaine, mais bien une "infrastructure" vitale,

qui conditionne directement notre alimentation, nos équilibres biologiques, nos capacités d'innovation médicale et, plus largement, la résilience de nos sociétés.

Des sols agricoles aux microbiotes humains, des dynamiques zoonotiques aux ressources thérapeutiques issues du vivant, c'est un même continuum qui se dessine, rappelant que toute altération du vivant se traduit, tôt ou tard, par une altération de la santé humaine.

Les chiffres sont à cet égard sans équivoque. Près de 35 % de la production agricole mondiale dépend des pollinisateurs¹, tandis qu'une part significative des maladies infectieuses émergentes trouve son origine dans les interactions entre humains, animaux et écosystèmes dégradés. Parallèlement, nous ne connaissons encore qu'une fraction – environ 10 % – des espèces existantes, alors même que leur déclin s'accélère. Ces ordres de grandeur soulignent une réalité simple : notre santé repose sur une biodiversité que nous comprenons encore imparfaitement, et que nous fragilisons rapidement.

Face à ces constats, la grande leçon de cette publication est sans ambiguïté : les approches fragmentées ont atteint leurs limites. Agir séparément sur le climat, la biodiversité, la santé ou l'alimentation conduit mécaniquement à des arbitrages inefficaces, voire contre-productifs. À l'inverse, les travaux ici présentés, qu'ils portent sur les systèmes alimentaires, le microbiote, les maladies émergentes ou le biomimétisme, convergent vers la nécessité d'une pensée systémique, capable de relier les écosystèmes naturels, les systèmes économiques et les dynamiques sanitaires.

Cette approche intégrée, au cœur du cadre *One Health*, n'est plus une option conceptuelle mais une condition d'efficacité. Elle invite à changer de regard : il ne s'agit plus seulement de limiter des impacts, mais de reconstruire des équilibres fonctionnels entre les systèmes du vivant et les systèmes humains.

Cette transformation se joue désormais à un niveau stratégique. En janvier 2026, le Gouvernement britannique a ainsi explicitement qualifié la perte de biodiversité et l'effondrement des écosystèmes de menace directe pour la sécurité nationale, en raison de leurs impacts potentiels sur la santé publique, les chaînes d'approvisionnement, l'accès aux ressources vitales et les dynamiques géopolitiques². Ce signal est majeur : il consacre un basculement dans la façon dont les États appréhendent ces enjeux, qui ne relèvent plus uniquement de l'environnement, mais bien de la résilience systémique des sociétés.

Cela dit, penser en systèmes ne suffit pas : encore faut-il agir en alliances. La diversité des contributions de cette revue illustre une autre nécessité structurante : décroiser les acteurs, croiser les expertises et organiser une véritable circulation des connaissances entre recherche fondamentale, recherche appliquée, entreprises, institutions et société civile.

Les avancées les plus prometteuses, qu'il s'agisse de l'agroécologie, de la médecine microbienne, de la surveillance éco-épidémiologique ou du biomimétisme, reposent toutes sur cette capacité à connecter des mondes qui, trop souvent, travaillent encore en silos. C'est dans ces zones d'interface que se créent les ruptures décisives, et que peut émerger une intelligence collective capable de traiter la complexité du vivant.

Dans ce contexte, l'intelligence artificielle apparaît comme un levier déterminant, à la fois accélérateur de défis et de solutions. D'un côté, elle exerce des pressions environnementales croissantes, notamment via ses besoins élevés en ressources (eau, énergie, surface de sols) et en infrastructure. De l'autre, elle offre des capacités inédites pour appréhender l'extraordinaire complexité des interactions entre biodiversité et santé.

¹ AO Home | Global Action on Pollination Services for Sustainable Agriculture [Action globale sur les Services de Pollinisation pour une Agriculture Durable]. <https://www.fao.org/pollination/fr>.

² HM Government (2026) National security assessment - global biodiversity loss ecosystem collapse and national security [Gouvernement de Sa Majesté - Évaluation de la sécurité nationale : perte mondiale de biodiversité, effondrement des écosystèmes et sécurité nationale], p.6. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/696e0eae719d837d69afc7de/National_security_assessment_-_global_biodiversity_loss__ecosystem_collapse_and_national_security.pdf.



En permettant de traiter des volumes massifs de données, issus de la génomique, de la surveillance environnementale ou de la recherche clinique, l'IA ouvre la voie à une compréhension plus fine des dynamiques écologiques et sanitaires, ainsi qu'au développement de solutions mieux ciblées et plus efficaces. À condition d'être orientée de manière éthique et responsable, l'IA peut ainsi devenir un outil clé de convergence entre connaissance scientifique et action opérationnelle.

Cette dynamique appelle également à un pragmatisme renouvelé. Contrairement à une idée reçue, les solutions existent déjà en grande partie : restauration des écosystèmes, transformation des pratiques agricoles, intégration de la biodiversité dans les politiques de santé, innovations inspirées du vivant, ou encore dispositifs de prévention fondés sur la compréhension des interactions écologiques.

Mais leur impact demeure limité par la difficulté du passage à l'échelle, qui suppose d'articuler plus efficacement recherche, innovation et modèles économiques, afin de transformer des initiatives souvent locales en trajectoires véritablement systémiques. Le passage à l'échelle implique aussi d'aligner les incitations économiques et les cadres réglementaires avec les objectifs de santé et de préservation du vivant, condition indispensable pour dépasser les logiques de court terme.

Au-delà des solutions techniques et scientifiques, cette publication met enfin en lumière une évolution plus profonde : un changement de récit. En replaçant la santé au cœur des enjeux de biodiversité, elle propose un langage commun, capable de mobiliser bien au-delà des cercles experts. Car ce qui est en jeu n'est pas uniquement la préservation

Près de 35 % de la production agricole mondiale dépend des pollinisateurs, tandis qu'une part significative des maladies infectieuses émergentes trouve son origine dans les interactions entre humains, animaux et écosystèmes dégradés

d'écosystèmes, mais la capacité de nos sociétés à garantir des conditions de vie soutenables, sûres et équitables. La biodiversité, qu'elle soit visible ou invisible, spectaculaire ou ordinaire, constitue le socle de cette ambition. Elle est à la fois une assurance, une ressource et une source d'innovation.

En définitive, la valeur ajoutée de cette édition de FACTS Reports réside dans sa capacité à relier, structurer et projeter. Relier des disciplines, des acteurs et des échelles d'action. Structurer une compréhension systémique des liens entre biodiversité et santé. Projeter enfin des voies d'action crédibles, fondées sur la coopération, la connaissance et l'expérimentation.

Dans un contexte marqué par des incertitudes croissantes, cette approche offre un point d'appui essentiel : elle montre que l'enjeu n'est pas seulement de limiter les risques, mais de réinventer des modèles de développement qui fassent du vivant un levier central de la santé et du bien-être de tous.

La responsabilité est désormais collective. Aux chercheurs de poursuivre l'exploration des interdépendances du vivant. Aux entreprises d'intégrer ces enjeux au cœur de leurs stratégies. Aux acteurs publics de créer les conditions du passage à l'échelle. Et, plus largement, à chacun d'entre nous de contribuer à cette transformation et à la nécessaire conduite du changement.

Car au fond, comme l'expriment fortement les travaux réunis ici, protéger la biodiversité n'est pas seulement une question environnementale : c'est bel et bien une condition de notre survie présente et future.



© Marwane El-Alioui



***“ Nous sommes liés à la biodiversité,
autant physiquement que mentalement.
Elle influence notre bien-être de différentes
manières, notamment par l’abondance,
la variété et la qualité de notre alimentation,
le fonctionnement de notre système immunitaire
ou les médicaments que nous prenons. ”***

Harvey V. Fineberg

Professeur émérite en politique et gestion de la santé à la Harvard T.H. Chan School of Public Health,
Membre du Comité de prospective de l’Institut Veolia

Rédacteur en chef : Nicolas Renard, Directeur Exécutif, Institut Veolia

Directrice de la publication : Dinah Louda, Présidente, Institut Veolia

Organisme émetteur :

Field Actions Science Reports (FACTS) est publié par l'Institut Veolia. EISSN: 1867-8521

Contact :

institut.ve@veolia.com

© AUTEUR(S) :

Les auteurs conservent la titularité des droits d'auteur mais autorisent le public à copier, distribuer, transmettre et adapter leurs travaux à condition que leur nom soit cité comme il se doit.

Conception : Studio graphique Veolia / Increa by Printvallée

Réalisation : Increa by Printvallée

Imprimé en France

avec des encres à base végétale par un prestataire labellisé Imprim'vert sur du papier traité sans chlore, certifié FSC, produit issu de forêts bien gérées et d'autres sources maîtrisées.

Crédits photos :

Photothèque Veolia, Shutterstock, iStock, X, différents crédits mentionnés dans les légendes des visuels, DR, photo de première de couverture : © Wu Yinghui. Certaines photos (dont la couverture) sont issues de concours photos réalisés auprès des salariés Veolia.



Fonds pour le
Progrès humain

sanofi



En partenariat avec **WAVESTONE**

Institut Veolia

30, rue Madeleine Vionnet • 93300 Aubervilliers, France

www.institut.veolia.org