



 dossier de
PRESSE

INRAE

**La biodiversité au cœur des recherches
d'INRAE: des diagnostics aux solutions**



SOMMAIRE

01

Etat des lieux de la biodiversité
et des milieux naturels
p.6/13

02

La biodiversité :
source de solutions
p.14/22

03

De la connaissance à l'action
et à la gestion durable des milieux
p.23/33

04

Les moyens d'INRAE
au service des recherches
sur et pour la biodiversité
p.34/38



Glossaire

p.39

Contacts scientifiques

p.40/41

EDITORIAL

La biodiversité au cœur des recherches d'INRAE : des diagnostics aux solutions

La biodiversité actuelle, qui regroupe la diversité du vivant au niveau génétique, des espèces et des écosystèmes est le fruit de l'évolution. Dans un contexte croissant de chocs et de crises, elle est essentielle à la résilience des écosystèmes, à la sécurité alimentaire et à la santé. C'est un patrimoine précieux et un bien commun qu'il faut préserver et restaurer, pour elle-même mais aussi pour les services écosystémiques, c'est-à-dire les bénéfices retirés par l'être humain des ressources naturelles produites par les écosystèmes, qu'elle soutient. Cela n'interdit pas d'utiliser les ressources qu'elle offre, mais cela doit se faire de manière durable.

Or, de nombreux éléments essentiels de cette biodiversité sont en déclin. Cette érosion, qui s'apparente dans certains cas à un effondrement, découle d'une intensification et d'une multiplication de pressions notamment associées aux activités humaines et dont l'impact est parfois aggravé par le changement climatique.

Dans ce contexte d'évolution rapide des conditions environnementales, les recherches d'INRAE concernent de nombreux milieux (agroécosystèmes, forêts, lacs et cours d'eau, montagnes, etc.), aussi bien en métropole que dans les territoires ultramarins. Il s'agit de décrire la biodiversité et sa dynamique à différentes échelles spatiales et temporelles. Les chercheurs s'attachent aussi à acquérir des connaissances sur les multiples mécanismes qui relient biodiversité, processus écologiques et services écosystémiques.

Les enjeux portent également sur les différentes manières de mobiliser les connaissances pour proposer des solutions en vue de stopper l'érosion de la biodiversité et favoriser sa restauration. Les domaines d'application sont multiples : développement de l'agroécologie pour des systèmes de production moins dépendants des intrants, plus durables et plus résilients face au changement climatique, restauration de la continuité écologique dans tous les types d'habitats, adaptation des écosystèmes, notamment forestiers, au changement climatique, lutte contre les espèces exotiques envahissantes, etc.

Il s'agit aussi de travailler, avec les acteurs des territoires, à la conception et au déploiement de solutions fondées sur la nature. Des actions qui visent à protéger,



gérer de manière durable et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés pour relever des défis sociétaux, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité. Dans une logique d'accompagnement des transitions, INRAE vient de lancer le métaprogramme BIOSEFAIR dont l'un des objectifs est de produire des connaissances pour mieux gérer les territoires afin à la fois d'améliorer les fonctions et services écosystémiques et de préserver et restaurer la biodiversité.

Les problématiques relatives à la biodiversité n'ont pas de frontières et l'action internationale dans ce domaine est indispensable, notamment en lien avec l'agenda 2030 de l'ONU et la Convention sur la Diversité Biologique. C'est pourquoi INRAE a mis en place des Projets Prioritaires Internationaux (PPI) afin de lancer et piloter des programmes de grande envergure pour s'allier à des partenaires européens et internationaux, notamment sur les maladies infectieuses émergentes, la protection agroécologique des cultures ou l'adaptation des forêts et des agro-forêts au changement climatique.

Membre fondateur de l'Alliance des Sciences de l'Environnement (AllEnvi) et de la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB), INRAE collabore sur ces sujets avec de nombreux partenaires du monde académique. L'institut fait également partie de réseaux européens, dont les réseaux PEER et ALTER-Net. Ses experts contribuent aux travaux d'organisations internationales dont l'IUFRO ou l'IPBES. Enfin, depuis 2020 INRAE est membre de l'UICN.

Les recherches s'appuient sur la mobilisation de nombreux outils d'observation et d'expérimentation, notamment les unités expérimentales d'INRAE et diverses infrastructures de recherche. Elles permettent de mener des travaux de recherche et d'expertise avec des acteurs et porteurs d'enjeux variés : agriculteurs, forestiers, gestionnaires d'espaces protégés, Office Français de la Biodiversité, ministères, etc.

Enfin, la biodiversité est un sujet de choix de dialogue sciences-société, à travers notamment le développement des recherches participatives.

IUFRO : *International Union of Forest Research Organizations*
UICN : *Union Internationale pour la Conservation de la Nature*
IPBES : *The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*
PEER : *Partnership for European Environmental Research*
Alter-Net : *A Long-Term Biodiversity, Ecosystem and Awareness Research Network*



01.



Etat des lieux de la biodiversité et des milieux naturels

Les changements globaux ont un impact immense sur la biodiversité qui s'érode voire s'effondre dans tous les milieux. Elle est pourtant une alliée indispensable des activités humaines, qu'il s'agisse par exemple de l'agriculture ou de la santé, et un atout pour la gestion durable des territoires. Les recherches d'INRAE visent à comprendre le fonctionnement des milieux naturels et leur évolution pour proposer des solutions pour la protection et la restauration de la biodiversité, pour elle-même mais aussi pour les services écosystémiques qu'elle sous-tend, bénéfiques retirés par l'humain des ressources naturelles produites par les écosystèmes.



Les impacts des changements globaux sur la biodiversité

Partout où se porte leur regard, des plaines agricoles aux forêts, des lacs aux rivières, des montagnes au littoral, les chercheurs observent une érosion de la biodiversité, résultant notamment des changements globaux. Loin de baisser les bras, ils s'attachent à mesurer l'impact de ces bouleversements, et proposent des solutions, souvent originales, pour y remédier. Une tâche immense tant nous manquons encore de connaissances sur les mécanismes qui régissent la dynamique de la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que sur les interactions nombreuses et complexes entre les espèces qu'ils abritent.

Coup de pouce à la résilience

Les forêts vont souffrir du changement climatique. Il est donc urgent de les préparer aux conditions futures, de manière à minimiser les impacts négatifs. C'est dans cette optique qu'a été mené, de 2017 à 2020, le projet européen REFORCE. Son objectif : évaluer les mécanismes de résistance des forêts aux aléas climatiques, et leur capacité à récupérer après une perturbation, afin d'identifier des méthodes de gestion susceptibles d'améliorer la résilience des forêts face aux perturbations liées au changement climatique. Pour rendre les résultats encore plus pertinents, les scientifiques ont rencontré les gestionnaires de forêts publiques et privées des Alpes françaises. Il s'agissait de comprendre les stratégies d'adaptation des acteurs pour conserver les niveaux de production et de services des forêts face aux conséquences du changement climatique. Un constat : les gestionnaires expérimentent déjà de nouvelles pratiques. Augmentation de l'hétérogénéité des peuplements, notamment avec l'introduction de feuillus ; éclaircissement des parcelles ; plantation d'espèces plus résistantes aux sécheresses... autant d'initiatives qui visent à améliorer la capacité de récupération après des perturbations, ou à limiter leur impact. Mais en raison du manque d'informations scientifiques, les forestiers peinent à évaluer la pertinence de ces mesures. Dans ce cadre, les scientifiques ont notamment expérimenté une approche novatrice consistant à exploiter des images satellites à moyenne résolution (500 m par pixel) enregistrées quotidiennement au cours des quinze dernières années. Ils ont calculé un indicateur de résilience à partir des variations de verdissement du couvert forestier, une faible variation étant associée à une forte résilience de la forêt. Ils ont ainsi pu établir des cartes à l'échelle européenne disponibles en ligne [<https://www.zdravgozd.si/projekti/reforce/>]. A l'avenir, les chercheurs espèrent pouvoir établir des liens entre les indicateurs de résilience, calculés à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale (de l'ordre du mètre voire moins), et la composition ou la structure des forêts, pour mieux guider leur gestion. Cela permettra d'accompagner les gestionnaires forestiers dans leurs démarches de changement de pratiques qui les engagent pour des dizaines d'années.



Mobilité des animaux : il faut montrer patte blanche !

Rétablir la continuité des cours d'eau en supprimant les retenues artificielles, restaurer ou conserver des habitats naturels et semi-naturels pour établir des corridors écologiques terrestres reliant les réservoirs de biodiversité, ces actions vont dans le bon sens. Elles facilitent notamment les déplacements essentiels au cycle de vie de nombreuses espèces. Mais la restauration de ces connectivités écologiques peut aussi favoriser le mouvement d'espèces ayant un impact négatif sur les écosystèmes. Voici deux exemples qui illustrent les actions menées sur le front de la connectivité écologique.

Sur les traces de la grenouille rousse

Les zones humides* sont en régression partout sur le territoire, et notamment sur les domaines skiables alpins. Pour comprendre les conséquences sur la biodiversité, des chercheurs ont suivi une espèce commune de ces milieux, la grenouille rousse. Ils ont équipé plusieurs dizaines de ces batraciens de balises GPS, afin de suivre leurs déplacements pendant la période estivale. Ainsi, ces animaux préfèrent séjourner dans les zones humides ou les cours d'eau plutôt que sur les pelouses et tendent à fuir les pistes de ski. Les scientifiques ont ensuite fait une analyse génétique de grenouilles prélevées dans différentes zones humides, pour identifier leur population d'origine et analyser l'aptitude des individus à se déplacer entre les milieux. Les analyses montrent qu'au-delà de 430 m, la distance à franchir entre deux zones humides devient trop importante pour les grenouilles. L'outil développé pour l'occasion, adaptable à d'autres espèces, permettra d'accompagner les acteurs engagés dans la restauration des continuités écologiques terrestres et aquatiques.



Campagne de suivi de la grenouille rousse sur le domaine skiable des Arcs (Savoie).



Zones humides : milieux habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire.



Capture d'une écrevisse du Pacifique (*Pacifastacus leniusculus*), une espèce exotique envahissante. © Jean-Marc Paillisson CNRS

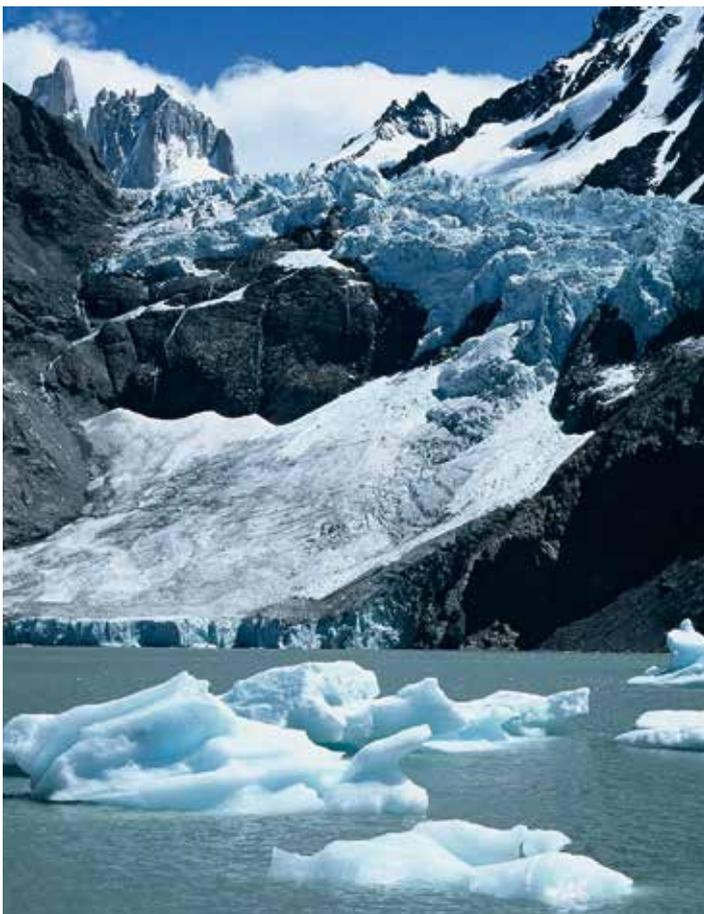
Barrage pour les écrevisses exotiques

Les écrevisses exotiques envahissantes colonisent de nouveaux territoires, menaçant certaines des espèces qui s'y trouvent, et notamment une espèce autochtone, l'écrevisse à pattes blanches. Or, cette dispersion active peut être facilitée par la restauration de la continuité d'un cours d'eau. Pour cette raison, les chercheurs s'efforcent de mesurer les conséquences de telles actions pour la biodiversité, et proposent des solutions pour limiter les impacts négatifs, par exemple des barrages sélectifs permettant de retarder localement le contact entre l'espèce envahissante et l'espèce autochtone. Mais ne nous y trompons pas, c'est la dispersion passive, essentiellement anthropique, qui constitue la cause majeure de la dissémination de ces espèces invasives. Les écrevisses peuvent notamment être introduites volontairement (et illégalement) dans les cours d'eau par des pêcheurs, ou transportées fortuitement, par exemple dans l'eau des carpes d'élevage réapprovisionnant les plans d'eau.



Les temps sont durs pour les abeilles domestiques

Depuis une quinzaine d'années, les colonies d'abeilles domestiques connaissent des taux de mortalité anormalement élevés. On estime que 25% des colonies ne survivent pas à l'hiver, alors que ce chiffre ne devrait être que de 10%. Trois causes majeures expliquent cette hécatombe. Les pesticides d'abord, dont les équipes d'INRAE ont déjà démontré les effets délétères. Les maladies et prédateurs ensuite, venus parfois de contrées lointaines. Enfin, l'agriculture intensive et le bouleversement des paysages. La disparition des habitats semi-naturels aux abords des parcelles, tels que les sous-bois ou les haies, réduit considérablement les ressources florales indispensables aux pollinisateurs. Une des solutions envisagées consiste à installer des bandes fleuries, que les insectes peuvent visiter en automne, afin de constituer les réserves alimentaires hivernales pour la colonie. Et cela fonctionne, comme l'ont constaté les chercheurs d'INRAE qui ont mesuré l'état de santé des abeilles fréquentant ces espaces et l'ont comparé à celles qui n'en profitaient pas. Toutefois, ces bandes, malgré leur utilité, offrent moins de biodiversité, et donc de ressources, que les habitats semi-naturels. Qu'en est-il de l'effet des pesticides sur la santé de la ruche ? Là encore, les scientifiques se sont attelés à une tâche complexe : évaluer l'impact de mélanges de pesticides sur les colonies, en conditions réelles. Après avoir contaminé des centaines d'abeilles et les avoir marquées, ils ont mesuré leur activité, leurs performances de vol et l'incidence des polluants sur les colonies. Les observations montrent que les insectes exposés à ces cocktails de pesticides collectent moins de pollen. Ces données alimentent des modèles de développement des colonies. Les simulations montrent que le comportement des abeilles contaminées entraîne une diminution de la production des larves, susceptible de causer une mortalité importante, voire un effondrement de la colonie. Des études sur le terrain sont désormais nécessaires pour confirmer ces résultats.



Coup de chaud sur la glace

Les abords immédiats des glaciers sont des territoires hostiles. Pourtant, certaines espèces s'accommodent de ces conditions extrêmes. Il s'agit principalement d'algues, de microorganismes et d'invertébrés adaptés aux eaux froides, turbides et sujettes à de nombreuses perturbations, telles que les crues ou mouvements des glaces. Mais avec le changement climatique, les glaciers reculent ou disparaissent partout dans le monde. Dans ces conditions, quel avenir y a-t-il pour ces organismes certes résistants mais peu compétitifs* ? Pour l'appréhender, une équipe de chercheurs s'est livrée à une étude des résultats de 234 publications (une méta-analyse) traitant de la biodiversité présente dans les fjords et dans les eaux douces et marges proglaciaires*, en aval immédiat de glaciers du monde entier. Au total, plus de 2 100 observations ont été analysées, permettant aux scientifiques d'évaluer l'impact de la fonte des glaciers sur les organismes et, plus largement, de mesurer les conséquences de leur disparition en termes de biodiversité. L'étude montre que le recul d'un glacier entraîne une colonisation progressive des lieux par des espèces qui s'en tenaient jusqu'alors éloignées. En revanche, de 6 à 11% des espèces étudiées, parmi les plus spécialisées, pourraient pâtir de cette situation nouvelle, soit parce que le milieu deviendrait inadapté, soit parce qu'elles ne résisteraient pas à la pression compétitive exercée par les nouveaux arrivants. Or, cette perte de biodiversité ne semble pas être compensée car les observations montrent que ce sont globalement des espèces généralistes qui s'installent lorsque les glaciers se retirent. Pour acquérir de nouvelles

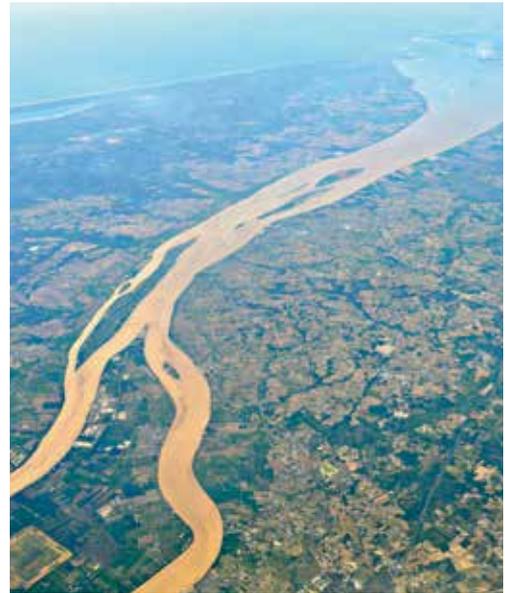
données sur le sujet, les chercheurs vont maintenant mesurer les effets de la disparition des glaciers sur les plantes, les algues et les invertébrés (terrestres et aquatiques), en réalisant notamment un suivi régulier d'un glacier de la Cordillère des Andes et d'un glacier alpin voués à disparaître d'ici quelques années.

* **Compétitivité d'une espèce**: capacité d'une espèce à acquérir et utiliser efficacement une ressource limitée, sa résistance face à une diminution de cette ressource, mais aussi sa capacité à réduire la disponibilité de la ressource pour ses voisins.

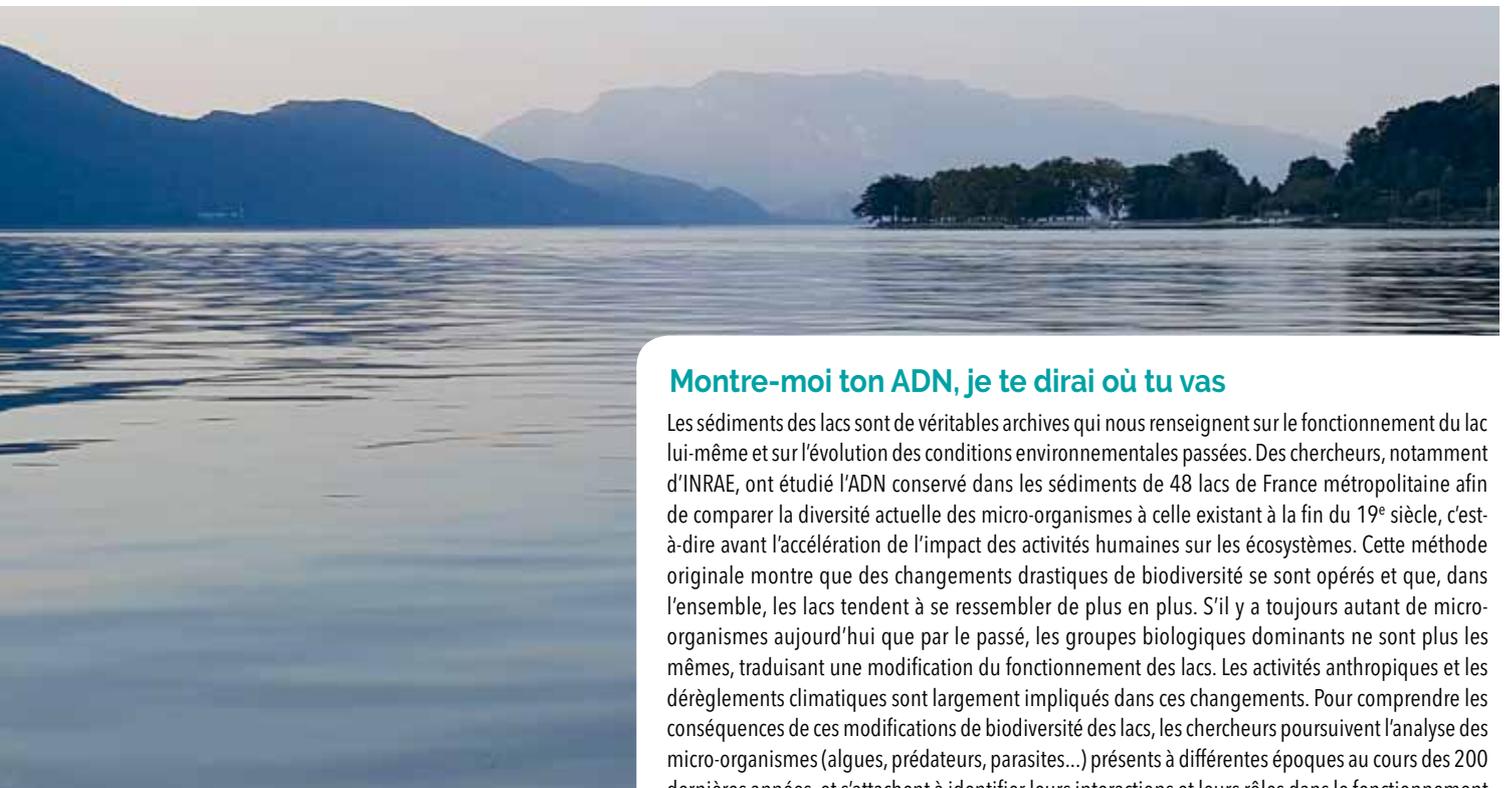
Marges proglaciaires: zones de transition entre le glacier et la région déglacée située à l'extrémité aval du glacier.

Péril dans l'estuaire

Les estuaires comptent parmi les environnements les plus anthropisés. Pour favoriser le passage des bateaux jusqu'aux grands ports de Rouen, Le Havre, Nantes, Bordeaux, mais aussi Londres ou Amsterdam, de gigantesques travaux ont été entrepris au cours des derniers siècles. Aménagements des berges et dragages successifs ont largement impacté le milieu et donc la biodiversité. Et pourtant, les espèces d'eau de mer et d'eau douce y sont nombreuses, de même que les poissons migrateurs amphihalins*. Ces écosystèmes sont robustes, mais seulement jusqu'à un certain point. Les études récentes montrent que le changement climatique, associé à une pression anthropique toujours forte (aménagement, contaminants chimiques...), les fragilise grandement. Ainsi, la montée des eaux et la diminution des débits fluviaux provoquent une « marinisation » des estuaires. L'eau de mer qui entre toujours plus loin dans les terres provoque une régression des espèces d'eau douce. Les chercheurs s'attachent depuis des années à évaluer la biodiversité des estuaires, et à la relier aux pressions climatiques et anthropiques, avec trois objectifs. Le premier consiste à mesurer précisément la gravité de la situation ; ensuite, il s'agit de développer des modèles capables de prédire l'évolution à moyen et long terme de cette biodiversité, en fonction de différents scénarios de gestion des estuaires. Enfin, le troisième objectif vise à proposer des solutions allant dans le sens d'une amélioration de l'état écologique, en tenant compte des contraintes socio-économiques. Déjà, des solutions se profilent comme par exemple la restauration des habitats latéraux, vasières, marais ou roselières, qui, comme on a pu le voir récemment dans l'estuaire de la Gironde, constituent de précieux réservoirs de biodiversité. Certains ports français, Rouen et Le Havre notamment, collaborent activement avec les chercheurs, pour développer ces outils de simulation.



Poissons amphihalins : espèces de poissons, telles que le saumon, l'anguille ou l'alose, qui migrent de l'eau de mer à l'eau douce, ou/et inversement au cours de leur cycle biologique.



Montre-moi ton ADN, je te dirai où tu vas

Les sédiments des lacs sont de véritables archives qui nous renseignent sur le fonctionnement du lac lui-même et sur l'évolution des conditions environnementales passées. Des chercheurs, notamment d'INRAE, ont étudié l'ADN conservé dans les sédiments de 48 lacs de France métropolitaine afin de comparer la diversité actuelle des micro-organismes à celle existant à la fin du 19^e siècle, c'est-à-dire avant l'accélération de l'impact des activités humaines sur les écosystèmes. Cette méthode originale montre que des changements drastiques de biodiversité se sont opérés et que, dans l'ensemble, les lacs tendent à se ressembler de plus en plus. S'il y a toujours autant de micro-organismes aujourd'hui que par le passé, les groupes biologiques dominants ne sont plus les mêmes, traduisant une modification du fonctionnement des lacs. Les activités anthropiques et les dérèglements climatiques sont largement impliqués dans ces changements. Pour comprendre les conséquences de ces modifications de biodiversité des lacs, les chercheurs poursuivent l'analyse des micro-organismes (algues, prédateurs, parasites...) présents à différentes époques au cours des 200 dernières années, et s'attachent à identifier leurs interactions et leurs rôles dans le fonctionnement des écosystèmes. En parallèle, ils développent des modèles, notamment thermiques ou d'apports en nutriments, qui permettront de tester différents scénarios prédictifs. De même, ils s'attachent à mesurer l'impact des changements des communautés de micro-organismes dans la séquestration du carbone. En effet, les lacs peuvent constituer des puits de carbone non négligeables, mais le rôle de la biodiversité dans ce processus est encore peu pris en compte.

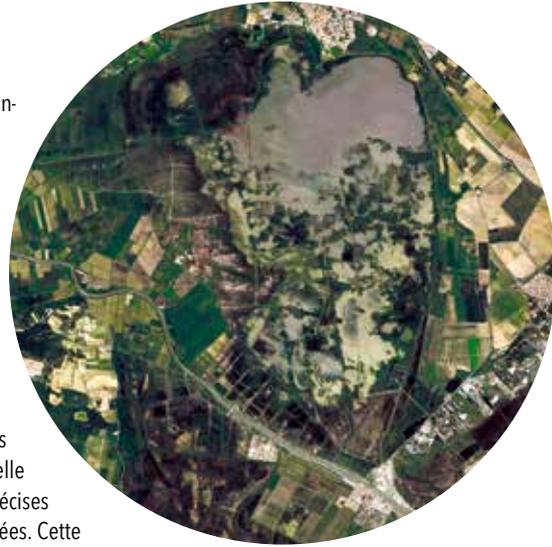


Explorer la biodiversité et sa dynamique

Les travaux des scientifiques le confirment : les caractéristiques du paysage influencent considérablement la biodiversité, qui elle-même impacte favorablement les résultats des activités humaines. Et cette influence peut être améliorée grâce à une gestion plus collective du territoire. Pour autant, il ne s'agit pas d'instrumentaliser la biodiversité, mais de la protéger. D'abord pour ce qu'elle est, ensuite pour les services qu'elle peut apporter, aussi bien pour la production de biens qui nous sont nécessaires, que pour notre bien-être.

La biodiversité vue du ciel

Depuis la Convention sur la diversité biologique de 1992 et le Grenelle de l'environnement de 2007, la surveillance de la biodiversité constitue une priorité. Les chercheurs d'INRAE collectent depuis une trentaine d'années des données de télédétection qui, dans ce contexte, apparaissent plus que jamais cruciales. Provenant des dispositifs satellites ou aéroportés, elles fournissent une image instantanée d'un milieu et permettent de suivre son évolution dans le temps. Les données optiques renseignent sur l'état de conservation, mettent en lumière une dégradation éventuelle ou identifient les zones à protéger en priorité. Les radars et lidars* affinent ces observations, en fournissant des informations plus précises sur la hauteur et la densité du couvert végétal. Autant de données précieuses pour mesurer l'impact du changement climatique, mais aussi de l'artificialisation des sols ou de toute autre activité humaine. Mais la télédétection n'a de sens que si elle implique les acteurs de terrain, seuls à même de fournir des informations précises sur le milieu, indispensables pour valider la cohérence des données collectées. Cette collaboration est tout aussi utile pour établir et affiner les modèles et scénarios d'évolution des conditions environnementales, à moyen et long terme. Enfin, elle s'avère essentielle pour mettre en place des actions concertées visant à sauvegarder ou restaurer de biodiversité. Les données collectées par INRAE alimentent notamment la plateforme Geosud qui vise à mettre à disposition de la communauté scientifique et des acteurs publics des cartes d'évolution des écosystèmes et des territoires pour éclairer les décisions de gestion.



Zone de l'étang de Vendre et fleuve de l'Aude (Hérault).
Données satellitaires Copernicus Sentinel 2.

* **Lidars** : dispositif de mesure à distance fondé sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière laser renvoyé vers son émetteur.



Le fleuve n'a pas une longue vie tranquille

Lorsque l'on pense à un cours d'eau, on l'imagine serpentant continuellement depuis sa source jusqu'à la mer ou l'océan. Or, les chercheurs estiment aujourd'hui que plus de la moitié des cours d'eau du globe subiraient des assèchements importants au cours d'une année. Cela concernerait plus d'un tiers des cours d'eau en France métropolitaine. Pourtant, cela ne fait que dix ans qu'on s'intéresse à ces cours d'eau intermittents. Si ce phénomène d'assèchement peut être naturel, par exemple lorsque l'alimentation du cours d'eau dépend du dégel d'un glacier ou de la perméabilité du terrain, il est de plus en plus fréquemment une conséquence des changements globaux. Le réchauffement climatique et les activités humaines assèchent des cours d'eau jusqu'alors préservés, avec des conséquences sur la biodiversité qu'ils hébergent, nouvellement confrontée à ce phénomène. C'est pourquoi les chercheurs s'efforcent de caractériser la biodiversité de ces systèmes, afin de produire des modèles destinés à prévoir son devenir dans les cours d'eau qui s'assèchent aujourd'hui. Quelles espèces pourraient disparaître, quelles autres pourraient coloniser ces nouveaux espaces, et avec quelles conséquences ? Des connaissances qui seront mobilisées pour la création d'outils à destination des gestionnaires, pour les accompagner dans la protection ou la restauration des cours d'eau menacés, en association avec tous les acteurs concernés. L'étude des cours d'eau intermittents est renforcée dans le cadre du projet H2020 DRYVER. Fédération onze pays européens, trois nations d'Amérique du Sud, plus la Chine et les Etats-Unis, il va évaluer les conséquences de l'assèchement des réseaux hydrographiques lié au changement climatique sur les besoins en eau, la biodiversité, les fonctions et les services écosystémiques.

La forêt amazonienne : une biodiversité phénoménale !

Trouver le plus beau bois durable

La biodiversité de la forêt amazonienne donne le tournis. Pour n'évoquer que les arbres, 16 000 espèces différentes y seraient présentes ! Rien qu'en Guyane française, on en dénombre au moins 1 800. A titre de comparaison, l'Europe continentale n'abrite que 150 espèces d'arbres autochtones. Les caractériser représente un immense défi pour les chercheurs, mais cet effort est indispensable. Aujourd'hui en effet, 80% de la production de bois en Guyane est concentrée sur une unique espèce, l'Angélique (*Dicorynia guianensis*). Et son exploitation cause des dégâts, aussi bien lorsqu'il s'agit d'aller chercher toujours plus loin les plus beaux spécimens, qu'en terme de gestion durable des peuplements. D'autres espèces fournissent pourtant du bois d'intérêt, même si leur exploitation implique des aménagements des scieries. Mais des essences, en apparence identiques, peuvent appartenir à des espèces distinctes, qui ne produisent pas toutes la même qualité de bois. Les chercheurs s'attachent à développer des outils moléculaires qui permettent de déterminer rapidement l'aire de répartition des différentes essences, afin de faciliter leur identification. Dans un souci de gestion durable, ils étudient l'adaptation des espèces à leur environnement, et peuvent déterminer la taille minimale à atteindre avant la coupe pour chacune d'entre elles, afin de s'assurer que l'arbre a eu le temps de se reproduire avant l'abattage.

Et si on scannait l'ADN environnemental ?

D'un point de vue plus global, les scientifiques veillent à accompagner les décideurs locaux dans les processus d'anthropisation des espaces naturels. L'augmentation de la population en Guyane française conduit par exemple à la création de nouvelles terres agricoles. Mais où les installer, pour limiter au maximum l'impact sur les milieux naturels ? Pour le déterminer, les chercheurs caractérisent la biodiversité du milieu grâce au séquençage de l'ADN environnemental ou méthode de *metabarcoding*. Cette méthode permet d'analyser l'ADN d'échantillons globaux, comme le sol ou l'eau, pour identifier les différentes espèces présentes sans avoir besoin de les isoler. En complément d'autres méthodes de diagnostic, elle permet d'identifier rapidement les zones vulnérables ou présentant un intérêt pour la biodiversité et qu'il conviendra de préserver. Le *metabarcoding* est aussi utilisé plus généralement par les chercheurs, comme un outil supplémentaire pour caractériser la diversité et la distribution des espèces dans un milieu.



Diversité intraspécifique : diversité génétique au sein d'une même espèce.

Eucaryotes : organismes dont les cellules sont dotées d'un noyau et d'autres structures protégées par une membrane. Les animaux, végétaux et champignons, sont des eucaryotes.

Réaction en chêne

Réfugiés sur l'étroit pourtour méditerranéen lors du maximum glaciaire, voilà 13 000 ans, les chênes n'ont mis que 7 000 ans pour reconquérir l'ensemble de l'Europe, une fois les conditions redevenues favorables. A présent que le changement climatique bouleverse leur environnement, doit-on s'attendre à les voir migrer de nouveau vers des lieux plus cléments ? La réponse est non, car les modèles actuels montrent que le réchauffement du climat est plus rapide que la vitesse de migration des arbres. Mais il est possible de leur donner un petit coup de pouce, en exploitant certains de leurs formidables atouts. D'abord, la diversité génétique intraspécifique* (carburant du moteur de l'adaptation) est l'une des plus élevées parmi les eucaryotes*. Les arbres sont capables de s'hybrider avec d'autres espèces apparentées, mieux que tout autre plante ou animal. Lors de l'hybridation, ils sélectionnent chez l'autre espèce les gènes qui apparaissent les plus favorables à leur survie. Les chercheurs ont pour ambition d'exploiter ce mécanisme dit d'introgression adaptative. On garde l'espèce locale, et on introduit, en mixité, une espèce adaptée aux conditions climatiques futures telles que les fournissent les projections. En enrichissant la biodiversité, on donne plus de prise à la sélection naturelle pour lui permettre de retenir les meilleures combinaisons génétiques.

Pour comprendre puis accompagner ces changements, les scientifiques veulent par ailleurs mesurer la variation génétique qui se produit entre deux générations d'arbres confrontées à un stress thermique. Pour cela, ils comparent le génome de chênes qui ont connu le petit âge glaciaire (1450-1850 environ) à celui de leurs descendants. Ces travaux pourraient permettre de mesurer la vitesse d'adaptation naturelle, mais aussi de faciliter la sélection d'arbres présentant le patrimoine génétique le plus adapté aux pressions de sélection à venir.



Les sols forestiers : notre assurance environnementale

Pour réduire le recours aux énergies fossiles, une alternative consiste à exploiter la biomasse forestière, notamment les déchets de la sylviculture (branches, troncs...), dont une partie est normalement abandonnée sur place par les forestiers. Mais ces menus bois représentent une irremplaçable ressource pour les champignons et bactéries présents dans les sols des forêts, assurant une diversité essentielle au fonctionnement de l'écosystème. En transformant cette matière organique, ils libèrent des nutriments (phosphore, azote, etc.) qui sont alors disponibles pour les plantes. Les chercheurs ont démontré qu'une exploitation excessive de ces bois résiduels aurait des conséquences désastreuses pour l'ensemble de l'écosystème. Une des solutions consisterait à ramener dans la forêt les cendres issues de la combustion de cette biomasse pour compenser la perte de fertilité des sols. Mais elle serait insuffisante et ne permettrait pas de rétablir l'équilibre des communautés microbiennes. Pour éclairer les gestionnaires forestiers sur des méthodes de gestion forestière durables, il est nécessaire de déterminer la quantité de biomasse indispensable au maintien de la diversité microbienne des sols et des fonctions associées. Grâce à de nouvelles méthodes d'étude, telles que l'écologie moléculaire ou la métagénomique*, les chercheurs inventorient rapidement, et à grande échelle, les microbes d'un site forestier. Un travail de fourmi commence alors pour identifier les rôles de chacun, établir les interactions, neutres, positives ou négatives, qu'ils entretiennent entre eux et avec les plantes. Les chercheurs mettent aujourd'hui en lumière des groupes fonctionnels, composés de bactéries et champignons différents, mais qui remplissent une même tâche. Si la diversité s'érode en raison de perturbations diverses (changement climatique, pression anthropique), d'autres membres moins sensibles du même groupe fonctionnel pourraient devenir plus abondants et continuer de rendre les services indispensables au fonctionnement de l'écosystème : une assurance environnementale, en quelque sorte. Le tout est de ne pas atteindre le point de non-retour.



Métagénomique : méthode d'étude du contenu génétique d'échantillons issus d'environnements complexes (ex : intestin, océan, sols, air, etc.). Parfois aussi dénommée génomique environnementale.





02.

Mise en œuvre d'un système de télédétection par laser (LIDAR) pour scanner un arbre dans une parcelle d'expérimentation en agroforesterie sur le domaine de Restinclières.



La biodiversité : source de solutions

Les changements du climat, de l'occupation des sols et des pratiques agricoles nous pressent d'imaginer de nouvelles solutions afin de limiter les impacts négatifs pour l'ensemble de notre société. Or, il apparaît de plus en plus évident que la biodiversité peut y contribuer. Mais pour les chercheurs, il ne s'agit pas tant d'exploiter sa richesse à seule fin de production, au risque de l'appauvrir, que d'en faire un précieux allié pour la régulation, la protection et la pérennité des écosystèmes.



Les services écosystémiques

Dédiées à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes au sens large (terrestres et aquatiques, agricoles et forestiers), à leur gestion et à leur préservation, les recherches d'INRAE explorent les liens entre la biodiversité, les fonctions écologiques et les services écosystémiques*, notamment avec le métaprogramme* ECOSERV lancé en 2014, et désormais le métaprogramme BIOSEFAIR. Ces recherches abordent à la fois la biodiversité planifiée, choisie et gérée par l'humain et la biodiversité associée, ou sauvage. La première correspond par exemple à la diversité végétale introduite dans les champs avec des haies ou des bandes fleuries. La seconde est par exemple composée du cortège de micro- et macro-organismes qui colonisent ces aménagements. Cette chaîne de causalité complexe est l'objet central du questionnement sur le rôle de la diversité biologique et des services écosystémiques auxquels elle contribue dans la durabilité des écosystèmes gérés.



Services écosystémiques: bénéfices retirés par l'être humain des ressources naturelles produites par les écosystèmes. Ils permettent de faire le lien entre un système social et un système écologique.

Métaprogramme: dispositif original d'animation et de programmation scientifique propre à INRAE et combinant des approches systémiques et interdisciplinaires pour répondre aux défis scientifiques et sociétaux.

Le métaprogramme BIOSEFAIR

Le métaprogramme BIOSEFAIR lancé en 2021 vise à constituer une communauté scientifique interdisciplinaire pour traiter de nouvelles questions relatives à la biodiversité et aux services écosystémiques, en complément des actions déjà engagées au sein d'INRAE. Les interfaces entre milieux et entre activités, les dynamiques de changement et liens entre la biodiversité et la santé seront au cœur des réflexions et des projets soutenus par BIOSEFAIR.



Les insectes aquatiques, ces alliés méconnus

Le projet Aqualand apporte une nouvelle preuve de l'interconnexion des écosystèmes. En étudiant l'influence des cours d'eau sur les parcelles agricoles adjacentes, les chercheurs ont découvert que les services rendus par ces écosystèmes s'avéraient bien plus importants qu'on ne le pensait jusqu'alors. Notamment, ils ont constaté que les insectes aquatiques qui émergent des cours d'eau à l'âge adulte, emportent avec eux de l'azote accumulé aux premiers stades de leur cycle de vie qui contribue, à leur mort, à fertiliser les terres environnantes. Ainsi, les chironomes, dont les larves sont les vers de vase si prisés des pêcheurs, peuvent fertiliser les champs jusqu'à une distance de 50 mètres de la rivière. Comparé aux intrants azotés, l'apport peut paraître négligeable, mais cette manne pourrait permettre de réduire localement leur usage. Par ailleurs, ces insectes pourraient constituer une source de nourriture pour les auxiliaires de culture, qui se réfugient dans les bandes enherbées de bord de cours d'eau lorsque les champs labourés n'offrent plus suffisamment de ressources alimentaires. Enfin, ils pourraient aussi contribuer à la pollinisation des plantes cultivées. Les recherches se poursuivent pour quantifier avec plus de précision les services écosystémiques fournis par ces insectes aquatiques.

L'or brun: la richesse dans la complexité des sols

Les intrants azotés* fournissent un coup de fouet aux plantes aptes à les assimiler efficacement. Mais la contrepartie, c'est que leur développement rapide se fait au détriment d'autres organismes. A terme, cela conduit à un appauvrissement et à une banalisation de la biodiversité, par sélection naturelle des espèces les plus compétitrices. Dans le cadre du projet BIASE, les chercheurs ont utilisé la méthode du *metabarcoding*, l'ADN environnemental, pour comparer la structure des réseaux trophiques* du sol de parcelles expérimentales présentant des couverts variés (des grandes cultures aux prairies permanentes, réseau ACBB*) et exploitées en agriculture conventionnelle ou avec peu ou pas d'intrants (systèmes agroécologiques). L'objectif était d'évaluer si les pratiques de gestion affectaient la complexité des interactions entre les êtres vivants du sol. Dans les systèmes agroécologiques, la biodiversité du sol remplit une grande variété de fonctions, ce qui se traduit notamment par une plus forte efficacité dans l'utilisation de l'azote et du carbone (y compris pour sa séquestration dans les sols) que dans les systèmes conventionnels. De plus, la richesse et la complexité des interactions entre les êtres vivants renforce la capacité des écosystèmes à supporter des perturbations climatiques. C'est notamment parce que plusieurs groupes taxonomiques* peuvent assurer un même rôle, ou que plusieurs voies d'interactions existent, que la résistance de l'écosystème augmente. Cette propriété émergente de la biodiversité, notamment végétale, est une voie encourageante pour favoriser la résilience des agroécosystèmes vis-à-vis de conditions difficiles et une piste à explorer pour proposer des systèmes agroécologiques plus durables.



Intrants azotés: ce sont les engrais, d'origine organique ou minérale, majoritairement composés d'azote, utilisés pour améliorer le rendement des cultures. Exemples: fumier, lisier, guano, engrais azotés de synthèse.

Réseaux trophiques: ensemble des interactions d'ordre alimentaire au sein d'un écosystème qui permettent la circulation de la biomasse et de l'énergie.

Réseau ACBB (Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques, Biodiversité): réseau de sites d'observation et d'expérimentation conçu pour capter les évolutions à pas de temps long (> 20 ans) du système sol-végétation, de son environnement et des différentes rétroactions qui les gouvernent.

Groupe taxonomique: ensemble d'espèces partageant des critères spécifiques définis et un même ancêtre commun.



Trame verte et bleue: projet issu du Grenelle de l'Environnement de 2007, la trame verte et bleue vise à créer ou restaurer des corridors écologiques, afin de permettre aux espèces animales et végétales terrestres et aquatiques, de se déplacer librement, et en sécurité, pour effectuer les étapes importantes de leur cycle de vie. Les collectivités françaises doivent désormais inscrire la trame verte et bleue dans leurs documents d'urbanisme. Le terme d'infrastructures vertes (et bleues) est plus générique au niveau international.

Ripisylve: formations boisées qui se développent le long des rives des cours d'eau ou plans d'eau.

Disservice écosystémique: nuisance ou effet négatif des écosystèmes sur le bien-être de la société et des individus.

Une trame nommée désir

Lancé en 2015, le projet européen IMAGINE a regroupé six équipes de cinq pays (Allemagne, Belgique, Estonie, France et Norvège) autour de six territoires d'études portant sur les multifonctionnalités écologiques des trames vertes et bleues (TVB)*, et sur les services écosystémiques associés. Premier enseignement, tous les pays ne partagent pas le même point de vue sur le rôle des TVB. La France considère qu'elles doivent servir à protéger et rétablir une connectivité pour les espèces sauvages au sein des paysages anthropisés. Pour d'autres pays, c'est la fourniture de services écosystémiques qui est principalement attendue. Quoi qu'il

en soit, l'une des études montre que les infrastructures vertes – boisements, prairies naturelles, haies, ripisylves* – fournissent 1,5 à 2 fois plus de services écosystémiques que les autres habitats du paysage. Une différence de contribution qui étonne par son ampleur. Plus que la surface qu'ils occupent, c'est l'existence même des éléments linéaires (haies, bandes herbacées...) qui importe en termes de services rendus aux paysages agricoles, tels que la pollinisation, la régulation des ravageurs des cultures ou la séquestration du carbone. IMAGINE s'est aussi intéressé aux disservices*, autrement dit aux conséquences négatives des TVB. Par exemple, les tiques porteuses de la maladie de Lyme, qui se propagent sur le territoire, les élans qui menacent les promeneurs en Norvège, les zones humides qui hébergent des moustiques, toutes ces sources de désagréments doivent être mesurées et prises en compte à l'occasion de nouveaux aménagements notamment pour prévoir des messages de prévention et de sensibilisation auprès de la population. Même si, comme le montre le projet, les services écosystémiques prodigués par les TVB sont toujours majoritaires, en comparaison des aspects négatifs.



Préparer les forêts au changement climatique

Les effets du changement climatique sont déjà visibles en forêt. La hausse des températures, les épisodes de sécheresse, les fortes précipitations, les vents violents fragilisent les arbres, qui sont aussi menacés par des ravageurs, champignons, bactéries, insectes, nouveaux ou en expansion du fait de leur adaptation à ces conditions inédites. Face à ces enjeux majeurs, les scientifiques s'attachent à caractériser toute la biodiversité présente entre et au sein des différentes espèces, afin d'identifier les capacités adaptatives qui permettent à certains individus d'économiser l'eau, de résister aux ravageurs, ou de disperser leurs graines pour migrer vers des environnements moins contraignants.



La diversité, source d'adaptation et levier de la résilience

L'essentiel est invisible pour les yeux, disait Saint-Exupéry. Cette citation décrit à merveille l'importance de la diversité génétique, un versant de la biodiversité encore peu considéré mais essentiel à l'évolution et à l'adaptation des espèces. Elle contribue à expliquer pourquoi certains arbres, en apparence identiques, résistent mieux à une maladie, à une violente sécheresse, à l'augmentation de la température, voire à une combinaison de ces facteurs, tandis que leurs congénères succombent. Avec le changement climatique, ces événements vont se multiplier et s'intensifier. Il est donc essentiel d'agir pour accompagner l'évolution de nos forêts. C'est à cette fin qu'ont été initiés les projets européens dédiés à la sélection variétale et la conservation de la diversité forestière tels que B4EST, GenTree et dans son prolongement FORGENIUS, débuté en 2021. Les généticiens ont pour objectif d'identifier des combinaisons génétiques originales au sein des espèces, susceptibles de favoriser leur adaptation aux conséquences du changement climatique, qu'il s'agisse de maladies, de sécheresse ou de froid tardif. Ils tentent également de nouveaux croisements pour exploiter les caractéristiques favorables de chaque espèce, notamment en s'intéressant à certaines essences jugées jusqu'ici mineures d'un point de vue économique, telles que l'if ou le pin pignon en région méditerranéenne. Dans le même temps, les chercheurs vont évaluer la résilience à court et moyen terme des populations des unités conservatoires, ces espaces protégés qui abritent la diversité génétique des espèces, représentative d'une région et d'une lignée évolutive. Ici, il s'agit d'observer par divers moyens (télétection par satellite, génomique, physiologie...), l'évolution des populations face au changement climatique, et d'identifier les individus résistants aux pressions biotiques* et/ou abiotiques*. Ces connaissances alimenteront des modèles permettant aux gestionnaires forestiers d'observer, aussi bien localement qu'à l'échelle européenne, le destin d'une espèce ou d'un réseau de peuplements confrontés au changement climatique.



Pressions biotiques: pressions exercées par les autres êtres vivants appartenant à l'écosystème (prédateurs, parasites, compétiteurs).

Pressions abiotiques: pressions dues à des facteurs non vivants (par exemple catastrophes naturelles, modifications de la composition chimique de l'environnement, de la température, etc.).

Les forêts mélangées

Introduire de nouvelles essences en mélange, dans des forêts mono-espèce, représente une piste prometteuse. Cet accroissement de la biodiversité pourrait en effet améliorer la résilience des peuplements face au changement climatique. Mais ce n'est pas le seul avantage de cette pratique.

Des feuillus dans les pinèdes

Les pinèdes sont fréquentes dans le paysage méditerranéen, mais sont le plus souvent composées par une seule espèce de pin. Cependant, il a été montré dans la littérature scientifique que l'introduction de feuillus apporte un bénéfice pour le peuplement, qui va bien au-delà du simple gain de biodiversité. Par exemple, on constate une croissance plus importante du peuplement mais aussi une résistance accrue face aux ravageurs, les espèces vulnérables étant protégées par les autres, qui agissent comme une barrière. En région méditerranéenne, ces mélanges améliorent aussi la résilience après incendie. Afin de déterminer les meilleurs mélanges et les espèces les plus pertinentes, les chercheurs ont introduit différentes espèces de feuillus (chêne vert et blanc, sorbier domestique, frêne à fleurs, arbousier notamment) dans une pinède expérimentale de pins d'Alep. Il s'agit de déterminer quelles sont les espèces les plus adaptées et dans quelles conditions de végétation. Les données récoltées sur la croissance et la survie des plants et sur les facteurs du milieu (lumière, eau dans le sol) servent à alimenter des modèles de dynamique forestière et aident à définir des stratégies de gestion des forêts méditerranéennes face au changement climatique.



Modéliser les mélanges d'essence

Les forêts mélangées sont des écosystèmes extrêmement complexes. Les modéliser dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement l'est tout autant. Mais il s'agit d'un préalable essentiel pour prédire leur évolution dans le contexte du changement climatique. Parmi les défis auxquels font face les chercheurs figure la modélisation des interactions entre espèces. Celles-ci dépendent d'un grand nombre de facteurs. Par exemple, la composition du sol peut influencer la compétition entre deux essences. L'accès à la lumière également, tout comme la densité du peuplement. Et bien entendu l'étendue des interactions varie aussi en fonction des arbres qui composent le mélange. Indispensable pour accroître nos connaissances sur l'écologie des espèces, la modélisation du mélange d'essences pourrait, à terme, constituer un outil de gestion précieux pour les forestiers.



La biodiversité : un levier majeur pour l'agroécologie

La transition vers l'agroécologie, destinée, entre autres, à réduire le recours aux produits phytosanitaires et fertilisants minéraux ou améliorer la santé animale, impose une reconception des systèmes de culture et d'élevage. Il s'agit de réintégrer de la biodiversité pour tendre vers une régulation plus naturelle des processus écologiques, tels que le recyclage de l'azote et du carbone dans les sols, essentiels à la croissance des plantes, ou le contrôle des bioagresseurs par leurs prédateurs naturels. La diversité génétique animale, source de résilience, est également mobilisée.



Utiliser les atouts de la diversité

Le changement climatique est en marche. Désormais, il convient d'œuvrer pour en minimiser les impacts sur les plantes et les animaux. A ce titre, la biodiversité constitue sans doute notre meilleure assurance pour affronter les conditions futures. Parmi les solutions : utiliser au mieux la diversité génétique au sein des espèces animales et végétales, pour diluer les risques, augmenter la résilience et préserver les niveaux de production. D'autant que le changement climatique s'accompagne de désordres variés, tels qu'une plus grande fréquence d'épisodes climatiques extrêmes, ou l'apparition de nouvelles maladies et de nouveaux bioagresseurs.

On ne met pas tous ses œufs dans le même panier

La sélection diminue la diversité génétique et des méthodes sont développées à INRAE pour limiter cet impact, en surveillant la consanguinité. En l'absence de sélection organisée, les races locales représentent encore une source importante de diversité. C'est typiquement le cas en Afrique, où les poulets villageois arborent des couleurs variées : au Bénin, un plumage caillouté, tacheté de noir, apporterait la prospérité, au Sénégal, on offre les blancs lors des mariages, tandis que les noirs protègent des esprits maléfiques. Les éleveurs conservent un large choix d'animaux de différentes couleurs, pour répondre à une gamme de besoins. Ne pas orienter leurs populations dans une seule direction présente un avantage : la diversité intraspécifique est source de robustesse. En cas de crise, sanitaire ou climatique, certains individus succomberont alors que les mieux adaptés survivront, permettant au groupe de se maintenir. Malgré le peu de surveillance sanitaire et technique, ces poulets villageois sont toujours là. Cet exemple illustre l'intérêt de conserver de la diversité génétique au sein d'un peuplement, ce qui rejoint l'observation que la production de biomasse est plus élevée dans les écosystèmes naturels dont la diversité, génétique ou spécifique, est plus importante. Des chercheurs d'INRAE étudient les possibilités pour améliorer la stabilité des performances de l'ensemble d'un troupeau face aux stress ou aux maladies, en jouant sur des aptitudes différentes et complémentaires des animaux. Ce pouvoir tampon de la biodiversité, qui revient à ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier, suppose de conserver, voire de réintroduire suffisamment de diversité génétique au sein des populations. La valorisation des races locales, longtemps négligée, constitue en cela un atout précieux. Les chercheurs peuvent aider les gestionnaires de ces populations par l'utilisation d'indicateurs moléculaires permettant d'identifier l'originalité des populations et de quantifier la réserve de diversité qu'elles représentent.



La mixité, c'est bon pour la santé

Les strongles digestifs sont des vers parasites dont le cycle s'effectue en partie dans les animaux qui pâturent les prairies. Les œufs sont excrétés dans les fèces, puis les larves qui en sortent sont de nouveau consommées. Elle se transforment alors en adultes qui pondent leurs œufs dans le tube digestif des animaux qui pâturent, complétant le cycle. Ces vers provoquent de fortes diarrhées, souvent graves chez les jeunes chevaux. Les vermifuges constituent le moyen de lutte le plus courant, mais leur utilisation massive entraîne l'apparition de résistances, qui les rendent moins efficaces. En outre, des résidus se retrouvent dans l'environnement où ils peuvent avoir des impacts indésirables. Les carabes notamment, précieux auxiliaires des cultures, y seraient sensibles. Parmi les solutions alternatives étudiées pour lutter contre ce fléau, la mixité des espèces au pâturage apparaît prometteuse. En effet, certains strongles sont spécifiques à une espèce. S'ils sont consommés par des animaux non-hôtes, le cycle s'interrompt. Les chercheurs ont ainsi démontré que la mixité équins/bovins, et ovins/bovins dilue la charge parasitaire des prairies pour chacune des espèces. Ce système permettrait de réduire le recours aux vermifuges. Or, une enquête menée par INRAE auprès d'éleveurs du Massif Central et de Normandie, montre que seul un tiers de ceux qui pratiquent la mixité ont conscience du bénéfice sanitaire de la pratique. Ainsi, par sécurité, eux aussi traitent systématiquement les animaux avec des vermifuges, alors que la réduction de leur usage permettrait de limiter les frais vétérinaires et l'impact environnemental des résidus de médicaments. Ce décalage montre l'importance de mieux faire connaître les résultats de recherches aux acteurs. Pour cela, une solution est de les impliquer davantage en amont des recherches, ce qui permet en outre d'intégrer leurs savoirs dans les travaux des chercheurs.



La diversité, oui, mais pas à tout prix

De nombreuses études menées depuis les années 1960 montrent que les variétés végétales cultivées en mélange apportent un gain de productivité allant en moyenne de 2 à 4% par rapport aux variétés cultivées seules. Mais tous les mélanges ne se valent pas : certains fonctionnent bien mieux qu'attendu, tandis que d'autres produisent des rendements plus faibles par rapport à ce que l'on observe en monoculture. Pour comprendre cette variabilité, des chercheurs d'INRAE ont mené des expériences afin d'étudier certains mécanismes à l'origine d'interactions négatives entre individus d'une même espèce mais génétiquement différents, déjà décrits dans les milieux naturels. Leurs travaux se sont notamment intéressés à la reconnaissance entre apparentés, mécanisme proposé dans les années 60 dans le cadre de la théorie de la sélection de parentèle pour expliquer l'évolution de comportements altruistes. Si une telle reconnaissance existe chez les espèces cultivées, on s'attend à ce que l'intensité de la compétition soit plus faible entre des variétés très apparentées qu'entre des variétés génétiquement différentes, et donc que les parcelles ayant peu de diversité aient un meilleur rendement. Jusqu'à présent aucune étude n'a démontré cet effet de reconnaissance entre apparentés chez les espèces cultivées, ce qui suggère que d'autres mécanismes seraient responsables des baisses de rendement constatées pour certains mélanges. Les chercheurs ont alors opté pour une approche novatrice, basée sur la génomique. Ils ont testé de nombreux mélanges de plantes, et observé les combinaisons génétiques de ceux qui avaient fourni les meilleurs et les moins bons rendements. Ils ont ainsi identifié une zone du génome qui entraîne une baisse de la productivité et une sensibilité accrue aux maladies lorsque les variétés diffèrent dans leur information génétique à cet endroit précis de l'ADN. Ainsi, l'effet positif moyen constaté lors du mélange de variétés peut être contrecarré par des associations génétiques défavorables. Ce résultat, loin de remettre en cause les effets bénéfiques de la diversité des cultures, suggère qu'il est important de contrôler la composition des mélanges à un niveau génomique afin de se prémunir de potentielles interactions négatives entre variétés.



La diversité spontanée des paysages



Les plantes cultivées, bio-herbicide par nature

Les plantes adventices, ces plantes sauvages des milieux agricoles, sont en compétition avec les plantes cultivées pour les ressources, et peuvent ainsi occasionner des pertes de production. Elles servent également de refuge ou de source de nourriture pour des auxiliaires des cultures et des pollinisateurs. La plupart des études qui traitent de leur compétition avec les plantes cultivées s'attachent à analyser comment ces plantes sauvages vont impacter la production. Les écologues ont abordé la problématique sous un autre angle : ils ont regardé si la compétition exercée par les plantes cultivées sur les plantes adventices permettait de réguler ces dernières, et ainsi diminuer l'usage des intrants, en particulier les herbicides. Pour tester cette hypothèse, ils ont conduit, en partenariat avec les agriculteurs, une expérimentation dans 56 parcelles de céréales d'hiver. Dans chacune d'elles, une zone a été délimitée pour recevoir des traitements expérimentaux. En absence de désherbage et d'apport de fertilisant, en particulier d'azote, la biomasse adventice est réduite de 65% dans les zones où sont présentes les plantes cultivées par rapport aux zones où les plantes cultivées sont absentes. La raison tient en grande partie au fait que les plantes cultivées, le blé notamment, sont sélectionnées pour leur capacité compétitive facilitant l'accès et l'utilisation des nutriments et de la lumière. Plus étonnant encore, les chercheurs ont montré que le désherbage et l'apport d'azote n'avaient qu'un rôle mineur dans la régulation de la biomasse adventice par rapport à celui des plantes cultivées elles-mêmes. Des leviers de régulation biologique basés sur les plantes cultivées pourraient donc être utilisés, en substitution des intrants. D'autant que l'étude montre un gain économique pour l'agriculteur, les économies de temps et d'argent réalisées grâce à l'arrêt ou la réduction des traitements étant supérieures à la perte de production. Ces résultats encourageants devront cependant être validés dans d'autres conditions pédo-climatiques* et systèmes de production.



Conditions pédo-climatiques :
ensemble des conditions
extérieures au niveau du sol
affectant une plante.

Les nombreux atouts des bandes fleuries

En 2013, les chercheurs ont semé, dans une parcelle expérimentale, des dizaines de bandes fleuries composées de 9 à 32 espèces sauvages, indigènes, et pérennes. Afin d'évaluer au mieux l'effet de ces bandes sur la parcelle, ils n'ont utilisé aucun insecticide ni travail du sol. L'étude a permis de confirmer l'efficacité des bandes fleuries sur la régulation des ravageurs, avec des variations sensibles selon les cultures. Les chercheurs ont constaté une diminution de 30 à 50% des pucerons sur l'orge et le pois, mais quasiment aucun effet sur les pucerons du colza. Surtout, ils ont observé en cinq ans une explosion du nombre de carabes, multiplié par cinq, des prédateurs de certains des principaux ravageurs du colza. En résumé, plus la diversité du mélange de plantes est importante, plus on y trouve d'organismes différents, susceptibles de réguler une plus grande variété de ravageurs. Les recherches se poursuivent chez des exploitants en agriculture conventionnelle, biologique ou de conservation* pour évaluer la plus-value des bandes fleuries dans ces différents contextes. En agriculture biologique, l'élimination des produits phytosanitaires implique un travail du sol accru. Au contraire, l'agriculture de conservation vise à protéger le sol, qui est couvert en permanence par les cultures, mais utilise des intrants chimiques. Les chercheurs s'intéressent à l'influence des bandes fleuries sur la biodiversité, notamment pour les oiseaux, chauve-souris et autres petits mammifères. Par exemple, le bénéfice des bandes fleuries pour la régulation des ravageurs pourrait être limité en agriculture conventionnelle, mais présenterait d'autres avantages pour les agriculteurs. Elles apportent en effet de la diversité dans les paysages, appréciée de nombreuses personnes, et hébergent du petit gibier comme les lapins ou les perdrix. Les infrastructures agroécologiques peuvent aussi avoir un rôle social. En effet, leur apparition dans le paysage interpelle les riverains ou les personnes de passage, ce qui peut les amener à vouloir en savoir plus. C'est ainsi que des exploitants questionnés à leur propos peuvent nouer un dialogue avec divers acteurs en expliquant leur démarche et en présentant les différents points positifs associés à ces objets. Un dialogue important, à une époque marquée par la défiance du public vis-à-vis de certaines pratiques agricoles.



Agriculture conventionnelle : système de production agricole fondé sur l'optimisation des rendements notamment par l'apport d'intrants (fertilisants organiques et minéraux, pesticides).

Agriculture biologique : système de production agricole qui exclut l'usage de la plupart des produits de synthèse et limite l'emploi d'intrants dans le souci du respect des équilibres naturels.

Agriculture de conservation : système de production agricole qui vise à préserver les fonctions écologiques des sols par la suppression du travail du sol. La mise en place d'une couverture (végétale ou organique) permanente du sol ainsi que la diversification de la rotation culturale.



La nature, source de solutions

Une stratégie gagnant-gagnant, voilà l'objectif des Solutions Fondées sur la Nature (SFN). Le principe de ce concept, mis en avant dès 2009 par l'UICN, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature, est de concevoir des projets d'aménagement du territoire qui soient autant favorables à la biodiversité qu'à la société. La préservation ou la restauration de la biodiversité constitue un prérequis indispensable à la mise en œuvre de toute initiative, qu'elle concerne la réduction des risques naturels, l'adaptation au changement climatique, la sécurité alimentaire ou l'accès à l'eau. Si de telles actions existaient avant l'émergence du concept, expérimentées notamment dans les travaux à INRAE, les SFN sont désormais systématiquement proposées lorsque les conditions s'y prêtent. Il peut s'agir de reméandrer* un cours d'eau afin d'en ralentir le débit et limiter l'impact des crues ; de créer une zone humide qui recueillera le trop-plein d'eau et constituera un réservoir de biodiversité animale et végétale ; ou de planter une forêt qui protégera les habitations situées dans des zones d'avalanche ou d'éboulements... Une initiative remarquable par son ampleur, concerne le contrôle de l'érosion et de la sédimentation à l'échelle du territoire de la Durance, au Sud-Est de la France. Les chercheurs ont développé un modèle pour déterminer les types d'aménagement à mettre en place, leur répartition le long de la rivière et de ses affluents, et ce pour limiter l'impact des inondations. Des expérimentations ont montré qu'en plaçant des ouvrages de génie végétal dans les ravines d'un bassin versant, on pouvait bloquer efficacement les sédiments qui dévalent les cours d'eau. Cela évite qu'ils se déposent au fond des rivières en aval, limitant une élévation du fond qui favoriserait les débordements. La végétation qui se développe sur les ouvrages apporte de la biodiversité, et ces aménagements protègent les humains et les habitats situés à proximité des cours d'eau. L'intérêt est aussi économique, puisque la réduction des sédiments limite la fréquence des coûteuses interventions de curage pratiquées sur les ouvrages hydroélectriques du bassin.



Reméandrage : remettre un cours d'eau dans ses anciens méandres ou créer un nouveau tracé avec des profils variés, pour redonner au cours d'eau une morphologie sinueuse se rapprochant de son style fluvial naturel.





03.



De la connaissance à l'action et à la gestion durable des milieux

Connaître la biodiversité et comprendre le fonctionnement des écosystèmes est essentiel afin de construire des solutions de gestion pertinentes et durables des milieux. Les scientifiques d'INRAE co-construisent avec les acteurs des territoires des solutions pour préserver la biodiversité et les milieux naturels, en appui aux politiques publiques.

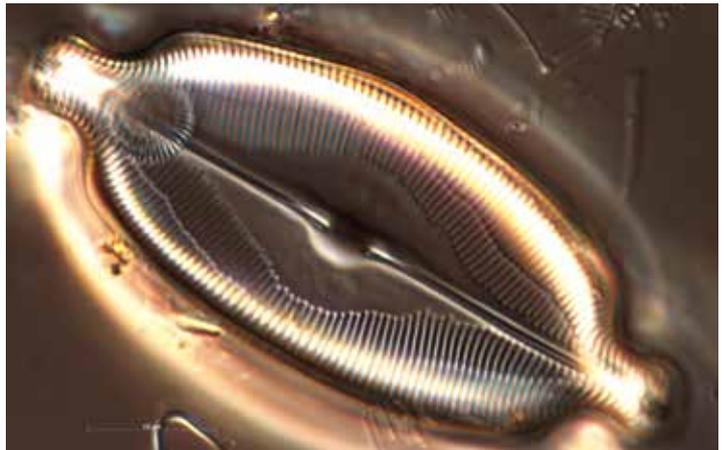


Diagnostiquer: les sentinelles écologiques

Pour connaître l'état d'un milieu, quoi de mieux que de s'intéresser à ses occupants? De nombreux organismes ou groupes d'organismes du sol, de l'eau, ou des forêts, constituent en effet de précieux bioindicateurs, qui renseignent sur la qualité de l'écosystème. Il revient aux chercheurs d'identifier les plus représentatifs, et notamment les sentinelles biologiques, ces organismes qui réagissent rapidement aux changements du milieu, ou qui conservent l'historique des événements passés.

Dans les rivières

L'évaluation de l'état écologique des cours d'eau repose sur le calcul d'indices de qualité basés sur la sensibilité de certains groupes biologiques à la pollution et aux altérations hydromorphologiques* de l'habitat. Les diatomées, des microalgues qui présentent une diversité exceptionnelle puisqu'on en compte plus de 100 000 espèces dans le monde, font partie de ces bioindicateurs. Depuis 2010, des chercheurs d'INRAE développent une méthode d'identification automatique des diatomées, basée sur l'analyse de leur ADN. Non seulement la procédure est plus rapide que l'analyse au microscope, mais elle est aussi moins coûteuse. Un test à grande échelle a été réalisé afin de mesurer son efficacité. Plus de 450 échantillons de biofilms ont été prélevés dans des centaines de cours d'eau et lacs du pays et analysés à la fois par microscope et par séquençage ADN. Les deux méthodes ont produit des résultats comparables, confirmant ainsi la robustesse et la fiabilité du nouveau procédé.



* **Altérations hydromorphologiques**: modifications physiques de la forme des cours d'eau dues, notamment, aux aménagements humains.



* **Eutrophisation**: déséquilibre des écosystèmes aquatiques déclenché par des apports excessifs en nutriments, souvent d'origine anthropique. Les manifestations les plus connues sont l'apparition de cyanobactéries toxiques dans les lacs et les cours d'eau, et les proliférations de macroalgues vertes dans les zones côtières.

DCE: la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) prévoit une évaluation régulière de l'état écologique des masses d'eau, basée sur le contrôle de différents indicateurs de la qualité biologique, tels que les invertébrés, les végétaux (phytoplancton et macrophytes) et les poissons.

Dans les lacs

Les poissons, qui constituent l'ichtyofaune, sont de précieux indicateurs biologiques de l'état des milieux lacustres. Intervenant en bout de chaîne trophique et dotés d'une durée de vie longue comparés au compartiment végétal et au zooplancton, les poissons intègrent un grand nombre d'informations susceptibles de renseigner sur la santé des écosystèmes et leur évolution. Néanmoins, exploiter le potentiel de bioindication de l'ichtyofaune est difficile. Si la formidable variété des lacs français constitue un atout en termes de biodiversité, elle ne facilite pas la création d'outils permettant de mesurer une réponse des organismes aux différents facteurs de stress. En travaillant sur des jeux de données européennes, les chercheurs sont néanmoins parvenus à développer des indicateurs qui renseignent sur le niveau d'eutrophisation* qui correspond généralement à une dégradation générale des lacs. Mais pour améliorer la qualité du diagnostic et mieux répondre aux objectifs réglementaires, notamment de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE)*, ils développent à présent des modèles pour comprendre la réponse de l'ichtyofaune à d'autres facteurs de stress (dégradation des habitats, introduction d'espèces, modification des régimes thermiques...). Ces outils devraient être plus sensibles et plus informatifs quant à l'origine des perturbations mesurées.



Dans les sols

Envisager la transition agroécologique sans prendre en compte l'extraordinaire biodiversité des sols est voué à l'échec. Durant des décennies, ce compartiment de l'environnement a été considéré comme un substrat inerte dans lequel on apportait ce qui était nécessaire aux cultures. Cette simplification du système a entraîné un appauvrissement des sols. Il apparaît désormais essentiel de rétablir et préserver la biodiversité, pour ce qu'elle est d'abord, puis pour les fonctions écologiques qu'elle porte, et enfin pour les services écosystémiques qui en découlent. Pour les chercheurs, toute la difficulté consiste à caractériser cette formidable diversité. Et plus encore, à comprendre la nature des interactions entre tous ces organismes (microorganismes tels que bactéries et champignons, vers, insectes...) pour espérer, à terme, identifier celles qu'il s'agit de promouvoir, ou au contraire de limiter, pour favoriser tel ou tel service écosystémique. Dans le cadre du projet Agro-Eco-Sol, ces connaissances se traduiront par le développement de bioindicateurs de la qualité des sols simples et peu coûteux, destinés aux agriculteurs engagés dans l'agroécologie, et notamment dans l'agriculture de conservation. En parallèle, les chercheurs élaborent un projet qui permettrait, dans les prochaines années, de mesurer avec précision la variation dans l'espace et dans le temps de la qualité et de la diversité biologique des sols à l'échelle nationale, en exploitant les 2240 parcelles du RMQS, le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols*.



* **Réseau de Mesure de la Qualité des Sols–RMQS**: créé en 2000, le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols échantillonne tous les 15 ans les sols de 2240 parcelles réparties uniformément sur le territoire, afin de suivre l'évolution sur le long terme des propriétés des sols, dans leurs différentes dimensions (biologique, chimique et physique), en lien notamment avec les activités humaines, pour tout type d'usage des sols.



Dans les forêts

Les forêts non exploitées abriteraient une plus grande biodiversité de certains groupes d'espèces que les forêts exploitées. C'est ce qui ressort de la littérature scientifique, mais rares sont les études qui ont été menées sur les forêts de France métropolitaine. C'est pour pallier ce manque de connaissances que 282 placettes* ont été installées dans 22 massifs forestiers.

La moitié des placettes a été soustraite depuis 20 ans au moins à toute exploitation et a été comparée à l'autre moitié qui se situent dans des forêts exploitées voisines. La diversité et l'abondance de 7 groupes taxonomiques ont été étudiées dans le cadre d'un projet de long terme conduit avec l'Office National des Forêts (ONF) et Réserves Naturelles de France (RNF), baptisé GNB (Gestion, Naturalité et Biodiversité). Comme on s'y attendait, les forêts non exploitées présentent davantage de très gros arbres et de bois mort. De manière assez logique, elles abritent aussi une plus grande diversité de bryophytes* et de champignons lignicoles*, et surtout des espèces forestières ou menacées appartenant à ces groupes. En revanche, les coléoptères n'y sont pas plus nombreux. Quant aux oiseaux et chauve-souris, leur dynamique semble dépendre davantage de la structure de la parcelle que de son exploitation ou de sa mise en réserve. Les chercheurs ont désormais le projet de suivre l'évolution dynamique des placettes, afin de mettre en évidence des indicateurs de biodiversité qui pourraient permettre aux gestionnaires de conduire les forêts exploitées de façon plus durable.

* **Placettes**: sites de quelques dizaines de m² localisés avec précision et inventoriés de manière répétée.
Bryophytes: plantes sans fleurs ni racines, incluant les mousses, dont certaines sont exclusivement inféodées aux forêts.
Champignons lignicoles: champignons qui se développent à la surface ou à l'intérieur du bois.



Restaurer la biodiversité

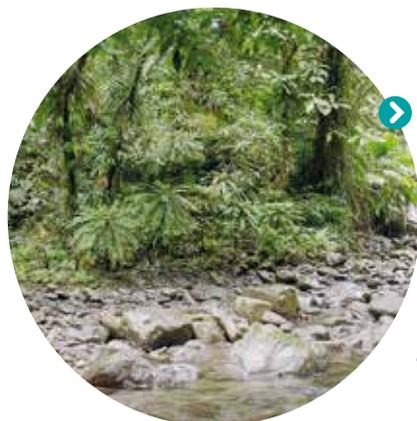
Après des décennies passées à essayer de dompter et de piloter les milieux naturels pour en extraire ce qui nous paraissait utile, on comprend aujourd'hui qu'à trop vouloir contrôler les systèmes, on les a fragilisés, au point d'approcher dangereusement d'un point de non-retour. Il est urgent de restaurer la biodiversité des milieux naturels pour limiter les conséquences du changement climatique. La bonne nouvelle, c'est qu'il n'est pas trop tard. Les chercheurs, associés aux acteurs publics et privés, mettent déjà en place des actions concrètes, avec des résultats encourageants.

Le végétal, plus fort que le minéral

Un ouvrage de génie végétal réussi, c'est un ouvrage qu'on ne perçoit plus au bout de quelques années. Cette pratique, qui se (re)développe depuis la fin des années 80, consiste à utiliser des matériaux vivants pour reproduire des modèles naturels qui remplissent des fonctions écologiques diverses. Par exemple la dépollution, le rôle de corridor écologique ou la lutte contre l'érosion des berges. Jusqu'à récemment, c'est l'enrochement ou le béton qui remplissaient cette fonction. Mais l'efficacité de ces ouvrages à assurer à la fois des fonctions écologiques et de contrôle de l'érosion est remise en question. Au contraire, les berges naturelles, mais aussi celles créées par des techniques de génie végétal, témoignent d'une bonne résistance aux conditions extrêmes tout en respectant les écosystèmes. Les chercheurs ont identifié les espèces végétales qu'il convient d'associer, en fonction de l'objectif recherché. Il peut s'agir de consolider une berge, de limiter la vitesse de l'eau lors de fortes crues ou de lutter contre la progression d'une espèce invasive, comme la Renouée du Japon. Mais la pratique présente d'autres intérêts. D'abord, ces ouvrages, à mesure de leur développement, favorisent l'augmentation de la biodiversité. Ensuite, la substitution du minéral par le végétal influe positivement sur la santé et le moral des populations humaines alentour. Ce bénéfice réciproque est au cœur de l'ingénierie écologique. Autre constat, alors que la résistance des ouvrages de génie civil diminue avec le temps, celle des ouvrages de génie végétal augmente à mesure des années, les racines des plantes et des arbres constituant par exemple de solides remparts face à l'érosion.



Ouvrage de génie végétal dans les Alpes.



➤ Protéger les cours d'eau de Guadeloupe

Le vaste projet PROTEGER, réunissant l'ensemble des acteurs de la gestion et de la préservation des cours d'eau en Guadeloupe, s'attache à développer des techniques de génie végétal adaptées à l'exceptionnelle biodiversité locale. Après avoir sélectionné une trentaine d'espèces végétales locales, les chercheurs étudient la meilleure façon de les bouturer et de les assembler en utilisant des techniques employées en métropole et en zone tropicale, et en imaginent de nouvelles. La dernière phase du projet consistera à transférer ces connaissances auprès des acteurs, pour une filière locale de génie végétal.



L'herbe est (vraiment) plus verte dans le pré d'à côté

Depuis les Jeux Olympiques de 1968, les stations de ski n'ont cessé de se développer dans les Alpes. Mais, face à l'érosion rapide des sols, la nécessité de revégétaliser les pistes de ski s'est rapidement imposée. Dans un premier temps, les gestionnaires se sont tournés vers les semences du commerce communément utilisées en plaine. Après plusieurs dizaines d'années de cette pratique, les résultats apparaissent mitigés. La couverture des sols combat l'érosion et la pousse rapide des végétaux offre un support efficace à la tenue de la neige en hiver, et une nourriture abondante aux animaux d'alpage en été. Le problème, c'est que les semences utilisées, produites hors de leur région bioclimatique*, sont peu adaptées aux conditions alpines. La pauvreté des sols impose notamment l'usage de fertilisants, et des réensemencements fréquents au cours des deux à trois premières années. Pourtant, certaines prairies d'altitude ont été aménagées et sont maintenues ouvertes depuis des centaines d'années. Le projet Sem'lesAlpes propose d'utiliser les semences de ces prairies. Durant trois ans, les chercheurs, en partenariat avec les gestionnaires et producteurs, ont identifié les zones de récolte et les semences locales les mieux adaptées à la revégétalisation. Ils ont veillé à retenir une importante variété de génotypes, afin de conserver la plus grande diversité génétique possible. Ils ont aussi évalué des techniques de récolte en altitude, et chiffré les coûts de la pratique. Avec de bonnes surprises. Par exemple, même si le prix des semences locales est plus élevé que les semences traditionnelles, elles sont plus petites et donc plus nombreuses au kilo. Surtout, la densité de graines au m² nécessaire à un couvert végétal homogène est jusqu'à cinq fois inférieure ! Enfin, elles ne nécessitent pas de fertilisants et apparaissent mieux préparées au changement climatique, notamment en raison de leur importante diversité génétique.



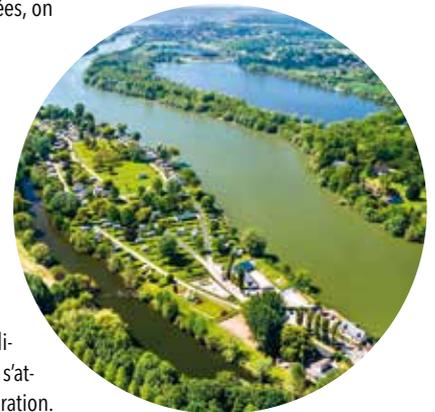
Région bioclimatique : zone géographique dotée d'un climat spécifique déterminant la faune et la flore qui s'y développent spontanément.

Restaurer la continuité des cours d'eau

La mise en place des barrages destinés à faciliter la navigation fluviale, dès la fin du 19^{ème} siècle, a entravé la circulation des poissons migrateurs entre la mer et le fleuve, tandis que les activités humaines n'ont cessé de dégrader la qualité des eaux. Grâce aux efforts de réglementation et de planification et aux aménagements réalisés depuis une trentaine d'années, on assiste à un retour de la biodiversité.

Remonter le cours de la Seine

Pêcher une truite de mer dans la rivière Oise, voilà qui n'est pas commun. Mais ce qui est exceptionnel, c'est d'apprendre que l'animal en question a parcouru près de 450 kilomètres depuis la mer, et franchi 11 barrages lors de sa migration ! Une telle capture aurait été impensable il y a 15 ans. On la doit aux efforts déployés depuis les années 90 pour améliorer la qualité des cours d'eau, longtemps asphyxiés par les rejets polluants. On la doit aussi à la restauration de la continuité écologique de la Seine et de ses affluents, notamment via la mise en place de passes à poissons sur les barrages de navigation. Dans le cadre du projet CONSACRE, les chercheurs analysent les conséquences de cette continuité des cours d'eau, notamment leur impact sur le retour des poissons migrateurs, saumons, truites de mer, aloses... Ils proposent des solutions d'aménagement des milieux naturels pour favoriser ou restaurer la biodiversité et accompagner l'installation de ces précieux visiteurs. Le projet intègre aussi un volet en sciences sociales, qui s'attache à mieux cerner les intérêts, les attentes, voire les réserves des usagers des cours d'eau, face aux actions de restauration.



Arasement des barrages de la Sélune

Depuis le début du 20^{ème} siècle, ces deux barrages hydroélectriques, et les plans d'eau formés au moment de leur création, faisaient partie du paysage. Il n'est pas difficile alors de comprendre le choc qu'a représenté, pour les populations locales, la décision de les effacer, afin de restaurer la continuité de la Sélune, ce fleuve côtier qui se jette dans la baie du Mont Saint-Michel. Les raisons de cette décision sont multiples. Non seulement les barrages n'offraient qu'une faible productivité énergétique, mais dans les plans d'eau, riches en nutriments bloqués par les retenues, les cyanobactéries prenaient de l'ampleur en été, au point que la baignade y était interdite. Surtout, l'arasement des deux barrages allait permettre de rétablir la continuité de la Sélune sur 90 km environ, jusqu'à la mer, une restauration inédite en Europe par son ampleur. Les conséquences de l'effacement du barrage amont (l'autre sera détruit d'ici l'hiver 2022) sont déjà visibles. Les sédiments et les nutriments circulent librement vers l'aval, tout comme les espèces animales et végétales, les graines en particulier, qui peuvent coloniser les nouvelles berges du cours d'eau. Les poissons amphihalins, anguilles, saumons et lamproies notamment, pourront de nouveau remonter le cours du fleuve pour accomplir leur cycle de vie. Quant aux nutriments et sédiments organiques à nouveau charriés par le courant, ils constitueront une source de nourriture pour les nourriceries de l'estuaire. Au cours des sept prochaines années, les chercheurs vont encore scruter la Sélune afin d'en apprendre plus sur la façon dont la biodiversité, et les écosystèmes en général, évoluent à la suite d'un tel bouleversement.



Une arche de biodiversité

Pour répondre aux besoins des activités humaines, les berges du lac de barrage de Serre-Ponçon, dans les Hautes-Alpes, sont tour à tour immergées ou asséchées, avec une amplitude moyenne de marnage annuel de 30 m. Dans ces conditions, la vie peine à s'installer ou à se maintenir. La biodiversité de la zone littorale s'en trouve réduite, ce qui se répercute sur l'ensemble du réseau trophique. Pour tâcher de la restaurer, les chercheurs ont imaginé en 2017 une solution aussi originale qu'ambitieuse : disposer des îlots artificiels flottants, à proximité des berges, qui s'affranchiraient du marnage et permettraient aux végétaux et animaux de s'y maintenir tout au long de l'année. Conçues au sein d'un partenariat entre le pôle Écla-Ecosystèmes Lacustres¹ et la société Ecocéan, ces structures artificielles de 75 m² se composent d'un dallage d'alvéoles où ont été installées des espèces végétales terrestres et aquatiques locales. La partie immergée accueille également des nurseries, destinées à abriter les poissons juvéniles. Depuis leur installation en septembre 2018, les trois radeaux font l'objet d'un suivi régulier qui met en évidence une évolution très favorable. Les jeunes stades de poissons trouvent ici les zones de refuge qui font défaut sur le littoral (de très jeunes stades de brochets et de cyprinidés ont été observés) et les plantes de surface et les hydrophytes* présentent un développement rapide. La surface des radeaux, quant à elle, a été rapidement colonisée par les oiseaux, qui y installent notamment leurs nids, ainsi que par de nombreux insectes, et même de petits reptiles et amphibiens. Une vraie petite arche de Noé ! Conduite jusqu'à la fin de l'année 2021 au moins, cette expérimentation apportera de précieuses connaissances sur la restauration de la biodiversité en milieu perturbé, et fournira des préconisations à destination des acteurs de la gestion pour reproduire ce dispositif.



Hydrophytes : plantes immergées ou à feuilles flottantes, ou encore flottant librement à la surface des eaux.

¹ Le Pôle R&D Écosystèmes lacustres (Écla) regroupe l'Office Français de la Biodiversité (OFB), l'Université Savoie-Mont Blanc et INRAE. Son objectif principal est de contribuer aux connaissances nécessaires à la préservation et la restauration de la biodiversité, du fonctionnement et des services écosystémiques rendus par les écosystèmes lenticques.





Gérer durablement les milieux

Les activités humaines impactent tous les milieux naturels, perturbant les écosystèmes et les espèces qui y vivent par leur exploitation ou par l'introduction d'espèces exotiques. Mais comme nous dépendons également de ces milieux, les scientifiques d'INRAE développent des solutions pour protéger les espèces mais aussi pour gérer les envahisseurs.

Protéger les espèces des rivières à l'océan

Saumons, truites, anguilles, aloses, esturgeons... tous ces poissons migrateurs sont aujourd'hui menacés. Barrages, altération du milieu, pollution et évidemment changement climatique, fragilisent dangereusement ce précieux patrimoine qui est aussi une ressource. Pourtant, des exemples récents montrent qu'il est possible de le préserver. Impliqués depuis plus de trente ans dans la connaissance de ces poissons, de leurs gènes à leur écologie, les chercheurs d'INRAE mettent tout en œuvre pour sauvegarder et restaurer cette formidable biodiversité, tout en tentant de trouver des compromis face à des impératifs économiques contradictoires.



Anguilles: un pour tous et tous pour un!

Entre 1980 et 2012, la population d'anguilles européennes a diminué de 97%. Si les stocks sont légèrement remontés depuis, notamment grâce à un plan de restauration lancé par l'Union Européenne en 2007, ils sont encore bien trop faibles pour garantir une sauvegarde de l'espèce. La situation est d'autant plus complexe que les anguilles qui voyagent entre la mer des Sargasses et les rivières du nord de l'Europe jusqu'à celles du bassin méditerranéen appartiennent à une seule et unique population. Sauver cette espèce impose donc une coordination transnationale autour d'actions concertées. Depuis 2018, le projet SUDOANG rassemble des acteurs publics et privés de la péninsule ibérique, du Sud-Ouest et de l'Occitanie, autour d'objectifs communs. Il s'agit d'abord de mettre en place des indicateurs permettant d'évaluer les stocks de poissons qui remontent et dévalent les rivières, ainsi que les obstacles à leur migration (barrages, braconnage...). Ensuite, il faut développer des outils et scénarios de gestion des cours d'eau et estuaires permettant de restaurer la population. Enfin, un suivi de la ressource doit être assuré sur le long terme afin de juger de l'impact des mesures, les plus efficaces pouvant s'appliquer à d'autres zones géographiques.

Esturgeon européen – sauvetage à haut risque

C'est le plus grand poisson d'eau douce européen, et il est en danger critique d'extinction. Pour espérer voir aujourd'hui les derniers représentants des esturgeons d'Europe, c'est en Gironde, dans la Dordogne ou la Garonne qu'il faut tenter sa chance. Mais elle est infime, car la dernière reproduction naturelle de cette espèce a été observée en 1994. Pour la sauver, un vaste programme de reproduction assistée a été lancé par les chercheurs et les acteurs de terrain. Après avoir, presque miraculeusement, capturé un couple d'esturgeons adultes, les scientifiques sont parvenus à obtenir des juvéniles à partir de 1995, qu'ils ont conservés à des fins de reproduction. Le projet est sur le long cours car ce poisson, qui peut vivre cent ans, atteint sa maturité sexuelle entre dix et quinze ans. Certains des premiers juvéniles lâchés en 2007 ont été récemment capturés alors qu'ils remontaient l'estuaire de la Gironde. Bientôt matures, ils pourraient peut-être se reproduire naturellement. Des esturgeons nés en France ont été transférés en Allemagne, où a été lancé un programme de sauvetage similaire dans l'Elbe. Avec l'espoir qu'à l'avenir, d'autres rivières puissent accueillir à leur tour ces majestueux poissons, en France, en Espagne, mais aussi des fleuves comme le Rhin.



Au chevet des saumons et truites de mer

Les populations de salmonidés de la Manche sont en diminution constante depuis les années 1970. Pourtant, la qualité des cours d'eau côtiers, où saumons et truites de mer effectuent une partie de leur cycle de vie, montre une amélioration depuis deux décennies. C'est pour comprendre les causes de ce phénomène que le projet SAMARCH a été lancé par des chercheurs anglais et français. Pour en apprendre plus sur les premières phases de la vie en mer des jeunes salmonidés, les chercheurs ont équipé des individus de balises, afin de suivre les routes migratoires, mais aussi identifier les zones de forte mortalité. Grâce aux outils moléculaires, ils établissent un catalogue des populations de truites de mer qui permettra de déterminer la rivière d'origine des poissons pêchés en mer. SAMARCH s'attache aussi à déterminer l'influence des conditions de croissance, voire des conséquences du changement climatique, sur le comportement migratoire des saumons. Cela permettra peut-être de comprendre pourquoi certains poissons retardent leur départ vers la mer, ou reviennent plus tôt que prévu en rivière. Autant de comportements qui impactent la reproduction et la dynamique des populations. Toutes ces recherches tendent vers un objectif commun, aider les gestionnaires des deux pays à déterminer les conditions d'une exploitation raisonnée et durable de cette ressource fragile.



Pose un émetteur sur une jeune truite de mer. © C. Artero - GWCT



Suivi de saumons adultes équipés d'une marque radio.

Les saumons donnent de la voix

Depuis des dizaines d'années des chercheurs d'INRAE étudient l'écologie, la biologie et la génétique des salmonidés pour les faire parler. Ces espèces présentent un fort intérêt, tant patrimonial qu'économique. Or, si tous les acteurs publics et privés ont conscience de leur importance, tous n'ont pas le même avis sur les actions à mener ou les efforts à consentir pour assurer leur préservation. Pour éclairer ces débats, les chercheurs développent des outils d'aide à la décision, nourris par l'ensemble des connaissances et données fournies par les organismes de recherche, associations de pêche et de protection de la nature, ou organisations et communauté scientifique internationales. Ils élaborent notamment des modèles mathématiques ou informatiques qui leur permettent de tester des scénarios destinés à mesurer les conséquences pour ces migrateurs amphihalins d'un projet d'aménagement, d'une nouvelle politique environnementale ou du changement climatique. Par exemple, ils testent une modification de la période d'ouverture de la pêche ou des quotas de capture de saumons dans les cours d'eau de Bretagne, l'installation d'un dispositif de franchissement pour migrateurs sur un barrage hydroélectrique, voire sa suppression pure et simple sur l'Allier. Ils étudient également les évolutions, à l'horizon 2050, des régimes thermiques et hydrauliques des cours d'eau sous l'effet du changement du climat.



Combattre les envahisseurs

Les espèces exotiques envahissantes (EEE), introduites par les humains de façon fortuite ou volontaire, constituent une menace pour les écosystèmes et pour la biodiversité, en plus de leur impact économique et sanitaire. Par exemple la jussie, introduite en France au 19^{ème} siècle comme plante d'ornement, se retrouve aujourd'hui sur une majeure partie du territoire, principalement dans les milieux humides, notamment dans le Parc naturel régional de Brière, en Loire-Atlantique. Depuis 20 ans, les gestionnaires mènent une lutte difficile et coûteuse, la plante devant le plus souvent être arrachée manuellement. Mais sans ces actions, le parc serait envahi, impactant la biodiversité et compromettant les activités touristiques, la pêche, la chasse et le pastoralisme. Afin d'accompagner les gestionnaires dans la prise de décision optimale, des économistes d'INRAE ont développé une approche s'appuyant à la fois sur les données collectées depuis 20 ans lors des interventions, et sur les populations locales utilisatrices du parc. Un questionnaire proposé à près de 600 habitants a permis de construire le rapport bénéfice-coût des interventions, dans cinq grandes zones du parc, utilisé ensuite pour déterminer les zones qui devraient être contrôlées en priorité. Cette approche, qui associe la dimension spatiale au calcul du rapport bénéfice-coût des actions, constitue une aide précieuse à la décision. Enfin, les économistes ont également inclus dans leur outil la dynamique de dispersion temporelle de la jussie dans les différentes zones du parc pour repérer les zones où elle se développe rapidement et qui nécessitent d'être contrôlées en priorité. A présent, les chercheurs poursuivent leurs travaux pour ajouter des indicateurs permettant de gérer simultanément plusieurs espèces invasives, pour un budget identique. A terme, l'outil développé devrait être utilisable de façon autonome par tous les gestionnaires confrontés aux espèces exotiques envahissantes en milieu aquatique.



La belle est une bête



La renouée du Japon fait partie des espèces exotiques envahissantes jugées les plus menaçantes pour la biodiversité, au niveau mondial. Introduite en Europe au 19^{ème} siècle comme plante d'ornement, elle est très résistante. Extrêmement compétitrice, elle libère dans le sol des substances toxiques pour les autres plantes. A l'échelle du territoire, le combat contre la renouée est perdu. Néanmoins, il est possible de l'éradiquer localement. A INRAE, où l'espèce est étudiée depuis des années, une méthode de lutte est actuellement évaluée en partenariat avec la SNCF. Il s'agit de tester des techniques de bâchage et de fixation, destinées à recouvrir la renouée qui s'approche parfois dangereusement des voies. Privée de lumière, la plante dépérit rapidement. Mais ses rhizomes peuvent survivre plusieurs années dans le sol. Ces bâches devront donc se maintenir très longtemps sans subir d'altération. Une autre piste également étudiée consiste à employer des techniques de génie végétal pour contrôler le développement de la renouée, en plantant des arbres et des arbustes à croissance rapide qui vont limiter son accès à la lumière. Les scientifiques étudient ces « nouveaux écosystèmes », intégrant la renouée parmi la biodiversité locale, comparent des zones totalement envahies à des espaces non colonisés pour mieux comprendre leur fonctionnement. L'objectif est de vérifier si la restauration avec des techniques de génie végétal permet un retour vers des écosystèmes ayant une structure et un fonctionnement proche ou identique à ceux des écosystèmes non envahis (restauration de la biodiversité du sol, retour des pollinisateurs...).



Biodiversité, acteurs et politiques publiques

Modifier les aménagements et nos modes de gestion des milieux pour restaurer et préserver la biodiversité nécessite des actions complexes et coûteuses. C'est pourquoi les chercheurs d'INRAE travaillent également à identifier les meilleurs leviers à intégrer dans les politiques publiques pour accompagner les acteurs vers des pratiques plus vertueuses pour l'environnement.



Le juste prix des aides publiques

Le second pilier de la PAC prévoit des mesures d'accompagnement pour les agriculteurs qui mettent en place des pratiques favorisant la protection de l'environnement. Les aides à la conversion vers l'agriculture biologique, instaurées au début des années 2000, s'inscrivent dans cette démarche. Mais le montant des aides, comme par exemple l'aide à destination des agriculteurs qui s'orienteraient vers la mise en place de cultures intermédiaires pour piéger le nitrate, dépend de multiples facteurs. Les économistes d'INRAE ont observé que le rapport coût-bénéfice de cette mesure dépend de plusieurs facteurs. D'abord, le niveau de pollution de la zone d'exploitation. Plus il est élevé, plus il sera intéressant de le réduire. Mais rien n'empêche en théorie un agriculteur de s'inscrire dans cette démarche pour bénéficier des subventions, même si le niveau d'azote de son exploitation n'est pas problématique et s'il pratique déjà les cultures intermédiaires. C'est ce que l'on nomme « l'effet d'aubaine ». Or, ces subventions pourraient être allouées à d'autres projets aux bénéfices environnementaux plus conséquents. Une solution, pour éviter cet écueil, consisterait à établir des contrats non linéaires, c'est-à-dire que l'aide allouée à l'agriculteur serait d'autant plus élevée que la mise en place

des mesures apparaîtrait difficile ou contraignante, ou que le bénéfice environnemental serait important. En théorie, une telle pratique permettrait d'obtenir un même gain pour l'environnement, mais pour un budget moindre, la différence pouvant servir à financer d'autres initiatives vertueuses. Pour le démontrer, les chercheurs développent actuellement un modèle qui permettrait de déterminer la juste rétribution d'une mesure, qui tienne compte à la fois des pratiques de l'agriculteur, des contraintes liées à sa mise en place, et du bénéfice pour l'environnement. Un travail titanesque, qui repose sur l'agrégation de données (bilans comptables des exploitants, analyses de la qualité de l'eau et des sols, pratiques agricoles...), recueillies par les organismes publics et privés depuis cinquante ans.

La séquence ERC pour concilier aménagements et biodiversité

Inscrite dans la Loi de 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, la séquence ERC (Eviter, Réduire, Compenser) s'applique aux projets susceptibles de causer une dégradation importante de l'environnement. Il s'agit en premier lieu d'éviter au maximum toute perte écologique. Par exemple, pour une autoroute, en contournant une zone humide abritant une biodiversité remarquable ou des espèces vulnérables. L'objectif est de réduire au maximum l'impact des aménagements et leur empreinte sur l'environnement. Si c'est impossible, alors l'opérateur devra financer un aménagement qui compense de manière au moins équivalente la perte écologique engendrée par son projet. Sur ce dernier point les agriculteurs craignent que cette compensation ne se fasse au détriment des territoires ruraux, entraînant notamment une disparition de terres agricoles. Une équipe d'INRAE, associant écologues, juristes, économistes et sociologues, a voulu savoir si l'aide financière apportée par ces mesures compensatoires pourrait bénéficier aux agriculteurs pour les inciter à évoluer vers des pratiques agroécologiques, pratiques qui peuvent impliquer des changements coûteux et risqués. Malheureusement, les premiers résultats de l'étude montrent que l'obligation de plus-value écologique imposée par la séquence ERC n'est, pour le moment au moins, pas suffisamment respectée. Ce qui signifie que les mesures compensatoires proposées aux agriculteurs se révèlent le plus souvent insuffisantes pour les inciter à modifier leurs pratiques. Seuls les agriculteurs déjà engagés dans une démarche agroécologique y gagnent. D'un point de vue plus général, les scientifiques montrent qu'il est extrêmement difficile de compenser une perte d'habitats d'espèces protégées ou la destruction de milieux complexes. Pour cette raison, les aménageurs devraient être davantage incités à installer leurs projets sur des espaces de nature ordinaire (haies, vieilles prairies...), moins coûteux, et plus simples à compenser.



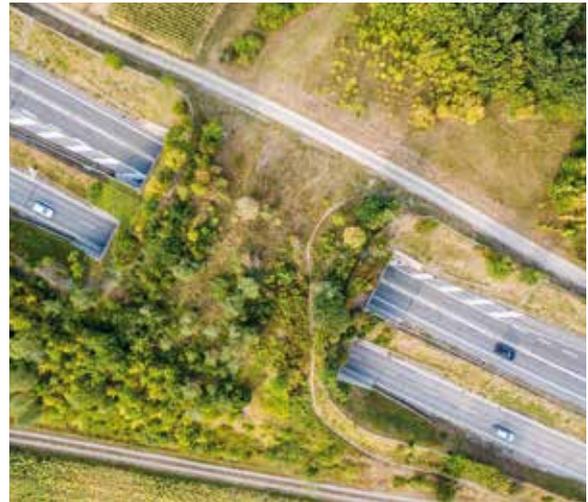


Circuler librement grâce aux trames

Petits et grands mammifères, batraciens, oiseaux, poissons, insectes et plantes souffrent du morcellement de leurs habitats, qui entrave leur circulation et leur dispersion. C'est pour rétablir cette continuité écologique qu'a été lancée la politique de la trame verte et bleue, suite au Grenelle de l'environnement de 2007. L'objectif : créer ou restaurer des corridors terrestres et aquatiques continus, permettant aux animaux de se déplacer en sécurité entre les zones essentielles à leur cycle de vie. Mais il existe d'autres corridors essentiels pour la biodiversité, et d'autres trames d'importance ont été identifiées, comme la trame noire pour les espèces nocturnes ou la trame brune pour les sols. A INRAE, les scientifiques étudient comment identifier ces trames et les freins et leviers à leur appropriation par les acteurs locaux.

Où est la trame ?

Les collectivités doivent désormais inscrire la trame verte et bleue dans leurs documents d'urbanisme. En conséquence, tout nouveau projet d'aménagement, à l'échelle du village, de la métropole ou du territoire, doit obligatoirement prendre en compte la libre circulation des espèces qui y vivent. Mais pour cela, il est évidemment nécessaire d'identifier avec précision la trame la plus pertinente pour le projet. Certains bureaux d'études peuvent fournir ce service, mais la prestation est souvent très coûteuse pour de modestes communes ou groupement de communes rurales, ou difficilement réalisable pour de petits bureaux d'études. C'est à leur attention et à celle des services techniques des collectivités qu'INRAE a développé BioDispersal, une extension du logiciel gratuit et open source QGIS, dédié à l'information géographique. Cet outil permet de calculer, à partir des données d'occupation des sols (routes, maisons, champs, haies, forêts...) la trame la plus favorable aux déplacements des animaux entre les différents réservoirs de biodiversité. Un outil qui permet ainsi de mesurer l'impact d'un aménagement sur cette continuité écologique et d'identifier où agir pour la restaurer ou la préserver.



La trame brune, l'autre corridor écologique

Moins étudiée que les trames verte et bleue, la trame brune vise à organiser la continuité écologique des sols. Essentielle en campagne, où elle permet le déplacement libre des nombreux organismes qui vivent dans les sols, elle est également précieuse en ville. Installées le long des trottoirs et connectées à des parcs ou jardins, les bandes de terre plantées d'arbres ou arbustes participent à la continuité écologique, en assurant notamment la circulation de la faune du sol. Peu travaillée, hormis pour le désherbage, la trame brune peut héberger une vaste population de vers de terre. Ces ingénieurs du sol créent des réseaux de galeries qui rendent le sol plus meuble et perméable. Ainsi, lors de violents

orages, l'eau est absorbée, limitant le ruissellement sur la chaussée. Outre ses travaux sur la transition agroécologique, qui contribuent pleinement à la trame brune par la préservation ou l'aménagement d'habitats naturels et semi-naturels, INRAE a également mis au point, avec AgroParisTech, une démarche de gestion et d'évaluation des risques liés à la pollution des sols pour accompagner les projets d'agriculture urbaine.

La trame noire : assurer des corridors d'obscurité

Avec le développement des villes et leur éclairage nocturne, un autre corridor écologique a été fragmenté : celui de l'obscurité. En effet, les lumières artificielles affectent les déplacements des animaux nocturnes, certains étant attirés par la lumière tandis que d'autres la fuient. Les scientifiques d'INRAE travaillent en appui auprès des collectivités pour assurer des corridors d'obscurité. Ils développent des outils et des méthodes cartographiques pour les identifier et accompagnent les collectivités dans des expérimentations de réduction ou d'extinction des lumières urbaines en pleine nuit.





04.

Dispositif expérimental pour préciser les stocks de carbone dans la forêt de Guyane et le bilan CO₂ entre la forêt et l'atmosphère.



Les moyens d'INRAE au service des recherches sur et pour la biodiversité

Pour étudier les milieux sur le long terme et leur évolution face aux changements globaux et également développer des solutions pour s'y adapter, INRAE dispose d'un panel d'outils et d'infrastructures dédiés à la biodiversité. Dans une politique affirmée de science ouverte, l'institut contribue au partage de données grâce à des infrastructures comme le Pôle national de données de biodiversité (PNDB) ou le Pôle de données et services pour le système Terre (Data Terra).



Contribuer aux inventaires de la biodiversité

Avec l'aide des citoyens

Pour collecter les données sur la biodiversité présente dans différents types de milieux, les scientifiques s'appuient sur des démarches variées dont les sciences participatives. INRAE a développé, seul ou en partenariat, plusieurs applications mobiles pour que les citoyens aident à l'inventaire de la biodiversité dans les forêts et les champs mais aussi dans leur jardin et en ville. Grâce à ces applications ils peuvent identifier des espèces de plantes ou d'insectes mais aussi alerter sur la présence de ravageurs ou de maladies des plantes et recevoir des conseils. Toutes les applications à retrouver sur www.inrae.fr/applis-inrae



Des outils à destination des acteurs

INRAE développe des outils d'aide à la décision à destination des gestionnaires de milieux et des agriculteurs afin de les aider à mieux prendre en compte la biodiversité dans leurs pratiques. Par exemple, l'outil Ecobordure de champs permet aux agriculteurs d'une part de déterminer la composition végétale de ces bordures et de les renseigner sur les bénéfices rendus, d'autre part d'adapter leurs pratiques pour les préserver. L'IBP (Indice de biodiversité potentielle), développé avec le CNPF (Centre national de la propriété forestière) évalue, sur la base de dix facteurs observables par les agents forestiers, la capacité d'un peuplement forestier à héberger plus ou moins d'organismes vivants. Il permet aux gestionnaires forestiers d'intégrer la biodiversité dans leurs pratiques pour la favoriser et est déjà utilisé dans plusieurs pays européens comme l'Espagne ou l'Italie.



Conserver et valoriser la diversité génétique



Serre abritant la collection de légumineuses de l'unité Agroécologie d'INRAE Bourgogne-Franche-Comté.

Les collections vivantes

Gestionnaire de ressources génétiques pour la recherche depuis de nombreuses années, INRAE est impliqué dans la gestion de Centres de ressources biologiques (CRB), un concept promu développé depuis le début des années 2000, afin d'explorer la biodiversité pour la valoriser sans l'épuiser. INRAE gère ou co-gère 28 CRB dans le cadre de l'infrastructure de recherche nationale Ressources agronomiques pour la recherche (RARE; agrobrc-rare.org). Des microorganismes (bactéries, levures...) aux arbres en passant par les plantes cultivées, les animaux domestiques et même des échantillons de sols, ces collections mettent une vaste diversité de génotypes à disposition des chercheurs pour les étudier. INRAE participe à l'exploration et la préservation de la biodiversité et des ressources génétiques dans le cadre des politiques nationales et internationales.

Les plateformes de phénotypage pour comprendre l'adaptation des espèces

Avec les changements globaux, les organismes vivants doivent faire face à des aléas de plus en plus fréquents comme les sécheresses, les hausses de température mais aussi les maladies. La diversité génétique des espèces est un véritable atout pour faire face à ces aléas et s'adapter au changement climatique. INRAE dispose de plusieurs plateformes de phénotypage (www.phenome-emphasis.fr/Installations) qui permettent d'analyser et modéliser la variabilité de la réponse génétique des plantes à différentes conditions environnementales comme la sécheresse ou les températures élevées. Les scientifiques peuvent ainsi identifier les caractères qui permettront de s'adapter au mieux aux changements environnementaux. Ils ont déjà permis d'identifier des variétés de maïs plus tardives pour pallier la chaleur et le manque d'eau des mois estivaux, que les agriculteurs utilisent.



Plateforme de phénotypage à haut-débit du laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux à Montpellier.



Etudier l'évolution des écosystèmes pour apporter des solutions

Des réseaux d'observation et d'expérimentation

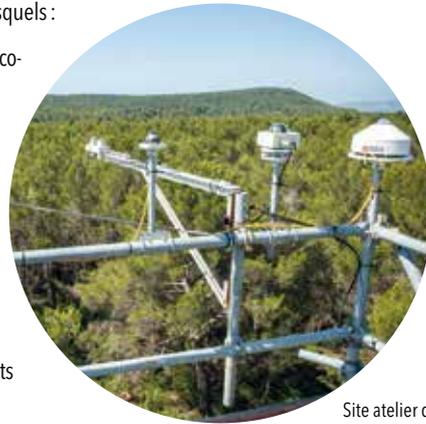
Forêts, montagnes, milieux aquatiques, glaciers, territoires ruraux... INRAE est impliqué avec de nombreux partenaires dans divers dispositifs d'observation et d'expérimentation en milieu naturel. Il y mène des recherches pluridisciplinaires pour étudier différents types d'écosystèmes afin de comprendre leur fonctionnement, l'impact des activités humaines et des changements globaux, mais aussi les services écosystémiques qu'ils fournissent et expérimenter de nouvelles pratiques de gestion. Ces dispositifs sont primordiaux pour comprendre la dynamique de la biodiversité, apporter des solutions pour les acteurs du territoire (gestionnaires, exploitants, associations...) et les accompagner dans l'amélioration de leurs pratiques de gestion. INRAE est ainsi impliqué dans plusieurs infrastructures d'expérimentation et d'observation parmi lesquels :

➤ **AnaEE France**, une infrastructure nationale d'expérimentation sur les écosystèmes continentaux terrestres et aquatiques. Il s'agit de comprendre les propriétés dynamiques de ces entités, la complexité des interactions à l'œuvre et développer le corpus fondamental nécessaire à la mise en place de mesures d'adaptation et de restauration.

➤ **In-Sylva-France**, une infrastructure nationale regroupant des réseaux d'expérimentation sur la gestion forestière pour répondre aux enjeux socio-économiques et environnementaux de l'adaptation des forêts aux changements globaux. Son originalité est de coupler les leviers sylvicoles, biogéochimiques et génétiques pour favoriser une vision intégrée de la sylviculture et d'élaborer une gestion adaptative et durable des peuplements forestiers.

➤ Les **Zones ateliers - ZA**, pilotées par le CNRS, se focalisent autour d'une unité fonctionnelle (un fleuve et son bassin versant ; les paysages, agricole ou urbain, et la biodiversité, de l'Antarctique à l'Afrique subsaharienne). En s'appuyant sur des observations et expérimentations sur des sites ateliers, les scientifiques y mènent des recherches pluridisciplinaires sur le long terme en relation directe avec les acteurs du territoire.

➤ L'**Observatoire de la zone critique - OZCAR**, une infrastructure de recherche nationale dédiée à l'observation et à l'étude du fonctionnement des surfaces continentales, des sous-sols à la basse atmosphère, depuis les hauts reliefs jusqu'aux régions côtières.



Site atelier de Font-Blanche.

Hauts plateaux du Vercors, zone atelier des Alpes.





Verger rond de Gotheron.

Des infrastructures pour accompagner la transition agroécologique

Afin de préserver la biodiversité et faire face aux changements globaux, il est essentiel d'accompagner les systèmes agricoles vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement, tout en maintenant les rendements de production. Pour développer des pratiques agroécologiques, INRAE s'appuie sur ses unités expérimentales dont certaines portent, en lien avec les unités de recherche et divers partenaires, divers dispositifs originaux. Parmi ceux-ci, la plateforme CA-SYS d'Epoisses, en Bourgogne, co-construite avec les agriculteurs, conçoit et évalue des pratiques agroécologiques à l'échelle d'une exploitation entière. Le verger rond de Gotheron utilise tous les atouts de la biodiversité des plantes pour concevoir un verger qui limite l'arrivée, la progression et l'installation des bioagresseurs. Le dispositif OASYS à Lusignan a pour objectif de développer des systèmes bovins laitiers agroécologiques en expérimentant l'implantation d'arbres dans les prairies qui fournissent nourriture et ombrage aux animaux. Enfin, le dispositif ACBB s'appuie sur quatre sites expérimentaux pour étudier les évolutions à long terme des interactions sol-végétation, des systèmes de rotation culture-prairie, des prairies naturelles et des grandes cultures. Par ailleurs des sites ateliers sont mis en place en partenariat avec des acteurs de terrain comme par exemple le site atelier Bacchus, ancré dans les territoires viticoles de Nouvelle-Aquitaine et coordonné par INRAE, qui s'intéresse à la dynamique de la biodiversité et des services associés dans les paysages viticoles et qui facilite notamment le développement et la mise en œuvre de solutions agroécologiques innovantes en collaboration directe avec les viticulteurs.



Plateforme CA-SYS d'Epoisse.



Dispositif OASYS à Lusignan.



Glossaire

Agriculture biologique : système de production agricole qui exclut l'usage de la plupart des produits de synthèse et limite l'emploi d'intrants dans le souci du respect des équilibres naturels.

Agriculture conventionnelle : système de production agricole fondé sur l'optimisation des rendements notamment par l'apport d'intrants (fertilisants organiques et minéraux, pesticides).

Agriculture de conservation : système de production agricole qui vise à préserver les fonctions écologiques des sols par la suppression du travail du sol, la mise en place d'une couverture (végétale ou organique) permanente du sol ainsi que la diversification de la rotation culturale.

Altérations hydromorphologiques : modifications physiques de la forme des cours d'eau dues, notamment, aux aménagements humains.

Bryophytes : plantes sans fleurs ni racines, incluant les mousses, dont certaines sont exclusivement inféodées aux forêts.

Champignons lignicoles : champignons qui se développent à la surface ou à l'intérieur du bois.

Compétitivité d'une espèce : capacité d'une espèce à acquérir et utiliser efficacement une ressource limitée, sa résistance face à une diminution de cette ressource, mais aussi sa capacité à réduire la disponibilité de la ressource pour ses voisins.

Conditions pédoclimatiques : ensemble des conditions extérieures au niveau du sol affectant une plante.

DCE : la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) prévoit une évaluation régulière de l'état écologique des masses d'eau, basée sur le contrôle de différents indicateurs de la qualité biologique, tels que les invertébrés, les végétaux (phytoplancton et macrophytes) et les poissons.

Disservice écosystémique : nuisance ou effet négatif des écosystèmes sur le bien-être de la société et des individus.

Diversité intraspécifique : diversité génétique au sein d'une même espèce.

Eucaryotes : organismes dont les cellules sont dotées d'un noyau et d'autres structures protégées par une membrane. Les animaux, végétaux et champignons, sont des eucaryotes.

Eutrophisation : déséquilibre des écosystèmes aquatiques déclenché par des apports excessifs en nutriments, souvent d'origine anthropique. Les manifestations les plus connues sont l'apparition de cyanobactéries toxiques dans les lacs et les cours d'eau, et les proliférations de macroalgues vertes dans les zones côtières.

Groupe taxonomique : ensemble d'espèces partageant des critères spécifiques définis et un même ancêtre commun.

Hydrophytes : plantes immergées ou à feuilles flottantes, ou encore flottant librement à la surface des eaux.

Intrants azotés : ce sont les engrais, d'origine organique ou minérale, majoritairement composés d'azote, utilisés pour améliorer le rendement des cultures. Exemples : fumier, lisier, guano, engrais azotés de synthèse.

Lidars : dispositif de mesure à distance fondé sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière laser renvoyé vers son émetteur.

Marges proglaciaires : zones de transition entre le glacier et la région déglacée située à l'extrémité aval du glacier.

Métagénomique : méthode d'étude du contenu génétique d'échantillons issus d'environnements complexes (ex : intestin, océan, sols, air, etc.). Parfois aussi dénommée génomique environnementale.

Métaprogramme : dispositif original d'animation et de programmation scientifique propre à INRAE et combinant des approches systémiques et interdisciplinaires pour répondre aux défis scientifiques et sociétaux.

Placettes : sites de quelques dizaines de m² localisés avec précision et inventoriés de manière répétée.

Poissons amphihalins : espèces de poissons, telles que le saumon, l'anguille ou l'alose, qui migrent de l'eau de mer à l'eau douce, ou/et inversement au cours de leur cycle biologique.

Pressions abiotiques : pressions dues à des facteurs non vivants (par exemple catastrophes naturelles, modifications de la composition chimique de l'environnement, de la température, etc.).

Pressions biotiques : pressions exercées par les autres êtres vivants appartenant à l'écosystème (prédateurs, parasites, compétiteurs).

Région bioclimatique : zone géographique dotée d'un climat spécifique déterminant la faune et la flore qui s'y développent spontanément.

Reméandrage : remettre un cours d'eau dans ses anciens méandres ou créer un nouveau tracé avec des profils variés, pour redonner au cours d'eau une morphologie sinueuse se rapprochant de son style fluvial naturel.

Réseau ACBB (Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques, Biodiversité) : réseau de sites d'observation et d'expérimentation conçu pour capter les évolutions à pas de temps long (> 20 ans) du système sol-végétation, de son environnement et des différentes rétroactions qui les gouvernent.

Réseau de Mesure de la Qualité des Sols-RMQS : créé en 2000, le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols échantillonne tous les 15 ans les sols de 2240 parcelles réparties uniformément sur le territoire, afin de suivre l'évolution sur le long terme des propriétés des sols, dans leurs différentes dimensions (biologique, chimique et physique), en lien notamment avec les activités humaines, pour tout type d'usage des sols.

Réseaux trophiques : ensemble des interactions d'ordre alimentaire au sein d'un écosystème qui permettent la circulation de la biomasse et de l'énergie.

Ripisylve : formations boisées qui se développent le long des rives des cours d'eau ou plans d'eau.

Services écosystémiques : bénéfices retirés par l'être humain des ressources naturelles produites par les écosystèmes. Ils permettent de faire le lien entre un système social et un système écologique.

Trame verte et bleue : projet issu du Grenelle de l'Environnement de 2007, la trame verte et bleue vise à créer ou restaurer des corridors écologiques, afin de permettre aux espèces animales et végétales terrestres et aquatiques, de se déplacer librement, et en sécurité, pour effectuer les étapes importantes de leur cycle de vie. Les collectivités françaises doivent désormais inscrire la trame verte et bleue dans leurs documents d'urbanisme. Le terme d'infrastructures vertes (et bleues) est plus générique au niveau international.

Zones humides : milieux habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire.



Contacts scientifiques

Coordinateur scientifique

Thierry Caquet / thierry.caquet@inrae.fr
Directeur scientifique Environnement

01. Etats des lieux de la biodiversité et des milieux naturels

Coup de pouce à la résilience

Björn Reineking / bjoern.reineking@inrae.fr
UR « Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne » (LESSEM) / Dpts ECODIV et ACT / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Mobilité des animaux :

il faut montrer patte blanche!

Björn Reineking / bjoern.reineking@inrae.fr
UR « Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne » (LESSEM) / Dpts ECODIV et ACT / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes
Eric Petit / eric.petit@inrae.fr
UMR « Ecologie et Santé des Ecosystèmes » (ESE) / Dpt ECODIV / INRAE Bretagne-Normandie

Les temps sont durs pour les abeilles domestiques

Cédric Alaux / cedric.alaux@inrae.fr
UR « Abeilles et environnement » (AE) / Dpt SPE / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Coup de chaud sur la glace

Sophie Cauvy-Fraunié / sophie.cauvy-fraunie@inrae.fr
UR « Fonctionnement des hydrosystèmes » (RiverLy) / Dpt AQUA / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Péril dans l'estuaire

Jérémy Lobry / jeremy.lobry@inrae.fr
UR « Ecosystèmes aquatiques et changements globaux » (EABX) / Dpt AQUA / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Montre-moi ton ADN, je te dirai où tu vas

Isabelle Domaizon / isabelle.domaizon@inrae.fr
UMR « Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques » (CARTELM) / Dpt AQUA / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

La biodiversité vue du ciel

Samuel Alleaume / samuel.alleaume@inrae.fr
Sandra Luque / sandra.luque@inrae.fr
UMR « Territoires, Environnement, Télédétection et Informations Spatiales » (TETIS) / Dpt ACT / INRAE Occitanie-Montpellier

Le fleuve n'a pas une vie tranquille

Thibault Datry / thibault.datry@inrae.fr
UR « Fonctionnement des hydrosystèmes » (RiverLy) / Dpt AQUA / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

La forêt amazonienne : une biodiversité phénoménale!

Myriam Heuertz / myriam.heuertz@inrae.fr
UMR « Biodiversité, Génès et Communautés » (BIOGECO) /

Dpt ECODIV / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux
Heidy Schimann / heidy.schimann@inrae.fr
UMR « Ecologie des Forêts de Guyane » (ECOFOG) / Dpt ECODIV / INRAE Antilles-Guyane

Réaction en chêne

Antoine Kremer / antoine.kremer@inrae.fr
Christophe Plomion / christophe.plomion@inrae.fr
UMR « Biodiversité, Génès et Communautés » (BIOGECO) / Dpt ECODIV / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Les sols forestiers : notre assurance environnementale

Marc Buée / marc.buee@inrae.fr
Sébastien Duplessis / sebastien.duplessis@inrae.fr
Stéphane Uroz / stephane.uroz@inrae.fr
UMR « Interactions Arbres/Micro-organismes » (IaM) / Dpt ECODIV / INRAE Grand Est-Nancy

02. La biodiversité : source de solutions

Les services écosystémiques

Françoise Lescourret / francoise.lescourret@inrae.fr
UR « Plantes et Systèmes de Culture Horticoles » (PSH) / Dpts AGROECOSYSTEM et SPE / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur
Danièle Magda / danièle.magda@inrae.fr
UMR « Agroécologie, Innovations, territoires » (AGIR) / Dpts AGROECOSYSTEM et ACT / INRAE Occitanie-Toulouse

Les insectes aquatiques : ces alliés méconnus

Jean-Marc Roussel / jean-marc.roussel@inrae.fr
UMR « Ecologie et Santé des Ecosystèmes » (ESE) / Dpt ECODIV / INRAE Bretagne-Normandie

L'or brun : la richesse dans la complexité des sols

Pascal Carrere / pascal.carrere@inrae.fr
UMR sur l'écosystème prairial (UREP) / Dpt ECODIV / INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Une trame nommée Désir

Philip Roche / philip.roche@inrae.fr
UMR « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER) / Dpt ECODIV / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

La diversité, source d'adaptation et levier de la résilience

Bruno Fady / bruno.fady@inrae.fr
Ivan Scotti / ivan.scotti@inrae.fr
UR « Ecologie des Forêts Méditerranéennes » (URFM) / Dpt ECODIV / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Les forêts mélangées

Bernard Prevosto / bernard.prevosto@inrae.fr
UMR « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER) / Dpt ECODIV / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur
Thomas Perot / thomas.perot@inrae.fr
UR « Ecosystèmes forestiers » (EFNO) / Dpt ECODIV / INRAE Val-de-Loire

On ne met pas tous ses œufs dans le même panier

Michèle Tixier-Boichard / michèle.boichard@inrae.fr
UMR « Génétique Animale et Biologie Intégrative » (GABI) / Dpt GA / INRAE Ile-de-France-Jouy-en-Josas-Antony

La mixité, c'est bon pour la santé

Bertrand Dumont / bertrand.dumont@inrae.fr
Frédéric Joly / frederic.joly@inrae.fr
UMR sur les herbivores (UMRH) / Dpt PHASE / INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

La diversité, oui, mais pas à tout prix

Hélène Fréville / helene.freville@inrae.fr
UMR « Institut Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes méditerranéennes et Tropicales » (AGAP) / Dpt BAP / INRAE Occitanie-Montpellier

Les plantes de culture, bio-herbicides par nature

Sabrina Gaba / sabrina.gaba@inrae.fr
USC « Centre d'études biologiques de Chizé » (CEBC) / Dpt SPE / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Poitiers

Les nombreux atouts des bandes fleuries

Antoine Gardarin / antoine.gardarin@inrae.fr
UMR Agronomie / Dpt AGROECOSYSTEM / INRAE Ile-de-France-Versailles-Grignon

La nature, source de solutions

Freddy Rey / freddy.rey@inrae.fr
UR « Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne » (LESSEM) / Dpts ECODIV et ACT / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

03. De la connaissance à l'action et la gestion durable des milieux

Les sentinelles écologiques, dans les rivières

Frédéric Rimet / frederic.rimet@inrae.fr
UMR « Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques » (CARTELM) / Dpt AQUA / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Les sentinelles écologiques, dans les lacs

Christine Argillier / christine.argillier@inrae.fr
UMR « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER) / **Dpt** AQUA / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Les sentinelles écologiques, dans les sols

Antonio Bispo / antonio.bispo@inrae.fr
US Infosol, Centre national de ressources sur les sols / **Dpt** AGROECOSYSTEM / INRAE Val-de-Loire
Mickaël Hedde / mickael.hedde@inrae.fr
UMR « Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et Agrosystèmes » (Eco&Sols) / **Dpt** AGROECOSYSTEM / INRAE Occitanie-Montpellier

Les sentinelles écologiques, dans les forêts

Frédéric Gosselin / frederic.gosselin@inrae.fr
UR « Ecosystèmes forestiers » (EFNO) / **Dpt** ECODIV / INRAE Val-de-Loire

Le végétal, plus fort que le minéral

André Evette / andre.evette@inrae.fr
UR « Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne » (LESSEM) / **Dpts** ECODIV et ACT / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

L'herbe est (vraiment) plus verte dans le pré d'à côté

Thomas Spiegelberger / thomas.spiegelberger@inrae.fr
UR « Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne » (LESSEM) / **Dpts** ECODIV et ACT / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Restaurer la continuité des cours d'eau

Céline Le Pichon / celine.lepichon@inrae.fr
UR « Hydrosystèmes continentaux anthropisés : ressources, risques, restauration » (HYCAR) / **Dpt** AQUA / INRAE Ile-de-France-Juy-en-Josas-Antony
Jean-Marc Roussel
UMR « Ecologie et Santé des Ecosystèmes » (ESE) / **Dpt** ECODIV / INRAE Bretagne-Normandie

Une arche de biodiversité

Samuel Westrelin / samuel.westrelin@inrae.fr
UMR « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER) / **Dpt** AQUA / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Protéger les espèces des rivières aux océans

Patrick Lambert / patrick.lambert@inrae.fr
UR « Ecosystèmes aquatiques et changements globaux » (EABX) / **Dpt** AQUA / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux
Marie Nevoux / marie.nevoux@inrae.fr
UMR « Ecologie et Santé des Ecosystèmes » (ESE) / **Dpt** ECODIV / INRAE Bretagne-Normandie
Etienne Prevost / etienne.prevost@inrae.fr
UMR « Ecologie Comportementale et Biologie des Populations de Poissons » (ECOBIO) / **Dpt** ECODIV / INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Combattre les envahisseurs

Pierre Courtois / pierre.courtois@inrae.fr
UMR « Centre d'Economie de l'Environnement Montpellier » (CEE-M) / **Dpt** ECOSOCIO / INRAE Occitanie-Montpellier

La belle est une bête

Fanny Dommaget / fanny.dommaget@inrae.fr
UR « Laboratoire des écosystèmes et sociétés en montagne » (LESSEM) / **Dpts** ECODIV et ACT / INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Le juste prix des aides publiques

Sylvain Chabé-Ferret / sylvain.chabe-ferret@inrae.fr
UMR « Toulouse school of economics » (TSE-R) / **Dpt** ECOSOCIO / INRAE Occitanie-Toulouse

La séquence ERC pour concilier aménagements et biodiversité

Isabelle Doussan / isabelle.doussan@inrae.fr
USC « Groupe de recherche en droit, économie et gestion » (CREDECO-GREDEG) / **Dpt** ECOSOCIO / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Circuler librement grâce aux Trames

Sylvie Vanpeene / sylvie.vanpeene@inrae.fr
UMR « Risques, Ecosystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience » (RECOVER) / **Dpt** ECODIV / INRAE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Antonio Bispo / antonio.bispo@inrae.fr
US Infosol, Centre national de ressources sur les sols / **Dpt** AGROECOSYSTEM / INRAE Val-de-Loire

Mickaël Hedde / mickael.hedde@inrae.fr
UMR « Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols et Agrosystèmes » (Eco&Sols) / **Dpt** AGROECOSYSTEM / INRAE Occitanie-Montpellier

Jennifer Amsallem / jennifer.amsallem@inrae.fr
UMR « Territoires, Environnement, Télédétection et Informations Spatiales » (TETIS) / **Dpt** ACT / INRAE Occitanie-Montpellier

04. Les moyens d'INRAE au service des recherches sur et pour la biodiversité

Les collections vivantes

Michèle Tixier-Boichard / michele.boichard@inrae.fr
UMR « Génétique Animale et Biologie Intégrative » (GABI) / **Dpt** GA / INRAE Ile-de-France-Juy-en-Josas-Antony

Les plateformes de phénotypage pour comprendre l'adaptation des espèces

François Tardieu / francois.tardieu@inrae.fr
UMR « Laboratoire d'Ecophysiologie des Plantes sous Stress environnementaux » (LEPSE) / **Dpt** BAP /

Dpt / Département scientifique

UMR / Unité mixte de recherche

UR / Unité de recherche

US / Unité de service

USC / Unité sous contrat



Centre-siège Paris-Antony
Service Presse
Tél.: +33 (0)1 42 75 91 86
presse@inrae.fr

Rejoignez-nous sur:



[inrae.fr/presse](https://www.inrae.fr/presse)

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE