

Biodiversité : les chercheurs engagés

Julien Pottier

▶ **To cite this version:**

Julien Pottier. Biodiversité : les chercheurs engagés. 2019. hal-02944525

HAL Id: hal-02944525
https://hal.inrae.fr/hal-02944525

Submitted on 21 Sep 2020

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

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



dossier de
PRESSE

INRAE

Biodiversité : les chercheurs engagés

01. Concevoir des paysages agro-écologiques 4

02. Scruter l'écologie des communautés 11

03. Comprendre la dynamique des populations 22

04. Cultiver la diversité génétique 26

Contacts scientifiques 38

Biodiversité : les chercheurs engagés

Du 29 avril au 4 mai 2019, la France a accueilli la 7e session plénière de l'IPBES, la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques. L'objectif de cette réunion du « GIEC de la biodiversité » : valider la toute première évaluation internationale de la biodiversité et des services écosystémiques. Cette réunion est aussi une étape clé dans la perspective de la 15e conférence internationale sur la diversité biologique de 2020. Si les enjeux portés par l'IPBES sont majeurs en termes de protection et de conservation de la nature, ils le sont tout autant dans les domaines culturel, économique, alimentaire et sanitaire.

D'ores et déjà, le constat est alarmant : mammifères, oiseaux, insectes (notamment pollinisateurs)... de nombreux groupes d'espèces sont affectés par l'érosion de leur diversité et de leur abondance. A tel point que certains n'hésitent plus à parler de « 6e extinction », par référence aux 5 épisodes majeurs qui se sont déroulés au cours des 500 derniers millions d'années. Si le terme fait débat, il y a par contre un large consensus sur le déclin de nombreuses populations. Dans ce contexte, le rôle de la communauté scientifique est essentiel et précieux, non seulement pour documenter et comprendre les phénomènes en cours mais aussi alerter et éclairer l'action publique.

INRAE, membre fondateur de la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, est un acteur engagé dans les questions de recherche sur la biodiversité. L'agriculture au sens large fait partie des pressions qui s'exercent sur la biodiversité du fait notamment de changements d'usage des terres (déforestation, drainage...) ou de l'usage d'intrants. Mais la biodiversité, moteur des agroécosystèmes, est aussi au cœur de la production agricole. Au cours des 20 dernières années, la vision de l'Institut a évolué et les scientifiques considèrent aujourd'hui la biodiversité comme un atout dans les transitions nécessaires, en lien avec la production alimentaire, la gestion des espaces ruraux et forestiers ou des ressources associées. Leurs travaux permettent de documenter les services rendus par la biodiversité à l'agriculture mais aussi de mieux intégrer biodiversité et agriculture dans les systèmes agri-alimentaires, en cohérence avec le développement de l'agro-écologie, qui impose notamment de reconsidérer le rôle de la biodiversité à tous les niveaux (du gène au paysage). Le vivant et la biodiversité sont de fait au cœur de la reconception des agroécosystèmes.

Parce que la biodiversité englobe toutes les formes du vivant, ce dossier illustre la pluridisciplinarité des travaux d'INRAE à différentes échelles : depuis les paysages, les écosystèmes, les espèces et jusqu'aux gènes, qu'il s'agisse de diversité génétique au sein d'une même espèce (intra-spécifique) ou entre espèces différentes (inter-spécifique). Ces quatre chapitres mettent en avant des résultats marquants sur la dynamique de la biodiversité et ses rôles fonctionnels, obtenus grâce à des recherches qui font appel non seulement à l'écologie et aux autres disciplines biologiques, mais aussi aux sciences du numérique ou aux sciences humaines et sociales.

Les chercheurs sont mobilisés. Ils proposent de nouvelles pistes qui visent à relever le défi de la reconquête de la biodiversité pour des agricultures et des forêts plus durables et mieux adaptées aux conséquences des changements globaux, dont le changement climatique.



01.

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

Concevoir des paysages agro-écologiques

Pour faire face aux enjeux majeurs que constituent notamment la restauration de la biodiversité et l'adaptation au changement climatique, l'agriculture doit se réinventer. Fortement mobilisés dans cette démarche, les chercheurs d'INRAE s'appuient sur les acteurs de terrain, agriculteurs, conseillers techniques, forestiers, pour concevoir, tester et évaluer des techniques innovantes, mais réévaluer aussi des pratiques plus anciennes, pouvant permettre de réduire sensiblement l'usage des produits phytosanitaires et d'autres intrants, voire de les supprimer, sans nécessairement avoir un impact sur la productivité et les rendements.

Le réseau SEBIOPAG

C'est une initiative inédite par son ampleur et les moyens mobilisés. Le réseau SEBIOPAG s'est donné pour objectif d'évaluer, sur le long terme, l'impact de la composition du paysage et des pratiques agricoles sur le potentiel de régulation des bio-agresseurs par les populations d'auxiliaires. Depuis 2014, des équipes réparties dans cinq régions (Armorique, Vallées et Coteaux de Gascogne, Plaine et Val de Sèvre, Vergers et Basse Vallée de la Durance, Plaine de Saône), étudient, à partir d'un protocole commun, le fonctionnement et l'évolution de parcelles de cultures annuelles ou pérennes (vergers), disséminées dans des paysages d'un kilomètre de diamètre. Ils contrôlent notamment le niveau de prédation des bioagresseurs en fonction de l'utilisation de pesticides et de l'organisation du paysage, grâce à des proies sentinelles (pucerons, graines d'adventices, œufs de lépidoptères) disposées dans chacune des 100 parcelles du réseau. Surtout, les chercheurs collectent l'ensemble des informations relatives aux pratiques agricoles, et notamment la fréquence, la quantité et le type de produits phytosanitaires utilisés. Et comme le suivi s'effectue sur plusieurs années, là encore c'est inédit, les données recueillies prennent aussi bien en compte les effets de la séquence de rotation des cultures annuelles, que l'influence de la météo sur la dynamique et la stabilité à moyen et long termes des populations d'auxiliaires. Recueillir de tels jeux de données est un processus long et parfois délicat, mais le jeu en vaut la chandelle. L'étude démontre ainsi que si la composition du paysage qui entoure la parcelle influe sur l'intensité du contrôle biologique dont elle peut profiter, cette influence est largement affectée par la pression en pesticides exercée sur la parcelle. Cela implique que pour optimiser les effets du biocontrôle, il faut envisager le paysage dans son ensemble, et non pas traiter indépendamment la parcelle et les milieux semi-naturels pouvant servir de refuge aux auxiliaires. Une suite envisagée pour la valorisation du réseau SEBIOPAG consiste à exploiter l'ensemble des données pour développer un modèle spatial permettant de tester des scénarios, co-construits avec les acteurs locaux, de changement des séquences de rotation des cultures ou d'augmentation de la diversité des espèces cultivées, et d'observer les effets sur le contrôle biologique à l'échelle d'un paysage.



Le verger rond de Gotheron

Produire des fruits avec zéro traitement pesticide, voilà l'ambitieux défi que se sont fixés les chercheurs d'INRAE impliqués dans le Projet Z à Gotheron (Drôme). La méthode utilisée pour y parvenir repose sur la diversité des plantes dans l'espace de production et leur organisation spatiale, conçues pour limiter l'arrivée, la progression, l'installation et l'impact des bioagresseurs. Première surprise, le verger de 1,5 hectare est rond, une forme choisie pour limiter la surface d'échange avec l'extérieur. Il est cerné par une double-haie de 500 mètres de long, notamment constituée d'amandiers et de châtaigniers qui, en plus de son effet brise-vent, est conçue pour retarder la progression des ravageurs. Et en éliminer une partie, puisque des nichoirs à mésanges, des perchoirs à rapaces et des tas de pierres pour accueillir les belettes, sont installés le long de cette première barrière. Les bioagresseurs qui la franchissent parviennent à un rang circulaire de pommiers qui jouent le rôle de piège, en retenant les pucerons attirés par ce fruit. Les rescapés sont ensuite confrontés à une autre barrière, constituée d'arbres fruitiers variés. Notamment des espèces prospectives, telle que la grenade, étudiées dans le contexte du changement climatique. Ce dernier cercle doit protéger les pommiers, pêchers, pruniers et abricotiers situés sur les rangs intérieurs où se concentre l'essentiel de l'espace de production. Les variétés ont été choisies pour leur résistance naturelle aux maladies. Dans cette zone, des plantes attractives et répulsives seront bientôt plantées à intervalles réguliers, afin de piéger les insectes qui parviendraient à franchir les obstacles précédents. Des légumineuses sont aussi présentes, qui assureront la fertilité du sol. Enfin, le centre du verger est constitué d'une mare et d'une zone semi-sauvage qui constituent un précieux réservoir de biodiversité fonctionnelle. Le verger, qui vient d'être installé, arrivera à maturité dans cinq ans et sera évalué durant au moins dix années supplémentaires. Durant tout ce temps, les chercheurs d'INRAE vont contrôler l'impact de l'agencement spatial sur la maîtrise des bioagresseurs, et produire des connaissances sur la façon de construire un tel système. Il est en effet probable que des modifications de l'organisation du verger soient nécessaires, afin d'optimiser l'efficacité de l'ensemble des dispositifs.



De l'importance des habitats semi-naturels

On le répète souvent, la conservation ou le rétablissement d'habitats non cultivés aux abords des parcelles est essentiel pour assurer une bonne régulation des bioagresseurs par les auxiliaires, leurs ennemis naturels. Mais est-ce toujours vrai ? Pour le vérifier, des chercheurs d'INRAE ont participé à une vaste étude internationale dans laquelle ont été analysés les résultats de 132 études incluant l'observation de 18 000 ennemis naturels présents dans 6 759 sites distribués dans 31 pays répartis à la surface du globe. Et ce qui ressort de cette méta-analyse, c'est qu'il existe une grande variabilité d'effets induits par les habitats semi-naturels sur la dynamique des populations d'auxiliaires et leur activité de régulation des bioagresseurs avec des effets positifs mais aussi négatifs ou nuls. Un exemple peut illustrer cette conclusion : les cultures annuelles, qui sont régulièrement perturbées (par le travail du sol, la rotation des cultures, ou encore l'usage d'intrants chimiques), sont des zones qui peuvent servir de refuge aux ennemis naturels des bioagresseurs. En revanche, la présence d'habitats semi-naturels à proximité de cultures pérennes, comme la vigne par exemple, a parfois moins d'importance et peut même s'avérer contre-productive pour certains groupes d'ennemis naturels. L'une des raisons pour expliquer ce paradoxe réside dans le fait qu'en culture pérenne certains auxiliaires, tels que les araignées, sont à même de s'installer durablement dans les parcelles, où ils trouvent une bonne partie des ressources qui leur sont nécessaires. Dans ce cas, bien plus que la présence d'habitats semi-naturels (qui restent des habitats importants pour d'autres groupes comme les oiseaux ou les chauves-souris par exemple), ce sont les pratiques agricoles dans le paysage qui vont déterminer la diversité et l'abondance des auxiliaires, et notamment la présence de parcelles conduites en agriculture biologique. Mais il existe aussi d'autres raisons qui pourraient expliquer cette importante variabilité comme certaines caractéristiques des espèces (à savoir généralistes ou spécialistes, capacité de dispersion, etc.), que les chercheurs s'efforcent maintenant d'identifier et de quantifier. D'ici quelques années, ils seront capables de quantifier le potentiel de régulation naturelle d'un paysage donné, d'identifier les situations préoccupantes et de proposer les aménagements permettant d'améliorer le service de régulation naturelle fourni par les communautés d'auxiliaires.



Araignée, *Pisaura mirabilis*, mangeant un cercope.



Domaine INRAE d'Epoisses, Bourgogne Franche-Comté.

Un domaine expérimental tout entier dédié à l'agro-écologie

Et si on laissait la biodiversité nous montrer ce dont elle est capable ? C'est tout l'objet de la plateforme d'expérimentation CA-SYS, lancée l'an dernier au domaine INRAE d'Epoisses. Co-construite entre les agriculteurs, les conseillers agricoles et les chercheurs d'INRAE, elle a pour objectif de concevoir, mettre en œuvre et évaluer deux grandes voies agricoles qui se réclament de l'agro-écologie. L'une privilégiant le semis direct s'inspirant de l'agriculture de conservation des sols, l'autre s'autorisant le travail du sol et se rapprochant de l'agriculture biologique. Et surtout, dans les deux voies en faisant l'impasse sur tous les produits phytosanitaires. Un défi supplémentaire, car les exploitants qui pratiquent le semi direct, dans le cadre de l'agriculture de conservation visant à préserver la biodiversité des sols, n'ont aujourd'hui pas d'alternative à l'emploi du glyphosate, pour détruire le couvert végétal et les adventices implantés entre deux cultures. Alors pour mettre toutes les chances de leur côté, les chercheurs misent, en plus de ces pratiques agricoles, sur les infrastructures agro-écologiques. Ainsi, des bandes fleuries et enherbées ont été plantées autour des parcelles réparties sur les 125 hectares du site expérimental. Ces réservoirs de biodiversité accueilleront les populations d'auxiliaires indispensables, en l'absence d'intrants chimiques, à la régulation des ravageurs. Elles serviront aussi de refuge et de source de nourriture pour les insectes pollinisateurs. Ces habitats semi-naturels représentent 12 % de la surface totale du site expérimental CA-SYS. On serait tenté de dire que ce sont donc 12 % de production en moins pour l'agriculteur. Mais pour les chercheurs, la perte de revenu pourrait être limitée premièrement par la baisse des charges liées à l'emploi de produits phytosanitaires, et deuxièmement par des rendements acceptables liés à une régulation biologique active. Pour vérifier cela, des suivis sont faits chaque année. Des proies sentinelles (pucerons, larves, graines d'adventice…) seront positionnées dans les champs pour contrôler l'activité des auxiliaires. Alors bien sûr, tout miser sur la biodiversité est un sacré risque, que seul un domaine expérimental peut se permettre de prendre. Mais les chercheurs sont confiants. La preuve, ils se sont fixés comme objectif une rentabilité comparable à celle des systèmes agricoles classiques dans un délai de dix ans.



La diversité cachée, à étudier sans délai

Le projet Floris étudie l'impact des pratiques agricoles et des changements globaux sur la diversité végétale des prairies permanentes. Dans cette démarche, les chercheurs d'INRAE s'intéressent plus précisément au rôle du pool d'espèces composé de l'ensemble des espèces de la flore régionale qui peuvent « potentiellement » s'installer et se maintenir dans une communauté locale, parce que les conditions abiotiques leur conviennent. Toutes ces espèces ne sont pas présentes dans la communauté car certaines en sont définitivement exclues par la compétition ; d'autres ne figurent dans la prairie que sous forme de graines ou de bourgeons végétatifs enfouis dans le sol. Ce pool d'espèces, qui comprend à la fois des espèces visibles et la « diversité cachée », constitue l'un des premiers déterminants de l'assemblage des communautés et de leur capacité à évoluer, en fonction des pratiques agricoles ou des changements environnementaux. Afin d'étudier l'impact de ces perturbations, les chercheurs utilisent des modèles qui leur permettent de prédire la probabilité d'occurrence des espèces en fonction de paramètres donnés de l'environnement. Et ainsi estimer quelles peuvent être les conséquences, pour l'assemblage des communautés, de l'accroissement de la température moyenne à l'échelle d'un territoire. Par exemple, quelles nouvelles espèces pourraient le coloniser et lesquelles pourraient disparaître. Par ces travaux, les chercheurs s'efforcent d'appréhender la structure de cette diversité cachée, dans le but de comprendre la biodiversité des prairies d'aujourd'hui, et d'estimer son évolution future face aux changements globaux.

BIOFOR, un brainstorming autour de la forêt

Dans le cadre de l'axe d'animation scientifique BIOFOR (Biodiversité des forêts rurales et des milieux semi-naturels dans les paysages), les chercheurs d'INRAE mènent des travaux qui contribuent à la mise en œuvre d'une gestion durable des forêts et à une meilleure connaissance des interactions entre les forêts et les espaces agricoles. La multiplicité des groupes taxonomiques étudiés (coléoptères saproxyliques, carabes, syrphes, oiseaux, flore) et des situations forestières (plantations, vieilles forêts, forêts rurales) a suscité la création d'un axe « forêt », porteur de réflexions qui dépassent le cadre de chaque projet. L'enjeu est non seulement d'élaborer des articles de synthèse, mais également de confronter les divers résultats aux hypothèses et théories en cours pour faire émerger des questionnements et des projets de recherche. Plusieurs travaux menés à INRAE relèvent de deux grandes problématiques forestières actuelles : l'évaluation et le suivi de la biodiversité d'une part, l'influence des pratiques forestières sur la conservation de la biodiversité taxonomique (dont certaines espèces protégées) d'autre part. Depuis une vingtaine d'années, la multiplication des travaux sur les indicateurs de biodiversité reflète leur complexité et la diversité de leurs usages. Classiquement, on distingue les indicateurs directs (ou taxonomiques) qui se focalisent sur le suivi de certains taxons, et les indicateurs indirects (ou structurels) qui reposent sur l'idée qu'il existe des variables de composition et de structure qui contrôlent la dynamique de la biodiversité. Les indicateurs indirects ont l'avantage d'être directement liés à la gestion forestière et peuvent conduire au développement d'outils d'aide à la décision. La composition et la structure d'un peuplement sont en effet en grande partie le reflet des opérations sylvicoles. Le développement d'outils de simulation devrait permettre aux chercheurs de mieux appréhender l'incidence de certaines pratiques agricoles sur la biodiversité, et d'identifier les moyens permettant de parvenir à un équilibre entre production et conservation.



Parcelle d'expérimentation en agroforesterie sur le domaine de Restinclières, associant une culture de céréale (orge) à une plantation de noyers hybrides.

Les oiseaux prairiaux, objets de toutes les attentions



Nid de Vanneau huppé.

L'intérêt de la biodiversité ne se mesure pas à l'aune des services écosystémiques rendus. Dans bien des cas, elle doit être protégée simplement parce qu'elle a le mérite d'être là. Par exemple : le Vanneau huppé et le Chevalier gambette ; ces deux élégants échassiers limicoles fréquentent les prairies du Marais poitevin depuis des centaines d'années. Au point qu'ils sont devenus, au fil des siècles, presque totalement dépendants des pâturages agricoles. Ainsi, le Vanneau huppé niche sur le sol des prairies, bien que ses œufs soient menacés de piétinement par les troupeaux qui s'y nourrissent. S'il s'y installe malgré tout, c'est parce que, paradoxalement, ce pâturage est indispensable à l'espèce. En effet, les poussins, qui sortent du nid dès la naissance, ont besoin d'une herbe rase pour se déplacer aisément et trouver leur nourriture. Ces oiseaux ne fournissent aucun service direct et facilement identifiable aux exploitants agricoles. Ce ne sont pas des auxiliaires ou des pollinisateurs. Pourtant, comme tout organisme, ils contribuent au fonctionnement de l'écosystème et doivent être préservés pour cela. Mais alors, comment les protéger, sans porter préjudice aux agriculteurs ? Déjà, en invitant tous les acteurs impliqués dans cette problématique à débattre de leurs préoccupations, de leurs besoins et contraintes. Afin de favoriser le dialogue, les chercheurs ont développé un jeu de plateau dans lequel l'ensemble des protagonistes, agriculteurs, décideurs publics, membres d'associations de protection de la nature, gestionnaires de réserves, doivent gérer un territoire, tandis qu'en arrière-plan, un modèle traduit en temps réel leurs actions en indicateurs, tels que la quantité d'oiseaux ou le niveau de rendements. Un outil précieux pour les aider à mieux comprendre le territoire et en améliorer la gestion. Et là aussi, les travaux des chercheurs peuvent les aider. Ainsi, une étude récente a montré qu'un territoire présentant une grande hétérogénéité, dans le cas présent une mosaïque de prairies fauchées et de pâturages plutôt que deux blocs bien marqués, s'avérait bénéfique aux échassiers limicoles, en leur permettant de se déplacer rapidement vers les parcelles les mieux adaptées à leur cycle de vie. Et cela sans aucun impact sur les rendements.

Les systèmes alimentaires : Projet Diversifood H2020

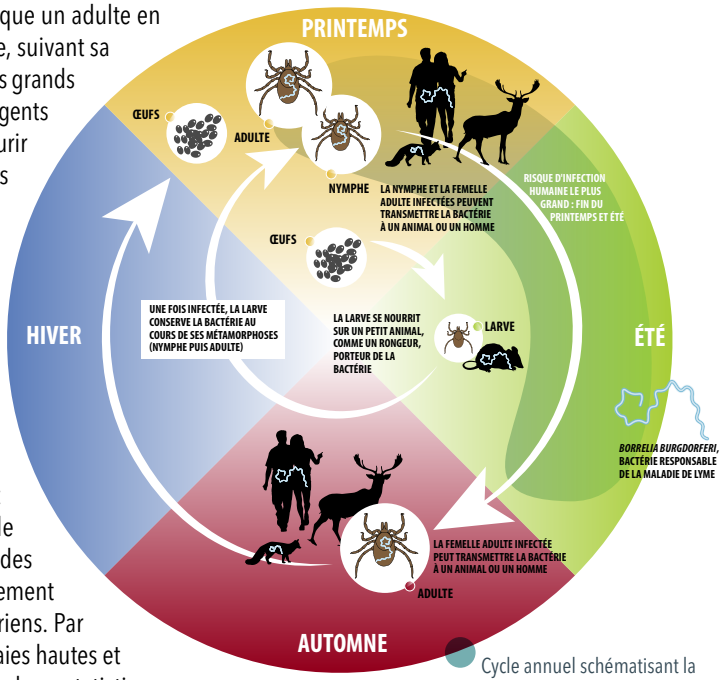
Diversifood : en route vers l'agriculture de demain



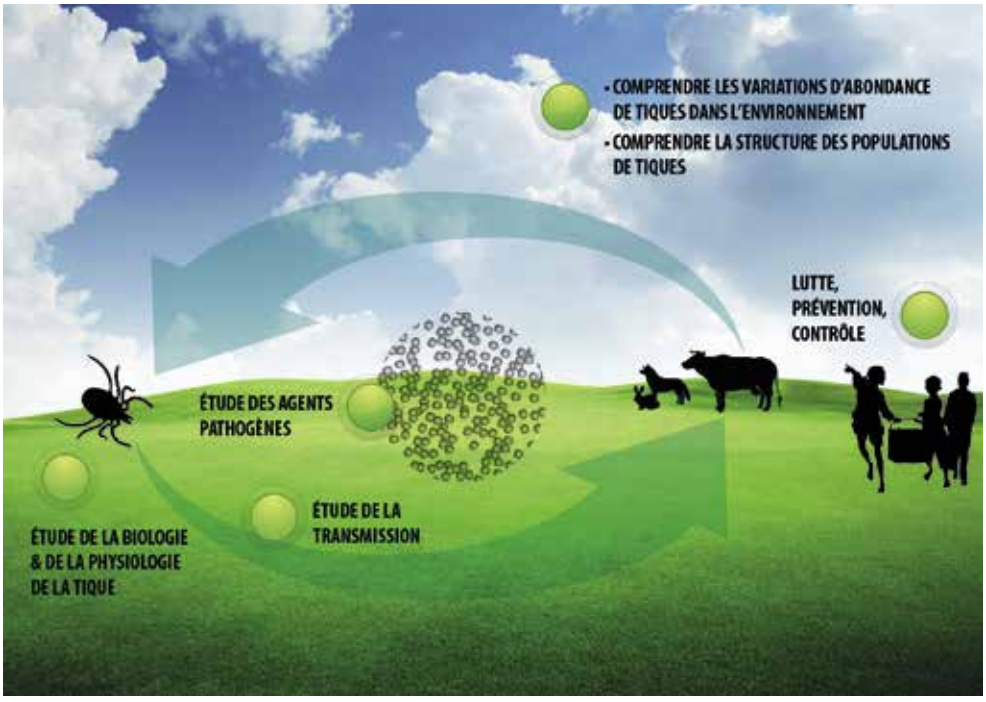
Changer l'agriculture apparait aujourd'hui indispensable, que ce soit pour faire face au changement climatique ou réintroduire de la biodiversité dans des territoires fragilisés. Mais ça n'est pas facile dans le système agricole actuel. Depuis vingt ans, un groupe pluridisciplinaire de chercheurs d'INRAE s'efforce d'identifier les obstacles au changement et de proposer de nouvelles pistes pour des agro-systèmes plus résilents et plus durables. Depuis 2015, ils pilotent le projet européen Diversifood H2020, dont l'objectif consiste à évaluer et enrichir la diversité des plantes cultivées dans les différents agro-écosystèmes. Leurs travaux sont centrés sur des variétés sélectionnées avec les agriculteurs et adaptées aux conditions locales. Grâce à leur approche transdisciplinaire et multi-acteurs, les chercheurs mettent en œuvre l'ensemble des leviers pouvant conduire à un accroissement de la diversité, par exemple en sélectionnant avec les paysans de nouvelles semences sous forme de populations diversifiées à la fois résilientes, économes en intrants, de bonne qualité nutritionnelle, et capables de co-évoluer avec le milieu où on les cultive (amélioration des populations au fil des générations). Afin d'analyser les nombreuses données issues du terrain, ils développent aussi des modèles statistiques destinés à évaluer leurs performances en fonction des environnements et des pratiques de sélection. En concertation avec l'ensemble des acteurs, ils réfléchissent aux moyens d'intégrer ces nouveaux produits dans la chaîne de production, tout en veillant à les valoriser auprès des agriculteurs bien sûr, mais aussi des transformateurs et des consommateurs privilégiant les circuits courts. Les chercheurs s'efforcent enfin d'identifier et de lever les verrous législatifs et réglementaires qui pourraient entraver le développement de ces nouvelles pratiques collectives.

La tique, voyageuse immobile

Tout le monde connaît les tiques. Et pour cause, ces acariens présents partout en France sont avec les moustiques, les principaux vecteurs de pathologies transmissibles à l'homme. À commencer par la maladie de Lyme, en progression sur l'ensemble du territoire. Mais les animaux, et notamment les bovins, ne sont pas épargnés. Lors de leur repas de sang, les tiques peuvent leur transmettre un parasite responsable de la piroplasmose, une pathologie proche du paludisme et potentiellement mortelle. Mais comment cet acarien à la mobilité réduite et privilégiant l'humidité des milieux forestiers, parvient-il à planter son rostre dans le cuir d'une vache en pâture, ou dans le mollet d'un randonneur ? Eh bien en faisant de l'animal-stop ! Au cours de sa vie, la tique doit effectuer trois repas de sang, pour passer de la larve (presque un adulte en miniature) à la nymphe, puis au stade adulte. Et pour cela, elle s'agrippe, suivant sa taille, à de petits animaux, tels que les rongeurs et les oiseaux, ou à de plus grands mammifères, par exemple les cervidés, dont certains peuvent héberger les agents pathogènes qui la contamineront. Or, ces animaux sont capables de parcourir de très longues distances, favorisant la dissémination des tiques qu'ils transportent bien malgré eux. D'autant que le repas de sang peut durer longtemps : plus de dix jours pour les femelles adultes ! Le projet OSCAR, mené de 2012 à 2016, s'est efforcé d'évaluer le rôle de la faune sauvage et de l'organisation des paysages dans la dynamique des populations de tiques. Il s'est aussi attaché à mesurer la densité de tiques infectées dans les différents milieux. L'étude mise en place dans deux grandes zones (Bretagne & Vallons et Coteaux de Gascogne), comprenait près de 1 800 points d'échantillonnage répartis dans trois types d'habitats : forêts, lisières des bois et haies bordant les prairies. Des milliers de tiques ont été prélevées sur le terrain, mais également sur les micromammifères et chevreuils, ces derniers ayant en outre été munis de colliers GPS afin de mesurer leurs déplacements. Les analyses ont ainsi montré que 2 à 5 % des tiques et micromammifères étaient porteurs de pathogènes. L'étude a également mis en avant l'impact du paysage agricole dans la dissémination des acariens. Par exemple, ceux-ci sont davantage présents dans les prairies bordées de haies hautes et denses, que dans les champs dépourvus de ce type de végétation. Des analyses statistiques ont permis d'estimer le nombre de tiques et d'hôtes présents dans un milieu, en fonction de sa nature et sa localisation par rapport aux milieux adjacents et aux variables climatiques. Un second permet de générer des paysages virtuels et ainsi mesurer l'impact des changements dans la structure du paysage, par exemple l'ajout de haies ou la diminution des surfaces forestières, dans la densité et la propagation des tiques.



Cycle annuel schématisant la présence des tiques aux différents stades de développement et les risques d'infection associés en France métropolitaine.



Évaluation des politiques de gestion de la biodiversité

Le projet API-SMAL

La biodiversité peut être favorisée à l'échelle des paysages agricoles afin d'influencer les bouquets de services écosystémiques dont l'agriculture et la société bénéficient. Certains systèmes vont privilégier la production, tandis que d'autres vont fournir davantage de services de régulation. Souhaite-t-on une agriculture qui contribue à l'atténuation du changement climatique, par exemple via la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou le stockage du carbone dans les sols, ou veut-on privilégier la protection de l'eau ou encore la production alimentaire ? Pour accompagner ces arbitrages, les économistes tentent d'évaluer la valeur sociale de ces bouquets de services, et de définir, en lien avec agronomes, écologues et mathématiciens, entre autres, la composition et la structuration des paysages qui fournissent les services écosystémiques recherchés. Ils définissent ensuite la nature et le niveau des instruments incitatifs (subventions, rétributions pour services environnementaux, taxes…) permettant de modifier les paysages dans ce sens. Dans le cadre du projet API-SMAL, les chercheurs étudient également ce qui incite ou freine les agriculteurs à adopter des pratiques agro-écologiques, en particulier pour diminuer le recours aux produits phytopharmaceutiques.

Prédire les effets des changements de pratiques agricoles

Quelles conséquences entraîneraient une décision politique publique visant à réduire de 50 % l'usage des engrais azotés à l'échelle européenne ? Voilà le scénario que les chercheurs du Laboratoire d'Excellence BASC (pour Biodiversité, Agrosystèmes, Société, Climat) testent depuis bientôt deux ans, dans le cadre du projet BASC STIMUL. En faisant communiquer plusieurs modèles complémentaires, ils s'efforcent de mesurer l'impact agronomique, économique et environnemental d'une telle mesure. Ainsi, réduire à ce point les engrais azotés va forcément s'accompagner d'une baisse des rendements, tout au moins à court terme, puisqu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'alternatives crédibles aux produits azotés. La réduction de l'offre se traduira nécessairement par une augmentation des prix. Mais à quel point, et pour quelles conséquences pour l'exploitant et la société ? En contrepartie, un impact positif sur la biodiversité, la qualité de l'eau et de l'air, est attendu, car les intrants azotés affectent tous ces paramètres environnementaux. Mais d'autres services écosystémiques pourraient être perturbés. Dans le cadre du projet, les chercheurs testent également un autre scénario, visant cette fois à mesurer les effets de l'adaptation des sols au changement climatique, sur la biodiversité des eaux douces en France. Avec déjà des premiers résultats alarmants, puisque les premières simulations montrent que l'adaptation des usages des sols au changement climatique implique une dégradation de leur état, alors même que les eaux douces connaissent, depuis le milieu des années 80, une perte de biodiversité supérieure à celle des écosystèmes terrestres et marins. Réduire l'utilisation intensive d'engrais azotés en agriculture permettrait à la France de respecter ses engagements européens dans le cadre de la Directive cadre sur l'eau (DCE) sous climat actuel mais pas sous scénario changement climatique. Cela indique que simuler les effets des politiques publiques sans inclure les impacts du changement climatique conduirait à une surestimation des avantages de ces politiques.

Mesurer la capacité productive de la biodiversité

La diversité des plantes cultivées dans les prairies et les terres arables apporte un supplément de rendement pour les grandes cultures et le lait. Voilà la conclusion d'une étude visant à mesurer la capacité productive de la biodiversité. Réalisée à partir d'indicateurs indirects, en s'appuyant sur l'analyse des données de production d'un échantillon de 3 960 fermes spécialisées en polyculture-élevage entre 2002 et 2013, elle suppose que la diversité des cultures et la part dans la surface agricole de prairies permanentes, qui accueillent le plus souvent une biodiversité plus élevée que les terres arables, sont des indicateurs de biodiversité réelle. Elle montre que cette diversité des cultures ainsi que les prairies permanentes augmentent les rendements des cultures, et par conséquent la productivité moyenne de l'exploitation, là encore toutes choses égales par ailleurs (usage d'engrais, de pesticides…). L'étude de cet échantillon de 3960 fermes montre aussi que la diminution de l'utilisation des pesticides augmente cette productivité de la biodiversité. Ce qui signifie que, dans cette situation, il serait imprudent de généraliser, une politique de réduction des pesticides, par le biais d'une taxe par exemple, peut inciter les agriculteurs à davantage d'efforts en faveur de la biodiversité, avec à la clé une augmentation des rendements. La situation serait en revanche défavorable si l'on avait observé une coopération entre pesticides et biodiversité, c'est à dire si les intrants avaient augmenté la productivité de la biodiversité des cultures (plus d'engrais et plus de pesticides conduisant à une augmentation de la production). Dans ce cas, la taxe montrerait rapidement ses limites, les agriculteurs n'ayant alors pas d'intérêt à favoriser la biodiversité pour produire davantage. Autre enseignement, il apparait que les exploitants intègrent, en connaissance de cause, ces services écosystémiques dans la gestion de la ferme au travers de la gestion inter-temporelle de la diversité de leur assolement.

Compenser la perte de biodiversité

La Loi de 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages a inscrit l'objectif de réduire à zéro la perte nette de biodiversité à l'échelle du territoire. Pour cela, elle s'appuie sur le triptyque « Éviter, Réduire, Compenser ». Cela signifie que lorsque l'artificialisation des sols est nécessaire, que ce soit pour installer des infrastructures ou tout autre aménagement, il faut en priorité éviter de porter atteinte à la biodiversité ou, si c'est impossible, de limiter l'impact au maximum. En outre, toute biodiversité perdue doit être compensée. Il s'agit en effet d'une condition essentielle pour ralentir le changement global, et en limiter les effets locaux. Vertueuse dans son esprit, la réglementation soulève des questions auxquelles tentent de répondre les économistes, et que l'on peut illustrer par un exemple concret. Imaginons qu'une nouvelle autoroute vienne couper en deux une forêt qui assurait une épuration naturelle de l'eau dont bénéficiait le village le plus proche. Pour les habitants de ce dernier, les travaux sont synonymes de triple peine : perte de paysage, apparition de nouvelles nuisances mais aussi perte d'un service écosystémique que le gestionnaire du projet n'a pas, aujourd'hui, l'obligation de compenser. Sans oublier que les riverains ne bénéficieront pas non plus de la compensation de la perte de biodiversité, puisqu'elle aura lieu ailleurs. Pour les économistes, cet exemple montre que la compensation n'est pas suffisamment coûteuse pour les entreprises, au regard du retour sur investissement attendu, pour les inciter à éviter, et limiter l'impact sur la diversité, et *a fortiori* sur les services écosystémiques. Pour pallier ce problème, les économistes plaident pour la mise en place d'un registre national qui répertorierait d'une part, les projets d'artificialisation des sols, et d'autre part, les mesures de compensation qui les accompagnent, de manière à contrôler le respect de l'objectif « zéro perte nette », proposé par la loi de 2016.



02.

Scruter l'écologie des communautés

Tout n'est qu'interactions ! Les espèces d'un écosystème entretiennent des relations tantôt symbiotiques, tantôt houleuses, voire carrément conflictuelles avec les autres organismes qui composent la communauté. Or, la connaissance de ces interactions est primordiale, que ce soit pour identifier les mécanismes susceptibles de fournir des services écosystémiques, ou pour préserver ou restaurer de la biodiversité, développer des stratégies de lutte contre les bioagresseurs ou anticiper les conséquences du changement climatique.

Dis-moi ce que tu fais, je te dirai qui tu es



Prenez un groupe de personnes : des hommes et femmes d'âge divers, des grands, des maigres, des passionnés et des timides. Invitez ce beau monde à une réunion pour débattre d'un sujet quelconque et essayez de prédire, à l'avance, la manière dont ils vont interagir et ce qui va ressortir de leurs échanges. Pas facile, n'est-ce pas ? Et pour cause, les propriétés des individus n'informent en rien sur la manière dont ils vont se comporter en présence des autres. Comment savoir si telle femme est charismatique ou tel homme un indécrottable misanthrope, s'ils n'ont personne avec qui interagir ? Les classifications ordinaires, qui consistent à regrouper les objets pour ce qu'ils sont, ne permettent pas de comprendre ce qu'ils font lorsqu'ils sont ensemble. Intéressons-nous à un écosystème, par exemple une prairie. Sa productivité globale dépend pour une part de la productivité de chacune des plantes qui la composent, mais elle résulte surtout de leurs interactions. Le problème, c'est que celles-ci sont si diverses et nombreuses qu'il est impossible de les prédire *a priori* en se basant uniquement sur la connaissance des espèces en présence. C'est cette raison qui a conduit des chercheurs d'INRAE à développer une nouvelle méthode d'analyse. Statistique, elle permet, à condition de disposer d'un grand nombre d'observations d'un écosystème dans toute sa diversité, d'identifier les groupes fonctionnels d'espèces qui favorisent la fonction écosystémique étudiée. L'aspect novateur de la démarche repose sur le fait que l'analyse s'effectue sans aucun *a priori.* On ne s'intéresse pas aux propriétés des espèces, mais seulement aux effets de leurs interactions sur la fonction écosystémique étudiée. Et ça marche. Ainsi, la méthode a permis de montrer que certaines légumineuses, qui fixent l'azote atmosphérique, sont par ailleurs capables de mobiliser le phosphore du sol et de le partager avec les plantes voisines. Il convient donc de placer ces espèces dans une sous-catégorie, puisqu'elles rendent des services écosystémiques plus importants que ceux normalement attendus d'une légumineuse. Cette méthode de classification, simple dans sa mise en œuvre, s'applique à n'importe quel système. Ainsi, en génétique, elle pourrait notamment permettre d'identifier les combinaisons de gènes impliquées dans des fonctions biologiques.

Les richesses insoupçonnées du sol



Deux vignobles adjacents avec, à gauche, des vignes enherbées.

Un gramme de sol contient un milliard de bactéries, appartenant à de cent mille à un million d'espèces différentes. À ce titre, le sol constitue l'un des plus grands réservoirs de biodiversité et de ressources génétiques de notre planète. Mais avec d'importantes disparités, qui dépendent notamment de l'usage qu'on en fait. Durant quinze ans, les chercheurs d'INRAE ont caractérisé la diversité des sols du territoire national, en s'appuyant sur l'échantillonnage de 2200 sols prélevés par le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols. Ce colossal travail d'analyse est compilé dans l'Atlas français des bactéries du sol, premier ouvrage à inventorier l'ensemble de la diversité microbienne à l'échelle d'un pays. Et les nouvelles sont plutôt rassurantes. Non, les sols français ne sont pas morts. On trouve de la diversité et de l'abondance microbienne dans tous les milieux, quel que soit l'usage qui en est fait. Bien sûr, les sols agricoles ou viticoles présentent une abondance microbienne moindre que ceux des forêts, mais un changement de pratiques pourrait suffire à rétablir cette richesse dans ces milieux perturbés. L'agriculture de conservation, quant à elle, consiste à couvrir les terres de végétation tout au long de l'année, soit via la mise en place d'intercultures, soit en enherbant les sols des parcelles viticoles, mais aussi à limiter au maximum le travail du sol. Pourquoi ? Tout simplement parce qu'en remuant la terre, par exemple lors des labours, on casse les macrostructures, les agrégats. Autrement dit, on détruit la maison des microorganismes. Et les conséquences sont néfastes à double titre car non seulement on perd de la biodiversité, avec notamment la disparition d'espèces capables de dégrader les polluants, mais cette pratique favorise l'émergence de bactéries pathogènes qualifiées de « stratèges opportunistes », qui sont promptes à coloniser les environnements perturbés… et qu'il faudra combattre à l'aide d'intrants chimiques ! Pour les chercheurs, l'idéal consisterait à associer l'agriculture biologique, qui pallie la réduction des intrants par un important travail du sol, et l'agriculture de conservation. Mais combiner ces deux approches exige de solides connaissances techniques, une observation constante des parcelles et l'usage d'outils de suivi parfois complexes. C'est là que la science participative intervient. Depuis plusieurs années, les chercheurs d'INRAE travaillent en étroite collaboration avec les agriculteurs, afin d'acquérir des connaissances, identifier leurs besoins et contraintes, dans le but de développer les outils et méthodologies adaptés à leur situation. Avec un objectif ambitieux : permettre à l'exploitant de construire un système durable, qui soit à la fois économiquement viable malgré une prévisible baisse des rendements, et suffisamment simple à mettre en œuvre pour éviter une surcharge de travail dissuasive.

Des systèmes de culture économes en intrants

Pour réduire la consommation d'intrants, et notamment de pesticides, l'un des principaux leviers consiste à faire varier les espèces cultivées dans le temps et/ou l'espace. Plusieurs projets nationaux ou européens, dont certains pilotés par INRAE, visent à évaluer le potentiel de pratiques innovantes, ou redécouvertes, en termes d'efficacité économique et de bénéfices pour la santé humaine, l'environnement et la biodiversité. En particulier, les cultures associées, qui consistent à cultiver simultanément au moins deux espèces, par exemple le pois et le blé, dans une même parcelle, afin de réduire l'utilisation d'engrais et de pesticides, sont étudiées dans le cadre du projet européen ReMIX. En partenariat avec les agriculteurs, les chercheurs identifient les associations de plantes les plus intéressantes et la manière de les cultiver, en observant leurs interactions et notamment leur complémentarité pour faire face aux ravageurs, agents pathogènes et plantes adventices, ou pour exploiter les ressources qui leur sont nécessaires. Cette pratique agricole nécessitant des adaptations à l'échelle de la filière, à commencer par le tri des graines après la récolte, scientifiques et professionnels étudient les freins principaux à l'adoption de ce mode de culture. Les Cultures Intermédiaires Multi-Services (CIMS) constituent un autre domaine de recherche. Afin de réduire l'usage d'intrants chimiques et d'éviter de laisser le sol nu, une solution consiste à semer entre deux cultures récoltées, une ou plusieurs plantes qui vont fournir des services écosystémiques durant leur croissance, et après leur mort. Lutte contre l'érosion ou le lessivage des nitrates, restructuration des sols, recyclage des éléments minéraux (engrais vert), gestion des bioagresseurs... Les avantages des CIMS sont nombreux. Ainsi, les exploitants pratiquant l'agriculture de conservation mobilisent des CIMS pour obtenir une couverture maximale du sol ; ils limitent autant que possible le travail du sol afin de préserver la biodiversité, et choisissent des successions de cultures et de couverts adaptées. Jusqu'à présent, ils n'ont souvent d'autre choix que d'utiliser le controversé glyphosate pour détruire les couverts. Voilà l'un des verrous que les chercheurs s'efforcent d'identifier et de lever, en concertation avec tous les acteurs impliqués dans la filière.





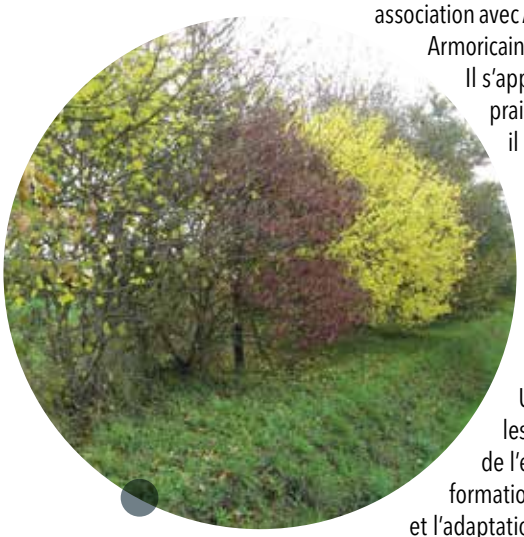
Les ombellifères attirent de nombreux prédateurs : ici, des téléphores fauves sur la berce commune.

Les bandes fleuries, de superbes refuges pour les auxiliaires des cultures

Les bandes fleuries sont de formidables réservoirs de biodiversité. Outre les insectes pollinisateurs, oiseaux, petits mammifères dont les chauves-souris, ces aménagements abritent de précieux auxiliaires de culture qui régulent les ravageurs herbivores présents dans les parcelles. Plusieurs études ont déjà été menées pour mesurer leur impact sur la gestion d'un bioagresseur associé à une culture donnée. Mais aucune n'avait évalué leur efficacité sur le long terme et pour un ensemble d'insectes ravageurs. C'est désormais chose faite. Les chercheurs ont semé, dans une parcelle expérimentale, plusieurs bandes fleuries de 45 x 6 mètres, composées de 9 à 30 espèces sauvages. La particularité de cette étude tient au fait qu'ils ont utilisé des plantes pérennes et non annuelles, de manière à mesurer leur effet sur une durée de quatre ans au cours de laquelle se sont succédées des cultures de colza, pois, féverole et blé. En outre, contrairement aux mélanges du commerce qui privilégient le rendu esthétique et les variétés les moins coûteuses, les plantes ont été soigneusement choisies pour garantir la floraison de la bande tout au long de l'année, afin de fournir les ressources nécessaires aux auxiliaires ainsi qu'à toute la diversité des insectes pollinisateurs dès le mois de février. L'étude a confirmé l'efficacité des bandes fleuries sur la régulation des ravageurs, avec cependant des variations sensibles selon les cultures. Ainsi, 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. Les altises, charançons et les méligèthes, qui s'attaquent au colza, étaient d'autant plus parasités par des auxiliaires qu'il y avait des plantes en fleurs dans les bandes fleuries entre février et avril. Surtout, ils ont observé à partir de la troisième année, une explosion du nombre de carabes, grands consommateurs de larves de bruches, l'un des principaux ravageurs de la féverole. Et c'est dans les parcelles, et non dans les bandes fleuries, qu'on les trouvait en plus grand nombre. En cinq ans, leur quantité a été multipliée par cinq ! Pour parvenir à ce résultat, les chercheurs n'ont utilisé aucun insecticide, ni travaillé le sol durant toute la durée de l'expérience. L'étude se poursuit, mais cette fois sur de vraies exploitations, afin d'évaluer l'efficacité du dispositif confronté à différentes pratiques agricoles.

Écobordure : savoir lire la biodiversité des bordures de champs

La composition floristique de la bordure d'un champ (espace non cultivé pérenne aménagé pour délimiter les usages des terres et propriétés) constitue un précieux indicateur de la biodiversité spontanée des paysages agricoles. À condition de savoir lire dans ce paysage, et d'en saisir les nuances. Développé au début des années 2000 en association avec Agrocampus Ouest, des agriculteurs et des conseillers techniques, l'outil Écobordure Bocage Armoricain est un indicateur de l'état des bordures de champ, basé sur l'examen de la flore qui la compose. Il s'appuie sur une liste de 31 espèces végétales, réparties en trois groupes, espèces forestières, prairiales ou adventices. Fourni avec une aide à l'identification des plantes, et un guide d'utilisation, il permet aux personnes formées à son usage de comprendre la composition de la bordure et de poser des hypothèses expliquant son état. Les espèces adventices sont présentes en trop grande proportion ? Peut-être qu'un entretien mécanique intense de type fauchage réalisé avec une barre de coupe trop basse, ou la dispersion d'herbicides sur la bordure, ont dénudé le sol et favorisé leur installation. Au contraire, une majorité d'espèces forestières pourra traduire un environnement ombragé et peu perturbé. L'outil a d'abord un rôle pédagogique. Il vise à sensibiliser l'agriculteur quant à l'influence de ses pratiques sur la biodiversité qui est présente dans ses bordures de champ et qui peut lui apporter en retour différents bénéfices. Une démarche de diagnostic a été développée sur la base de l'outil Écobordure pour accompagner les agriculteurs et futurs agriculteurs dans la mise en œuvre de pratiques plus respectueuses de l'environnement. Devant l'intérêt grandissant d'une diversité d'acteurs en France (recherche, formation, développement), les chercheurs initient de nouveaux travaux pour l'approfondissement et l'adaptation de l'outil et de la démarche Écobordure. Par exemple, un objectif est de vérifier s'il est possible de lier le diagnostic établi par Écobordure, à la présence de certains groupes de pollinisateurs, ainsi que des carabes, largement impliqués dans la régulation biologique des bioagresseurs des cultures.

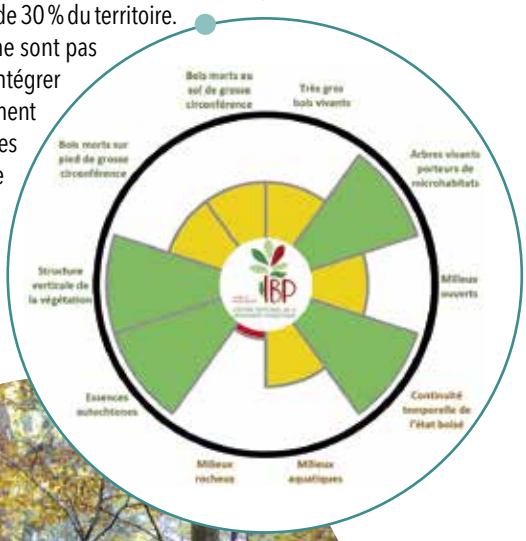


Jeunes haies (moins de 10 ans) en essences mélangées pour reconstituer du maillage entre les champs d'une exploitation agricole en bocage breton.

Un outil simple pour évaluer la biodiversité des forêts

Avec une surface totale de 17 millions d'hectares, les forêts de France métropolitaine couvrent près de 30 % du territoire. Près de 75 % d'entre elles sont privées, et détenues par 3,5 millions de propriétaires. Or, tous ne sont pas familiarisés avec le concept de biodiversité, ou tout au moins, ne sont pas en mesure de facilement intégrer la biodiversité dans la gestion courante de leurs forêts. C'est pourtant essentiel ! Ainsi, plus le peuplement forestier compte d'espèces différentes et plus il est probable que toutes les fonctions écosystémiques soient réalisées, telles que la pollinisation des plantes ou le recyclage de la matière organique fraîche en nutriments assimilables par les arbres. De même, si plusieurs espèces différentes remplissent le même rôle (redondance fonctionnelle), la disparition momentanée de l'une d'elles n'affecte pas le fonctionnement du système. C'est pour aider les gestionnaires à intégrer la biodiversité dans la gestion de leurs peuplements qu'a été conçu en 2008 par deux agents du Centre national de la propriété forestière (CNPF) (dont un est accueilli dans une équipe INRAE) l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP). L'IBP évalue la capacité d'accueil d'un peuplement pour les espèces animales et végétales, autrement dit sa capacité à héberger plus ou moins d'organismes vivants, et fournit une aide à la décision quant aux actions à entreprendre pour favoriser cette diversité. L'avantage de l'IBP repose à la fois sur la simplicité d'usage et sa rapidité, puisque le diagnostic est établi *in situ*, sans aucun besoin de mesure complexe ni de connaissance taxonomique, ce qui permet au gestionnaire d'intégrer immédiatement la biodiversité dans son itinéraire technique. L'utilisation de l'outil repose sur l'observation, au cours d'une visite attentive du peuplement, de dix facteurs reconnus comme étant parmi les plus favorables à la biodiversité des peuplements forestiers. L'IBP fait depuis 2009 l'objet d'un programme de Recherche et Développement associant principalement le CNPF et INRAE, ce qui lui assure à la fois une pertinence écologique et une adaptation à un usage de routine par une large gamme d'utilisateurs. Ce programme comporte non seulement un processus d'évaluation et d'amélioration de l'ergonomie et de la pertinence de l'outil, mais aussi un programme de formations et la mise à disposition sur un site internet de documents pédagogiques. Bien que conçu à l'origine pour les forêts privées, l'IBP est également utilisé dans certaines forêts publiques et par des gestionnaires de parcs nationaux. Et, preuve de son succès, il s'exporte désormais dans plusieurs pays européens.

L'IBP est composé de 10 facteurs qui recoivent un score de 0 (rouge), 2 (orange) ou 5 (vert).





Choisir les bons assemblages d'espèces forestières

Les immenses massifs forestiers dominés par une seule espèce d'arbre présentent un intérêt économique évident pour les gestionnaires. Mais qu'un insecte herbivore, friand de cette espèce s'y installe et s'y développe, et les dégâts qu'il va causer peuvent être considérables. C'est pour cette raison qu'il peut être avantageux de favoriser la diversité, afin de limiter le développement massif de ravageurs inféodés à une espèce en particulier. D'abord parce qu'en mélangeant les espèces d'arbres, on dilue les ressources pour chacun des herbivores qui les consomment. Ensuite, parce qu'une plus grande diversité d'arbres et de plantes s'accompagne généralement d'une plus grande diversité des ennemis des herbivores. Alors, il suffit de mélanger les essences pour régler le problème ? Ce n'est pas si simple, comme l'ont montré récemment des chercheurs, notamment d'INRAE. En effet, ils ont constaté que certains assemblages d'espèces ne présentent aucun avantage en termes de résistance aux ravageurs. Pire, dans certains cas, les mélanges pourraient aggraver le problème ! En fait, les insectes sont un peu comme nous dès qu'il s'agit de se nourrir. Ils ont certes des préférences alimentaires, mais si leur mets favori fait défaut, ils se contenteront d'un plat moins appétant, mais néanmoins comestible. Ainsi, un ravageur pourra se rabattre sur le pin sylvestre s'il ne trouve pas de pin maritime. C'est la raison pour laquelle les chercheurs étudient désormais l'impact des assemblages d'espèces sur la régulation des insectes herbivores. Ils ont constaté que les mécanismes de résistance sont d'autant plus marqués que les espèces associées présentent des caractéristiques contrastées, par exemple des feuillus avec des conifères, ou des feuillus appartenant à des familles botaniques éloignées. En résumé, il convient de mélanger des espèces hôtes et non hôtes. Dans la continuité de ces travaux, les chercheurs étudient dans quelle mesure la diversité peut modifier la façon dont les arbres se défendent. Il reste beaucoup à découvrir, mais déjà, ils ont montré que les défenses chimiques au niveau des feuilles, mises en place pour éviter qu'elles ne soient mangées, diffèrent selon que l'arbre est entouré de voisins de la même espèce, ou d'espèces différentes. Et à quoi ça sert ? Eh bien imaginez qu'un papillon ait pondu ses œufs dans un arbre dont les feuilles, *a priori* comestibles, se révèlent toxiques pour la larve. Pour se nourrir, celle-ci devra descendre de l'arbre pour en chercher un plus adapté à ses besoins, dépensant ainsi beaucoup d'énergie et augmentant sensiblement les chances d'être croquée par un prédateur, avant d'avoir pu causer le moindre dégât !



Parcelle de semis de pois du domaine de Restinclières dans l'Hérault.

Des lignes d'arbres dans les parcelles, des espaces semi-naturels d'une grande richesse

L'agroforesterie intraparcellaire consiste à associer des arbres et des cultures ou pâtures au sein d'une même parcelle agricole. Et cela constitue un levier essentiel pour la reconquête de la biodiversité. Les atouts d'une telle organisation sont nombreux. Citons par exemple la fertilisation des sols par les feuilles ou les racines en décomposition, le stockage du carbone, la protection des sols contre l'érosion, l'ombrage et la diminution de l'évaporation qui en résulte, sans oublier évidemment le nombre considérable d'espèces qui s'y développent. Alors bien sûr, les alignements d'arbres amputent de 3 à 10 % la surface agricole utile. Pour cette raison, les chercheurs s'efforcent d'évaluer dans quelle mesure la biodiversité fonctionnelle susceptible d'être apportée par ces bandes peut compenser la perte de revenus, par exemple grâce aux économies réalisées sur les achats d'intrants chimiques. Autre motif d'inquiétude pour les agriculteurs, la végétation qui se développe naturellement au pied des arbres constituerait un énorme réservoir d'adventices qui pourraient envahir les parcelles. La crainte est légitime et a conduit les chercheurs à examiner de plus près les espèces présentes. Pour cela, ils ont analysé les adventices poussant au pied des arbres des plus anciennes parcelles expérimentales en agroforesterie, plantées voilà près de 25 ans au domaine de Restinclières (Hérault), et dans des parcelles plus jeunes chez des agriculteurs du Gers, et les ont comparées avec celles colonisant les parcelles témoins exploitées de manière classique, sans arbres. S'ils ont confirmé que les espèces végétales sont bien plus nombreuses et variées au pied des arbres que dans la culture, ce qui est un atout pour la préservation de la biodiversité végétale, ils ont aussi montré que ces plantes, trop sensibles aux perturbations agricoles, ne représentent pas de menace pour la parcelle, qu'elle soit exploitée en agriculture conventionnelle ou en agriculture biologique. Les chercheurs d'INRAE ont aussi constaté que cette strate herbacée représente un important refuge pour une très grande variété d'insectes menacés de disparition dans les habitats agricoles, comme les papillons par exemple, mais aussi de précieux auxiliaires tels que les carabes.



Carabe.

Les vertus des systèmes d'agriculture mixtes

En France métropolitaine, les fermes qui associent productions animales et végétales sont aujourd'hui très minoritaires. Mais dans les Antilles françaises, et notamment en Guadeloupe, ces systèmes mixtes de production, représentent près de 80 % des exploitations agricoles. Et certaines pratiquent un système vertueux qui consiste à valoriser les coproduits de chaque atelier. Par exemple, les feuilles et les troncs de bananiers, les fanes de patate douce, de madère (taro)..., alimentent les animaux, dont les déjections fertilisent ces mêmes cultures, en lieu et place des intrants chimiques, diminuant ainsi les coûts de production et la dépendance vis-à-vis de l'extérieur. Ce type de démarche permet de boucler le cycle des nutriments et de réduire les externalités négatives (pollution des sols ou de l'environnement). Pourtant, malgré ses avantages, le système est jugé contraignant par de nombreux exploitants. Le premier verrou est lié à la surcharge de travail qu'entraîne la mise en œuvre de ces pratiques. Le second est d'ordre organisationnel. La filière élevage demande des animaux jeunes et lourds. Or, l'alimentation à base de coproduits de culture, de moindre valeur nutritive que les aliments concentrés, entraînerait une croissance plus lente des animaux. Ces derniers sont en conséquence écoulés en vente directe sur les marchés locaux ou consommés par l'exploitant. Mais pour les chercheurs, bien gérées, ces ressources permettraient des niveaux de croissances équivalents à ceux obtenus avec des aliments concentrés. Par ailleurs, la qualité de la viande produite de cette manière serait supérieure, et pourrait justifier un prix de vente plus élevé, voire l'attribution d'un label identifiable par les consommateurs. Des études en cours montrent que les coproduits intègrent des composés favorisant la réduction des émissions de gaz à effet de serre par les animaux, et contribuent en outre à leur santé. Cela conduit les chercheurs à explorer des méthodes améliorant la gestion (production, conservation et stockage), et la valeur alimentaire (enrichissement par des levures) de ce type d'aliment, sans altérer leurs qualités nutritionnelles, assurant un approvisionnement toute l'année, y compris pendant les périodes de sécheresse. Ce sont là quelques-unes des pistes étudiées dans le cadre du projet Polyculture élevage. Co-construit dans le cadre d'une démarche participative, avec des exploitants engagés dans la transition agro-écologique, la vente directe et l'autoconsommation, ce projet consiste en une évaluation multicritère de ce système (efficience, résilience, innovations, charge de travail, impact économique...), dans le but d'en optimiser le fonctionnement. À mesure de l'avancement du projet, les connaissances produites sont partagées avec les acteurs au cours d'actions de formation (journées techniques, documents techniques). Elles nourriront des échanges entre les exploitants pratiquant cette démarche, et ceux qui s'interrogent sur leur changement de pratiques.



Vue par drone de l'exploitation pilote du domaine Duclos (Guadeloupe).

À INRAE, on expérimente la prairie verticale !



Les prairies fournissent la base de l'alimentation de nombreux systèmes ovins et bovins laitiers. Mais l'abondance et la qualité de cette ressource fourragère est fortement dépendante des aléas climatiques. Les importantes sécheresses de ces dernières années ont ainsi montré sa fragilité. Dans certaines régions, la nourriture manque désormais fréquemment dès le milieu de l'été, obligeant les éleveurs à acheter le fourrage qui leur fait défaut, à un prix souvent élevé. Pourtant, une ressource demeure disponible y compris lorsque l'herbe a séché : les feuilles des arbres ! Mais quel est leur intérêt, du point de vue nutritionnel et plus globalement, dans un système d'élevage ? Pour le savoir, les chercheurs d'INRAE ont planté à Lusignan (Vienne) en 2014, des alignements d'arbres dans une parcelle d'un système bovin laitier pour développer un système agro-écologique adapté au changement climatique (OasYs). Outre le frêne et l'orme, déjà utilisés par certains éleveurs en période de pénurie de fourrage, des mûriers blancs ont été choisis. Cette essence fournit du fourrage dans le sud de l'Europe où elle résiste bien aux fortes chaleurs. Des aulnes de Corse ont aussi été retenus, pour leur faculté à fixer l'azote atmosphérique, comme le font les légumineuses. Certains des arbres ont pour objectif d'apporter de l'ombrage nécessaire au bien-être des animaux en plus d'accueillir, comme la végétation à leurs pieds, une faune auxiliaire diversifiée. Mais d'autres vont être taillés « en têtard », une conduite pour le moins radicale, qui consiste à couper net le tronc d'un arbre en pleine croissance, puis les repousses chaque année ! Connue depuis des millénaires, cette technique en apparence brutale, déclenche une réponse de l'arbre qui se traduit par l'apparition de nombreux rejets au niveau de l'écorce, sous la ligne de coupe. Les branches s'y développent en abondance en fournissant donc de très nombreuses feuilles. L'innovation consiste à faire pâturer directement les feuilles des arbres par les animaux, en mettant les branches à leur hauteur. D'accord, mais la valeur alimentaire des feuilles des différentes essences d'arbre sera-t-elle aussi bonne que celle de l'herbe des prairies ? Eh bien les premières études montrent qu'elle varie dans des proportions comparables et qu'elle est même meilleure pour le mûrier blanc et le frêne en été. Les recherches se poursuivent pour évaluer leur appétences en mesurant leur ingestion par les vaches laitières et aussi pour étudier si les feuilles des arbres pourraient fournir des composés bénéfiques pour la santé animale ou humaine, via le lait. Mise en place pour vingt ans au moins, l'expérimentation va permettre de fournir régulièrement des connaissances à destination des éleveurs, y compris sur la part que les feuilles d'arbres conduites en têtard pourrait représenter dans la ration.

la diversité animale pour des sytèmes d'élevage allaitant plus agro-écologiques

Associer des ovins et des bovins dans des systèmes d'élevage mixtes, voilà qui n'est pas banal en France, où dominent les systèmes spécialisés. De plus, la majorité des agneaux français sont engraissés en bergerie avec des aliments concentrés, tandis que la plupart des broutards sont exportés, le plus souvent en Italie, pour être engraissés intensivement avec des rations riches en concentré ou en ensilage de maïs. Avantages de cette spécialisation, la rationalisation de la conduite, du conseil et de la collecte des animaux prêts à être vendus. Le problème, c'est que la production d'aliments concentrés, mais aussi le transport, génèrent une empreinte carbone importante, peu compatible avec les stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Peut-on produire essentiellement à partir d'herbe une viande de qualité, en préservant l'environnement et en permettant aux éleveurs de vivre de leur activité ? C'est à ces questions que tentent de répondre les chercheurs impliqués dans le projet Salamix. Sur le site INRAE de Laqueuille, en Auvergne, les chercheurs évaluent depuis 2015, un système d'élevage biologique herbager qui associe des bovins et des ovins, dans lequel les vaches et les brebis de race rustique (Salers pour les bovins, Limousine pour les ovins) sont croisées avec des mâles de race herbagère précoce (Angus pour les taureaux, Suffolk pour les béliers). Pourquoi avoir choisi le croisement avec une race précoce ? Pour favoriser l'engraissement des animaux (jeunes bovins abattus à 13-14 mois en moyenne, agneaux abattus à 5 mois en moyenne) avec le maximum d'herbe (pâturée pour les agneaux, pâturée et récoltée pour les jeunes bovins) et le minimum d'aliments concentrés. Quant à la mixité entre ovins et bovins, elle permet de réduire les infestations parasitaires qui surviennent lorsque les animaux pâturent, en diluant le nombre de parasites par espèce, la plupart d'entre eux étant spécifiques à une espèce animale. On limite ainsi les besoins de traitements médicamenteux tout en favorisant la croissance des animaux. Produire de la viande à partir de l'herbe des prairies permanentes revêt de réels avantages. D'abord, parce que les prairies permanentes constituent d'importants pièges à carbone et qu'elles recèlent une grande biodiversité. Ensuite parce que la viande produite à l'herbe présente d'indéniables qualités nutritionnelles (moins d'acides gras saturés et plus d'acides gras oméga-3 et d'antioxydants que la viande produite avec des rations à base d'ensilage de maïs ou de concentrés). Deux bémols toutefois qui pourraient constituer un verrou pour ce système. Les agneaux élevés à l'herbe produisent une viande à la saveur marquée et plus forte que celle des agneaux élevés en bergerie, ce qui ne correspond pas forcément au standard dominant de la filière. Quant aux bovins, les animaux précoces, croisés et aux carcasses de faible poids, ne correspondent pas non plus aux standards de la filière, qui privilégie les animaux de race pure et les animaux lourds fortement développés (mais aussi peu aptes à l'engraissement rapide à l'herbe). Des tests vont être réalisés prochainement, sur un panel de consommateurs, afin d'évaluer les qualités gustatives des viandes ovines et bovines produites dans ce système.



La résistance est dans la différence

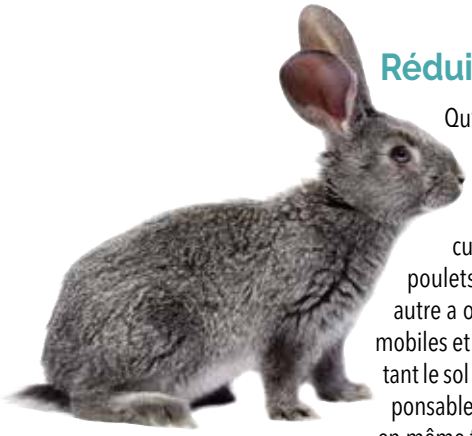


Troupeaux de caprins de race Créole sur l'exploitation de Sizam Bastareaud, Saint-François (Guadeloupe).



Haemonchus contortus mâle et femelle.

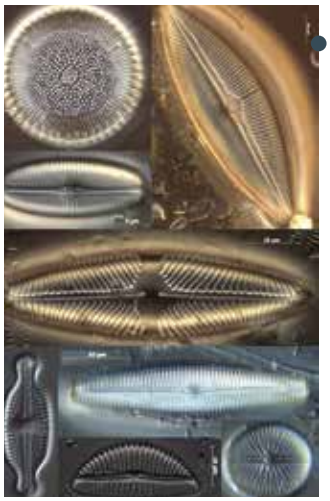
Les strongles digestifs sont des vers responsables d'une des principales pathologies observées chez des animaux élevés au pâturage. Tous les caprins qui mangent l'herbe y sont confrontés. Durant des décennies, les animaux ont été traités avec des vermifuges de synthèse. En conséquence, les strongles ont développé une résistance forte vis-à-vis de ces produits. La situation est si problématique que dans certains élevages plus aucune des molécules connues n'est efficace contre ces vers. Il est donc très urgent, de trouver des alternatives à leur usage. En Guadeloupe, les chercheurs d'INRAE mènent depuis dix ans, des travaux visant à comprendre dans quelle mesure une biodiversité accrue du troupeau peut réduire le risque parasitaire au bénéfice des animaux les plus sensibles. Pour éprouver ce concept, ils associent des bovins et des caprins dans le même pâturage, et évaluent la dilution du parasitisme induite par la présence d'espèces différentes. Les parasites, souvent spécifiques, disposent d'un nombre d'hôtes réduit, d'autant que les bovins sont nettement moins sensibles aux strongles que les caprins. Les tests montrent que la méthode fonctionne... mais pas forcément dans la durée. Les chercheurs ont ainsi constaté une augmentation de l'infestation des chèvres pâturant, depuis plusieurs années, la même prairie en compagnie de bovins. Bien que des confirmations soient encore nécessaires, ceci serait dû au fait que les chèvres apprennent à exploiter de façon privilégiée les zones appétentes de la parcelle, entrainant une promiscuité et un risque de recontamination accru. Heureusement, les chercheurs d'INRAE disposent d'autres leviers. Ils associent également les chevreaux avec les adultes. Ces derniers, même s'ils restent sensibles au parasitisme, ont développé une certaine immunité. Comparativement aux chevreaux, ils excrètent, dans leurs fèces, moins d'œufs de parasites. Ils sont donc moins susceptibles de propager l'infestation. Certains individus confrontés au même parasite se montrent plus résistants que d'autres. Aussi, les chercheurs étudient-ils la diversité génétique au sein d'une race ou entre races, et les effets du mélange de races sélectionnées pour la production (sensibles aux parasites) avec des races rustiques, plus résistantes. Autant de déclinaisons d'un même concept qui permettent aux scientifiques d'identifier les associations les plus pertinentes, et qui offrent un choix d'alternatives aux éleveurs, en fonction de l'espace, des installations, des animaux et du budget dont ils disposent.



Réduire l'infestation parasitaire des lapins qui pâturent

Qu'est-ce qui explique que telle pratique agricole fonctionne, ou que telle action se révèle bénéfique pour un élevage ou au contraire sans effet, voire dommageable pour un autre ? Au contact des professionnels, les scientifiques recueillent des témoignages sur des pratiques qui méritent d'être étudiées. Un éleveur pratiquant l'élevage de lapins et volailles en agriculture biologique sur parcours herbagé fixe, a par exemple constaté qu'en faisant passer ses poulets sur les parcours de lapins, il obtenait une réduction du parasitisme de ces derniers. Un autre a observé le même effet en alternant, sur une même parcelle, l'élevage de lapins en cages mobiles et de moutons. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce phénomène. Les poules, en grattant le sol à la recherche de nourriture, ingèrent peut-être les parasites, coccidies ou helminthes, responsables de l'infestation des lapins. Il est également possible que les moutons ingurgitent les larves en même temps que l'herbe. Comme ces parasites sont le plus souvent spécifiques, ils sont digérés lors de l'ingestion, ce qui réduit la pression parasitaire pour les lapins. Mais coccidies et helminthes sont aussi détruits sous l'effet du froid, des fortes chaleurs ou d'une sécheresse. Du coup, quelle est la part de la mixité des élevages et des conditions météorologiques dans la régulation des parasites ? Pour la mesurer, les chercheurs d'INRAE ont lancé un vaste chantier de modernisation de leur élevage cunicole expérimental, afin de mettre en place un dispositif permettant l'accès des lapins à l'extérieur et la réalisation d'expérimentation multi-espèces. Un bâtiment d'élevage mobile, surnommé la « Mobigarenne », va être équipé de tous les instruments de mesure et d'observation, et pourra être déplacé sur un parcours herbagé, en alternance avec les moutons. Des analyses régulières des animaux, des conditions météorologiques et de l'état du parcours, permettront d'acquérir des connaissances sur les facteurs qui favorisent ou limitent les infestations, dans le but, à terme, de les traduire en recommandations et conseils à l'attention des éleveurs.





Différentes espèces de diatomées en microscopie optique (objectif 100 fois à immersion).

Les microalgues, incontournables indicateurs de l'état des milieux aquatiques

Les diatomées sont des microalgues qui présentent une diversité exceptionnelle. On en dénombre plus de 100 000 espèces dans le monde, présentes aussi bien dans la mer que dans les eaux douces ou les sols. Ce qui intéresse notamment les chercheurs, c'est que chaque espèce occupe une niche écologique particulière. Certaines vont se développer dans un environnement pollué, riche en matières organiques tandis que d'autres au contraire ne survivront pas à ces conditions. En analysant la composition des espèces de diatomées présentes dans un cours d'eau ou un lac, notamment dans les biofilms, on peut donc déterminer avec précision le niveau de pollution. L'observation des algues pour évaluer la qualité de l'eau est une méthode connue depuis plus d'un siècle mais c'est à partir des années 80 que les gestionnaires ont systématisé son usage pour gérer les milieux aquatiques. La technique consiste à prélever un échantillon du biofilm qui se développe à la surface des pierres immergées, puis de caractériser, au microscope, la diversité des espèces de diatomées qui s'y trouvent, de manière à déterminer avec précision le niveau de pollution. La procédure est longue - il faut compter plusieurs centaines d'individus - et requiert une connaissance experte de la taxonomie afin de réaliser une analyse. Or, la Directive cadre européenne sur l'eau de 2000, qui vise à atteindre un bon état écologique des milieux aquatiques, préconise d'utiliser les diatomées pour évaluer le niveau de qualité des eaux douces. Conséquence, en vingt ans, les demandes d'analyses ont explosé, amplifiées encore par la demande sociétale de plus en plus pressante. Mais le nombre d'experts capables d'effectuer des analyses est loin d'avoir suivi la même courbe ascendante. Les chercheurs d'INRAE ont peut-être une solution. Depuis 2010 en effet, ils 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 en 2016 et 2017 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. Cette innovation signe-t-elle la disparition des experts en taxonomie ? Surtout pas, de l'avis des chercheurs comme des gestionnaires ! Au-delà d'une première évaluation de l'état d'un milieu aquatique, la connaissance du terrain et de l'écologie des espèces des experts reste primordiale pour comprendre et interpréter le fonctionnement de ces écosystèmes.



Lac d'Aiguebelette (Savoie).

La biodiversité, gage de stabilité

Les écosystèmes naturels sont stables et multifonctionnels parce qu'ils sont organisés et abritent une forte biodiversité. Voilà l'un des enseignements d'une vaste étude internationale impliquant INRAE, qui a analysé les données satellites et les mesures de terrain provenant de 123 sites répartis sur l'ensemble du globe, depuis le maquis méditerranéen jusqu'à la savane africaine, en passant par les steppes de Chine et les forêts australiennes. Et cette biodiversité ne doit rien au hasard. Elle résulte d'une organisation précise, d'un assemblage d'espèces exploitant les ressources du milieu de façon complémentaire. De fait, au-delà du nombre, du type de plantes, de leur morphologie ou physiologie, c'est la manière dont un grand nombre d'espèces s'assemblent localement, qui conditionne la multifonctionnalité de l'écosystème et sa stabilité temporelle. Pour preuve, les chercheurs ont démontré un lien étroit entre les assemblages d'espèces, leur diversité, et la capacité des écosystèmes à maximiser les fonctions qui nous sont essentielles pour la production de nourriture, le stockage du carbone, la fertilité des sols ou la fourniture d'eau potable. Ainsi, le rôle de la biodiversité dans le bon fonctionnement des écosystèmes terrestres a pu être quantifié à une échelle globale. Il est tout aussi important que le climat ou le type de sol. Une perte de biodiversité causée par une perturbation du système, par exemple le changement climatique, peut provoquer des déséquilibres dans les assemblages d'espèces et avoir des conséquences dramatiques sur le fonctionnement des écosystèmes comme la perte de productivité biologique, le lessivage des sols ou l'avancée de la désertification. L'étude nous apprend surtout que la préservation de la biodiversité ne dépend pas seulement de notre capacité à conserver les espèces, mais plus largement de notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes et des interactions qui s'y déroulent. Dans cette optique, les chercheurs s'efforcent maintenant d'identifier les assemblages d'espèces les plus à même de favoriser la multifonctionnalité et la stabilité d'un écosystème face aux changements globaux en cours.



Échantillonnage de la végétation en Patagonie par une équipe de l'institut national de technologie agricole d'Argentine dans le cadre du projet ERC BIOCOM. © Juan Gaitán

Entre les abeilles, la concurrence est rude

L'abeille domestique *(Apis mellifera)* est précieuse. Pour son rôle dans la reproduction des plantes d'abord, mais aussi bien sûr pour le miel qu'elle produit dans les ruchers, sous le contrôle attentif des apiculteurs. C'est d'abord pour la préserver elle, que les pouvoirs publics, pressés par la société, ont décidé l'interdiction des néonicotinoïdes. Mais n'oublions pas que les abeilles sauvages ont elles-aussi, payé un lourd tribut à ces insecticides. Enfin du répit pour ces dernières ? Eh bien non, comme viennent de le démontrer des chercheurs d'INRAE. Les abeilles sauvages doivent en effet affronter la concurrence alimentaire… des abeilles domestiques qui envahissent leur territoire ! Les apiculteurs sont en effet toujours plus nombreux à installer leurs ruchers dans des milieux naturels, afin de les préserver des intrants chimiques et autres polluants utilisés dans les agrosystèmes. Et ce n'est pas sans conséquences. Lors d'une étude visant à mesurer l'impact de leur présence sur la faune locale, dans les garrigues du Massif de la Côte Bleue, au nord-ouest de Marseille, les chercheurs ont observé une diminution de 55 % des abeilles sauvages dans un rayon de 900 mètres autour des ruchers ! Un chiffre inquiétant, qu'il convient toutefois de relativiser. D'après les chercheurs, les abeilles de taille égale ou supérieure aux abeilles domestiques ont la capacité de se déplacer sur de longues distances, et donc au-delà de l'emprise des ruches, pour trouver leur nourriture. En outre, elles sont capables de recoloniser l'espace, une fois le rucher déplacé. Les petites abeilles, dont certaines ne mesurent que quelques millimètres semblent aussi s'accommoder de cette présence, peut-être parce qu'elles ne butinent pas forcément les mêmes fleurs. Plus qu'une perte de la biodiversité, on assiste donc à une perturbation qui peut se résorber à condition de libérer la pression. Les chercheurs préconisent ainsi de déplacer régulièrement les ruchers, de les espacer suffisamment pour éviter une saturation du milieu, ou encore de libérer la place suffisamment longtemps pour permettre aux populations natives de se réapproprier le milieu et de préparer les nids pour l'année suivante. Les travaux se poursuivent, et portent maintenant sur le suivi de la biologie et de la reproduction d'espèces plus spécialistes, et notamment celles qui ont des exigences particulières en termes d'habitat, tels l'anthidie, qui ne niche que dans des coquilles d'escargots. Les chercheurs vont mesurer l'impact de la compétition alimentaire sur la quantité de nids produits par ces abeilles, et donc sur leur descendance.

Apis mellifera.



Mesure du nectar.

Les plantes interagissent… et c'est formidable

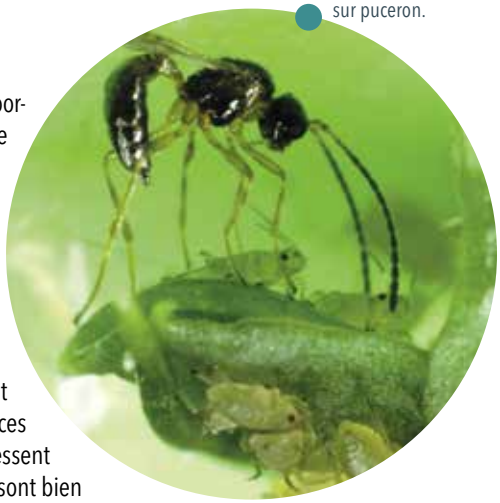


Arabidopsis thaliana.

Les recherches sur la génétique monopolisent un grand nombre de chercheurs d'INRAE. Mais ce n'est que depuis cinq ans qu'une équipe étudie spécifiquement les gènes impliqués dans la variation des relations entre les plantes. Objectif de cet ambitieux programme, comprendre les mécanismes moléculaires à l'origine des interactions entre espèces et variétés similaires ou au contraire différentes. Et les premières découvertes interrogent autant qu'elles étonnent. Ainsi, les chercheurs ont observé qu'environ 7 % des lignées génétiques de la plante modèle *Arabidopsis thaliana*, coopèrent entre elles. Lorsqu'on les plante côte à côte, elles produisent ensemble jusqu'à trois fois plus de biomasse que lorsqu'elles poussent seules, alors que, du fait de leur proximité, elles disposent de moitié moins de ressources. Comment s'opère cette interaction ? Communiquent-elles via des signaux émis par les feuilles ou le réseau racinaire ? C'est un mystère, que les chercheurs vont s'efforcer de percer. Parce qu'il n'est pas difficile d'imaginer ce que donneraient ces interactions, appliquées à des variétés d'intérêt agronomique ! Une autre découverte concerne cette fois les plantes adventices. Responsables de pertes de rendement supérieures à celles que causent les bactéries, les champignons ou les insectes ravageurs, elles sont à l'origine de 50 % des usages de pesticides en agriculture. Or, en étudiant *A. thaliana*, les chercheurs ont découvert des gènes qui permettent aux plantes qui les expriment, de produire une quantité de graines plus importante en présence d'une espèce adventice, avant que cette dernière ne soit éliminée ! Et tout récemment, ils ont constaté qu'*A. thaliana* conservait cette faculté de produire plus de graines, y compris lorsqu'elle était confrontée à plusieurs espèces de plantes adventices au lieu d'une seule, une situation commune en milieu cultivé. Mais le plus étonnant, c'est que dans ce cas, *A. thaliana* exprime des gènes différents de ceux précédemment identifiés. Là encore, on ne sait pas encore comment ça marche, mais comment ne pas être séduit à la perspective de transformer les adventices en plantes de service ?

Tous différents, tous holobiontes

Piqûre d'*Aphidius matricariae* sur puceron.



Holobionte. Le terme, apparu au début des années 90, désigne l'entité formée par un macroorganisme hôte, quel qu'il soit, et le cortège des microorganismes qu'il héberge. Eh oui, à ce titre, l'homme est un holobionte, au même titre qu'une plante, un oiseau ou un insecte. Cet écosystème à part entière que constitue l'holobionte est le théâtre d'interactions permanentes. Certaines bactéries entretiennent une relation mutualiste (symbiose) avec leur hôte, mais des conflits existent aussi entre les membres de l'holobionte. Les technologies de séquençage du vivant, toujours plus puissantes, permettent depuis quelques années, d'appréhender toute l'étendue de cette biodiversité cachée. En plus de caractériser le cortège des microorganismes associé à chaque hôte, les chercheurs s'efforcent d'identifier la nature des fonctions supplémentaires qu'ils fournissent à leurs porteurs, et tentent de comprendre leur impact sur la biologie, l'écologie et le potentiel évolutif de ces derniers. Avec déjà de sacrées surprises, comme l'ont constaté les chercheurs qui s'intéressent aux pucerons, qui comptent parmi les principaux ravageurs des cultures. Les pucerons sont bien connus pour héberger une bactérie nommée Buchnera aphidicola, avec laquelle ils entretiennent une étroite relation symbiotique depuis sans doute plus de 150 millions d'années ! En échange de l'hébergement (elle ne peut vivre en dehors de son hôte), la bactérie fournit au puceron des acides aminés et des vitamines qu'il ne trouve pas en quantité suffisante dans la sève dont il se nourrit. Plus récemment, des chercheurs ont fait une découverte surprenante en caractérisant une bactérie baptisée *Hamiltonella defensa*, qui protège les pucerons contre les attaques de micro-guêpes parasitoïdes en sécrétant une toxine ciblant spécifiquement l'œuf pondu par la guêpe dans la larve du puceron ! Une méchante déconvenue, quand on sait à quel point les parasitoïdes constituent un allié précieux des agriculteurs dans les programmes de lutte biologique sur de nombreuses cultures. Dans cette « course à l'armement » entre stratégies de lutte et parasites des cultures, les scientifiques cherchent à utiliser au mieux ces nouvelles connaissances en proposant par exemple de sélectionner des parasitoïdes capables de contourner cette résistance, ou en ciblant la bactérie protectrice. Ces travaux sur les insectes et leurs symbiontes démontrent l'importance de considérer un organisme dans sa dimension d'holobionte, et de caractériser la nature et le rôle des interactions qui s'y déroulent en permanence.

Les champignons forestiers, un monde d'interactions

Les champignons forestiers se répartissent en trois grands groupes. Les saprophytes sont en quelque sorte les fossoyeurs. Ils dégradent la matière organique, décomposent le bois mort et ainsi recyclent le carbone. Viennent ensuite les champignons symbiotiques ectomycorhiziens qui, au cours de l'évolution, ont mis en place un dialogue moléculaire afin d'interagir avec les plantes, notamment en leur fournissant des nutriments que leurs racines ne peuvent atteindre, en échange du sucre nécessaire à leur subsistance. Enfin, les champignons pathogènes synthétisent des toxines, qui affaiblissent ou tuent la plante, dans le but de s'en nourrir. Depuis plusieurs années, les chercheurs d'INRAE exploitent les nouveaux outils de la génomique comparative afin de mieux comprendre les traits de vie, autrement dit les caractéristiques écologiques des trois groupes. Après avoir séquencé et comparé les génomes de plusieurs centaines de champignons forestiers, ils ont observé des caractéristiques spécifiques à chacun des trois grands groupes écologiques. Et notamment la présence ou l'absence de groupes de gènes impliqués dans des processus complexes, tels que la dégradation de la lignine et de la cellulose, la communication symbiotique et le contrôle de l'immunité végétale, ou encore la synthèse de toxines. Les chercheurs ont poussé si loin l'analyse des traits de vie qu'ils sont parvenus à reconstruire le scénario évolutif de ces trois grands groupes de champignons forestiers. Et surprise, il s'avère que les champignons ectomycorhiziens ont pour origine des champignons décomposeurs de bois ou de la litière, apparus il y a plus de 50 millions d'années ! Des données précieuses pour mieux comprendre la nature, l'origine et le fonctionnement des mécanismes moléculaires qui régissent les interactions entre les arbres et les champignons. Ces connaissances pourraient permettre d'évaluer, voire de prédire l'impact du changement climatique, des pratiques sylvicoles ou des aménagements forestiers sur ces communautés. Les chercheurs ont ainsi observé qu'en exportant les débris végétaux de l'exploitation forestière afin de les valoriser (en tant que nouvelle source d'énergie), plutôt que de les laisser sur place comme il était coutume de le faire, on prive les champignons décomposeurs d'une importante source de nourriture, ce qui perturbe l'équilibre des communautés microbiennes, et appauvrit la biodiversité des sols.



Amanites tue-mouche.

Un modèle statistique pour soutenir la protection des espèces

Déterminer les espèces menacées qui doivent être protégées est difficile. D'abord parce qu'il s'agit de déterminer avec précision les risques qui pèsent sur leur survie, ensuite parce qu'il faut évaluer l'impact de leur disparition sur la biodiversité et sur l'équilibre de l'écosystème, enfin parce que la mise en œuvre de moyens de conservation coûte cher. La méthode employée classiquement pour prioriser la sauvegarde des espèces d'un réseau trophique repose sur une représentation des interactions sous forme de graphe, les sommets représentant les espèces, et les arêtes indiquant « qui mange qui ». L'analyse des caractéristiques « structurelles » du graphe est utilisée pour identifier les espèces les plus importantes, par exemple celles interagissant avec le plus grand nombre de proies ou de prédateurs, et qu'il convient de protéger en priorité. Mais des chercheurs ont récemment montré que l'analyse structurelle d'un réseau trophique n'est pas forcément le meilleur moyen de prioriser les espèces dans le cadre d'une action de sauvegarde. Pour pallier cette limitation, ils ont développé un modèle statistique basé sur les réseaux bayésiens, qui permet d'évaluer les probabilités de survie à long terme de toutes les espèces, en modélisant l'impact de l'ensemble des relations trophiques entre les espèces de l'écosystème considéré, et des mesures de protection de la biodiversité appliquées. Ce modèle pourrait aider les décideurs à mieux orienter les choix de conservation, qu'il s'agisse d'allouer des fonds pour la protection d'une espèce ou de prendre des mesures favorisant sa survie. Tous les écosystèmes sont concernés. En écologie marine, le modèle peut par exemple mesurer l'impact de la taille des mailles d'un filet de pêche sur la survie à long terme de certains poissons. En agriculture, il permet de prédire les effets de certaines pratiques telles que l'agroforesterie ou la rotation des cultures, sur la dynamique des communautés de ravageurs et d'auxiliaires, etc.





03.

Comprendre la dynamique des populations

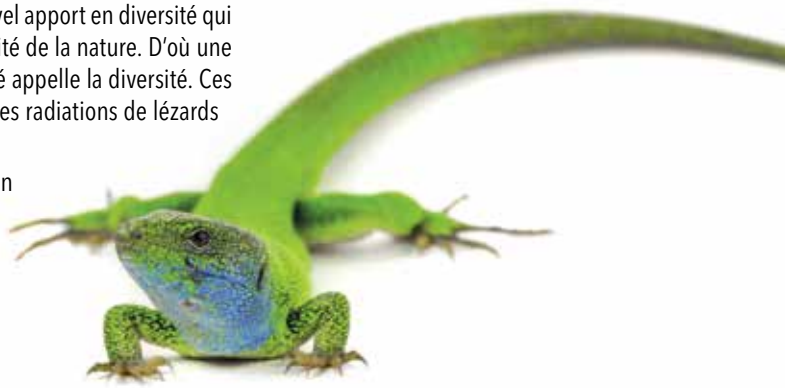
L'histoire de la biodiversité montre comment, au fil du temps, animaux, plantes, champignons et microorganismes se sont diversifiés pour utiliser aussi efficacement que possible les ressources dont ils disposaient. Qui a échoué à bien occuper sa niche, a disparu. Mais rien n'est fixe dans le monde vivant, et chaque espèce, de la plus généraliste comme le rat, à la plus spécialisée comme le grand panda, peut être à tout moment bousculée par de nouveaux arrivants. Les chercheurs d'INRAE s'intéressent tant à la dynamique des populations, qu'aux mécanismes évolutifs qui permettent à de nouvelles espèces de voir le jour.

Un lézard dans la théorie

Connus pour leur étrange membrane déployable sous la gorge, les lézards anoles des Antilles sont un exemple classique de radiation adaptative : une espèce originelle colonise une île et produit des dizaines d'espèces nouvelles aux tailles, couleurs, régimes et comportements variés occupant les différentes niches qui s'offrent à elle. Pourtant, en y regardant de plus près, les chercheurs ont remarqué quelque chose que le modèle classique d'apparition d'espèces ne prévoyait pas. Dans certaines îles comme Porto Rico, la diversification a beaucoup tardé : pendant des millénaires, les premières espèces arrivées sont restées telles quelles. Puis un beau jour, la diversification a explosé. Pourquoi ?

Une équipe INRAE a modélisé le processus de diversification adaptative résultant des interactions écologiques et de l'évolution. Elle a ainsi montré que, dans certains cas, il est nécessaire d'attendre l'arrivée de nouvelles espèces pour que la spéciation se mette en branle. C'est ce nouvel apport en diversité qui imprime ce coup de pression évolutif qui soudain déclenche toute la créativité de la nature. D'où une propriété à ajouter aux modèles de spéciation : dans certains cas, la diversité appelle la diversité. Ces résultats théoriques généraux peuvent expliquer ce « retard à l'allumage » des radiations de lézards anoles.

Ces résultats débouchent sur un sujet d'inquiétude : si le taux de disparition d'espèces que l'on observe aujourd'hui dans le monde se maintient, ne tombera-t-on pas, dans certains écosystèmes, sous un seuil qui inhibe l'apparition de nouvelles espèces ? Dans ce cas, la Terre serait condamnée à abriter des environnements plus pauvres en espèces et cela pour très longtemps.





Les arbres partent-ils aussi à la retraite ?

Grâce à la photosynthèse, les forêts absorbent tous les ans de 20 à 30 % du carbone que nous émettons. Voilà pourquoi, les équipes INRAE impliquées dans l'infrastructure européenne ICOS (pour *Integrated Carbon Observation System*) s'intéressent aux facteurs qui jouent sur la capacité photosynthétique des forêts. Par l'observation des flux de carbone de forêts à différents stades de maturité, ils ont montré que même les forêts très âgées continuent d'emmagasiner du carbone. À un taux plus faible qu'une jeune forêt, certes, mais de façon soutenue et avec une stabilité temporelle plus élevée. C'est dans les forêts les plus anciennes, avec une canopée étagée et diversifiée, que la photosynthèse est la plus résiliente aux aléas temporels. Deux explications à cela. D'une part, les vieux arbres tendent à prospecter un volume et une profondeur de sol plus grands, ce qui leur offre un réservoir d'eau et de nutriments important. D'autre part, la biodiversité les rend plus résilients aux perturbations climatiques, aux ravageurs et autres aléas. En effet, jeunes arbres, arbustes, buissons, graminées et autres végétaux en sous-étage capturent la lumière que les arbres laissent passer et compensent l'effet de perturbations comme la mort d'un arbre. D'où l'importance des forêts âgées et diversifiées pour la régulation du climat et du changement climatique.

Comment les herbivores changent la forêt



Depuis près d'un demi-siècle, les populations d'ongulés (sangliers, cerfs et chevreuils) ne cessent d'augmenter en France. Est-ce un bien ? Est-ce un mal ? Tout est relatif. Pour la chasse, l'abondance du gibier peut être une aubaine. Pour la production de bois, les animaux en sur-densité peuvent bloquer la régénération de la forêt, car ils broutent les jeunes pousses et écorcent les arbres. Une gestion durable de la forêt impose donc de faire des compromis, mais aussi de bien connaître l'impact des ongulés sur la forêt. C'est à quoi s'est attelée une équipe INRAE qui s'est demandée comment ces grands animaux modifient la diversité des plantes du sous-bois. Pour cela, ils ont observé l'état des forêts à l'intérieur d'enclos où les ongulés ne peuvent pas entrer, et l'ont comparé à celui de forêts plus ou moins densément peuplées de ces mammifères.

Résultat : plus il y a d'ongulés et plus le nombre d'espèces de plantes herbacées est grand. D'une part, les animaux broutent l'étage constitué par les ronces et autres arbustes, ce qui permet à plus de lumière d'atteindre le sol. D'autre part, ils disséminent sur leur passage des graines venues des milieux ouverts. Mais cette augmentation de richesse se fait au détriment des espèces les plus typiquement forestières, celles que l'on trouve dans les endroits plus fermés et moins perturbés. Les très fortes densités d'ongulés peuvent transformer la forêt en pré-bois. Aux gestionnaires, maintenant, de décider du type de forêt et des densités de populations d'ongulés qu'ils souhaitent.



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

Pas de Brexit pour les truites de mer

Chaque année, les truites de mer reviennent fidèlement pondre dans leurs rivières d'origine en France et en Angleterre. Les populations sont si caractéristiques, que l'on peut associer chaque individu capturé en mer à une rivière donnée. D'ailleurs, dans le cadre du projet Samarch, des équipes franco-britanniques sont en train de réaliser une cartographie des populations de truites afin de mieux connaître leurs routes de migration et les interactions entre populations.

Le déclin des meilleurs poissons

Voici un chiffre à faire frémir : en cinquante ans, l'abondance du saumon Atlantique a chuté de 70 %. Les populations qui trouvaient dans les grands fleuves comme la Seine, la Loire ou la Tamise leur site de reproduction, ont aujourd'hui disparu. Seuls les cours d'eau secondaires reçoivent encore les poissons. Autre constat inquiétant : les individus qui reviennent sont bien plus petits qu'avant à âge égal. Grands suspects de ce désastre : la surpêche et le changement climatique qui pourraient avoir réduit l'abondance de leurs proies et modifié leurs routes de migration. Pour les chercheurs d'INRAE, il est temps de faire bouger la législation pour mieux protéger ces poissons. Mais pour cela, il est nécessaire de mieux connaître la dynamique de ces populations et leur environnement, en particulier dans les estuaires et les zones côtières. C'est là le but du projet franco-britannique Samarch.

Les chercheurs s'appuient sur d'ingénieuses méthodes d'espionnage : ils ont placé sur des saumons capturés des capteurs capables d'enregistrer divers paramètres comme la pression ou la température. Puis, ils ont relâché les saumons ainsi équipés dans l'espoir de les voir revenir et de récupérer le capteur. En deux ans, 55 émetteurs ont été envoyés, et déjà sept ont été retrouvés. Par ailleurs, les chercheurs comparent des écailles des poissons provenant de collections conservées dans des Centres de Ressources Biologiques (CRB). Celles-ci conservent de précieuses informations environnementales, un peu à la manière des cernes des arbres. Ces données permettront de mieux connaître l'évolution des conditions dans lesquelles se meuvent les saumons, de mieux comprendre les raisons de leur déclin et de recommander de nouvelles mesures pour les protéger.

Vue microscopique d'une écaille de saumon adulte. © L. Lamireau, U3E



Pl@ntnet : l'appli qui fait de vous un botaniste

Pour établir une carte de répartition des espèces végétales, on peut, bien sûr, faire appel à des équipes de botanistes qui sillonneront tous les chemins de France et de Navarre équipés d'un petit carnet. Naturellement, cela coûte très cher, et, vu qu'on ne peut pas faire cela chaque année, on ne peut pas suivre de près les migrations des espèces. Une autre option est de faire appel aux citoyens. Car de nos jours, tout le monde peut aider la science à avancer.

L'application pour smartphone Pl@ntnet permet à l'usager de prendre des photos de plantes identifiées semi-automatiquement et de les partager. Plusieurs centaines de milliers d'amateurs l'utilisent déjà en France, avec pour résultat une masse de données géolocalisées pour une grande diversité d'espèces. Les chercheurs d'INRAE s'efforcent à présent de mettre au point les méthodes permettant de traiter ces données de qualité hétérogène et d'en tirer des cartes de répartition des plantes. Ceci permettra, en particulier, de suivre l'expansion des espèces envahissantes. Mieux encore : ces méthodes pourront aussi être utilisées pour étudier les populations d'oiseaux, d'insectes, etc. Citoyens scientifiques, à vos smartphones !

L'économie se penche sur les espèces invasives

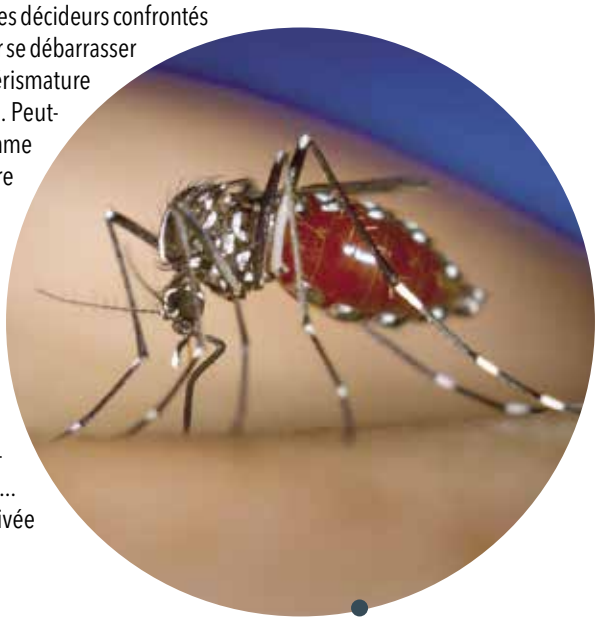
Les espèces invasives sont désormais l'une des premières causes d'extinction d'espèces. En Europe, on ne recense pas moins de dix mille espèces invasives qui chaque année causent environ 12 milliards d'euros en dégâts divers. Mais avant de s'en aller bille en tête combattre ces envahisseurs, il est nécessaire de bien comprendre leur écologie, leur dynamique de dissémination et les dégâts environnementaux occasionnés. Il faut aussi analyser leur impact économique. C'est à ces questions que s'attèlent les chercheurs d'INRAE qui évaluent le coût de leur arrivée et réalisent des analyses coût-bénéfices des actions menées contre ces espèces que l'on souhaiterait contrôler.

Bien choisir ses batailles

Dans la lutte contre les espèces invasives, il faut bien choisir ses batailles. Toutes ne valent pas la peine d'être menées : dans certains cas, l'envahisseur n'est pas si dérangeant. Dans d'autres, on aura beau dépenser des sommes astronomiques, on n'aura jamais le dessus. Les chercheurs d'INRAE développent des modèles qui prennent en compte divers paramètres économiques et écologiques afin de guider les décideurs confrontés à des choix parfois cornéliens. Par exemple, l'Europe investit beaucoup d'argent pour se débarrasser de l'érismature rousse, un canard américain dont le seul crime est de s'apparier à l'érismature à tête blanche, une espèce locale qui pourrait finir par perdre son caractère propre. Peut-être faudrait-il privilégier la lutte contre des nuisibles autrement plus dangereux, comme le frelon asiatique ou le petit coléoptère des ruches, qui mettent en péril la filière apicole ?

Ce que nous coûtent les insectes envahisseurs

Prenons le cas du moustique tigre, nuisible d'autant plus dangereux qu'il est le vecteur de maladies comme la dengue, le zika et le chikungunya. Profitant des hivers plus doux, il colonise désormais le sud de la France en plus des zones tropicales. Résultat : les premiers cas natifs de contagion de ces maladies autrefois tropicales ont déjà été répertoriés, avec un impact économique qui augmentera rapidement au cours des prochaines années. En effet, aux efforts pour freiner l'invasion s'ajoutent les frais sanitaires qu'il cause et les dégâts environnementaux... Le projet InvaCost, lancé en 2014, vise à caractériser les différents coûts liés à l'arrivée d'insectes comme le moustique.



Moustique tigre
Aedes albopictus.

Combattre la jussie

Elle semble bien inoffensive, cette petite fleur aquatique jaune venue d'Amérique. Pourtant, dans le parc naturel de Brière (Loire-Atlantique), la jussie bloque les canaux, acidifie les pâturages et nuit à l'élevage, impacte les poissons, étouffe les plantes aquatiques locales et gêne les pêcheurs et les touristes. Pour aider les gestionnaires du parc à la combattre, une équipe d'économistes d'INRAE a développé un outil informatique d'aide à la décision. En estimant les coûts, les bénéfices et l'efficacité des interventions dans chaque zone du parc, cet outil permet de mieux choisir les champs de bataille contre l'espèce invasive, compte tenu des contraintes budgétaires du parc.



Jussie.



04.

Suivi du comportement alimentaire d'une vache.
Récolte d'échantillon d'herbe correspondant aux prélèvements de l'animal. Centre INRAE Auvergne-Rhône-Alpes.

Cultiver la diversité génétique

Des vaches qui rejettent moins de méthane dans l'atmosphère ? Des poulets qui digèrent mieux ? Des variétés de blé qui résistent à la septoriose ou à la rouille ? Des arbres forestiers adaptés à la sécheresse ? L'évolution a doté la plupart des espèces d'une incroyable diversité génétique. Celle-ci constitue un réservoir infini de caractères qui peuvent être sélectionnés. Cette formidable diversité a largement été exploitée par nos ancêtres pour domestiquer les espèces et sélectionner les races ou variétés anciennes puis, au cours des dernières décennies, pour augmenter la productivité des cultures ou des élevages. Aujourd'hui, l'enjeu est d'utiliser cette ressource pour concevoir une agriculture plus économe en intrants, mieux adaptée au changement climatique et aux autres conséquences des changements globaux, et surtout, plus durable.

Conserver et exploiter la diversité génétique

Les collectionneurs du vivant

Races de volailles anciennes, variétés de riz ou de blé issues d'un terroir original, levures presque oubliées, l'érosion de la biodiversité n'épargne aucune espèce, pas même les plus domestiquées. Celle-ci met en péril une immense richesse génétique qui s'est forgée au fil du temps. Face à cette menace, l'une des réponses de la recherche pour préserver la diversité a été la création des Centres de Ressources Biologiques (CRB), qui préservent, étudient et mettent de vastes collections de génotypes à disposition des chercheurs.

INRAE gère ou co-gère 28 CRB dans le cadre de l'infrastructure de recherche nationale Ressources Agronomiques pour la Recherche (RARe). Des CRB, il y en a pour tous les usages. Il y a celui qui héberge des collections de bactéries, de levures et de champignons, ceux qui conservent les variétés de diverses espèces cultivées ou les semences de ruminants ou de volailles, celui qui est spécialisé dans les races de chiens. Il y a un conservatoire pour les espèces fruitières à pépins et un autre pour les espèces fruitières à noyaux, un pour les arbres des forêts et un autre pour les herbes des prairies. On trouve dans d'autres CRB des collections d'écailles de poissons, d'échantillons de lait, de sang, de tissus, de graines, de plantes entières, et bien sûr, de fèces pour ne pas laisser la diversité des microbiotes intestinaux sombrer dans l'oubli. Le tout, bien entendu, dans les meilleures conditions de conservation et de traçabilité.



Le Centre National de Ressources Génomiques Végétales - CNRGV conserve les gènes des plantes dans ses congélateurs. L'ADN stocké à -80 °C est mis à disposition des chercheurs.

Un pont entre passé et avenir

Supposons qu'un chercheur s'intéresse aux associations entre cépages et levures permettant d'obtenir une certaine qualité de vin. Quelle aubaine pour lui de pouvoir faire appel au CRB Vigne, qui, depuis 1949, conserve des cépages venus de tous les pays viticoles. Quelle chance d'avoir aussi sous la main les trésors du Centre international de ressources microbiennes (CIRM) Levures qui conserve 237 espèces de levures utilisées pour la préparation du pain, la fermentation du vin, du cidre, de la bière ou du fromage.

Tous les ans, les collections des CRB sont à la base de nombreux travaux destinés à identifier, dans la diversité génétique des espèces, des caractéristiques originales qui pourraient améliorer cultures et animaux d'élevage. Ces centres sont donc un véritable pont entre la richesse génétique dont nous avons hérité et les défis qui se posent au monde agricole et à nos sociétés.

La grande épopée des animaux



Il y a environ 10 000 ans au Moyen-Orient, l'Homme a lié son destin à celui des vaches, cochons, moutons et chèvres qui l'ont accompagné au gré de ses migrations. Une équipe INRAE s'intéresse à l'histoire évolutive des animaux de rente depuis leur domestication. En décortiquant le contenu de l'ADN des espèces actuelles, et en comparant à celui de l'ADN retrouvé dans des ossements provenant de sites archéologiques, les chercheurs mettent en lumière des « signatures de sélection » qui correspondent aux zones du génome qui gouvernent les caractères que les éleveurs se sont efforcés de conserver dans leurs troupeaux. Par exemple, les éleveurs ont activement sélectionné au fil des millénaires, le gène qui prive les moutons de leurs cornes afin de les rendre plus faciles à gérer. De la même façon, ils ont sélectionné des gènes de résistance aux maladies, de productivité ou ceux qui contrôlent la taille, le pelage et l'apparence des animaux. La mise en lumière de ces traces historiques de sélection pourrait permettre d'identifier de nouvelles régions du génome qui participent à la productivité et à l'adaptation des animaux à des environnements difficiles.

Comment le peuple s'est emparé d'un mouton royal

Peu avant la Révolution, le Roi d'Espagne, Charles III, offre gracieusement à son homologue français, Louis XVI, un troupeau de moutons Mérinos connus pour la grande finesse de leur laine. Cette lignée a été conservée et fait encore aujourd'hui la fierté des bergeries de Rambouillet. Mais ces moutons espagnols ne sont pas restés sagement dans leur enclos. Sous Napoléon, ils ont été croisés à des races locales. Les chercheurs d'INRAE qui ont étudié la diversité génétique des moutons français, ont retrouvé dans le génome du cheptel francilien de possibles traces de ces mérinos du Roi d'Espagne. Leurs gènes auraient bel et bien amélioré les races locales, et auraient donc été sélectionnés par les éleveurs.

Valoriser la diversité pour favoriser la durabilité des systèmes

Quand la diversité génétique participe à l'évolution de l'aquaculture



Les stocks de poissons des océans sont mis à rude épreuve. Certes, l'aquaculture a pris en partie le relais de la pêche. Cependant, pour nourrir les poissons, le plus efficace est de les nourrir avec du poisson pêché en mer. Ou plutôt était... car les recherches, en particulier celles des scientifiques d'INRAE, ont contribué à faire évoluer les pratiques. Déjà, on peut remplacer aujourd'hui plus de 80 % des farines et huiles de poisson par des produits végétaux. Mais les chercheurs veulent aller plus loin en exploitant la diversité génétique présente au sein des populations de poissons. Ainsi, ils ont sélectionné une lignée de truites arc-en-ciel capable de fort bien grandir avec un aliment 100 % végétal. Dans le cadre du projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) Agreenfish, ils explorent les mécanismes d'adaptation à ce régime pour identifier les caractéristiques biologiques qui permettent à certaines truites d'accepter une alimentation constituée exclusivement de produits végétaux tandis que d'autres n'en sont pas capables. Ces travaux contribuent à limiter l'utilisation des produits marins et en retour, à préserver la biodiversité marine.



Réduire la quantité de méthane émise par les vaches

Environ 5 % des gaz à effet de serre produits en France sont dus aux bovins et à leur vilaine habitude de roter du méthane. De plus, les animaux nourris à l'herbe et aux fourrages grossiers produisent plus de méthane que ceux nourris aux céréales. Comment alors réussir à réduire la contribution de l'élevage des bovins au changement climatique tout en maintenant une alimentation des animaux qui n'entre pas en compétition avec la nôtre ? C'est tout le défi qu'essaient de relever les chercheurs d'INRAE en s'intéressant de près aux différences entre individus. En effet, au sein d'une même race, certains animaux produisent jusqu'à 15 % de méthane en moins que leurs congénères. Une expérience menée sur 350 génisses a montré que cette variabilité pouvait s'expliquer à 13 % par leur variabilité génétique et à 23 % par les différences de composition du microbiote de leur rumen. Reste maintenant à découvrir quels sont les déterminants génétiques qui jouent sur cette capacité à émettre moins de méthane.

Des gènes pour une viande tendre et juteuse

Comment l'aimez-vous, votre steak ? Tendre, juteux, savoureux, bien coloré sans doute. Une équipe INRAE a recherché les zones qui gouvernent les caractères de qualité de la viande dans le génome des races bovines les plus populaires en France : la Charolaise, la Limousine et la Blonde d'Aquitaine. Pour cela, les chercheurs ont d'abord évalué la qualité de la viande de 3 300 animaux. À noter qu'un jury d'experts les a même assistés dans cette tâche. À l'aide de puces ADN, ils ont ensuite procédé à l'analyse génétique de ces caractères de qualité. Ils ont ainsi mis en évidence plusieurs déterminants génétiques de la qualité de la viande et montré qu'ils peuvent être transmis à la descendance.

Moins de compétition entre animaux et humains

C'est l'une des grandes critiques qui pèsent sur l'élevage, en ces temps de lutte contre le réchauffement climatique : pour produire des protéines animales, il faut utiliser beaucoup de protéines végétales qui auraient pu servir à l'alimentation humaine. À l'heure où la demande mondiale en produits animaux augmente, la compétition entre humains et animaux ne fait que croître. Pourtant, les animaux sont aussi capables de consommer des aliments dont nous ne saurions que faire : herbe pâturée, fourrages conservés, coproduits de filières végétales, résidus de cultures... Augmenter la part de ces produits dans l'alimentation animale est la clé pour réduire d'autant cette compétition.

Pour répondre à cet enjeu, les chercheurs mettent à profit la diversité génétique intra-spécifique des poulets, vaches, moutons et porcs. En voici deux exemples :

La diversité animale pour des systèmes d'élevage allaitant plus agro-écologiques

Comment diminuer la part des concentrés à base de céréales et de tourtaux, dans l'alimentation des ruminants ? La réponse qu'étudient les chercheurs semble tomber sous le sens : leur faire brouter de l'herbe et les nourrir avec des fourrages. Pourtant, dans le contexte agricole actuel, cela n'est pas si simple. Pour s'affranchir des aléas climatiques et sanitaires, les éleveurs d'ovins préfèrent souvent engraisser leurs agneaux en bergerie. Quant aux bovins, les jeunes mâles issus des troupeaux allaitants sont souvent exportés en Italie pour engraissement intensif après sevrage. Pour les deux espèces (bovins et ovins), une solution explorée par les chercheurs du projet Salamix est de trouver, dans la diversité génétique des animaux, des croisements de races qui permettent de favoriser la finition à l'herbe. Ils étudient pour cela un croisement entre une race rustique (la Salers pour les bovins, la Limousine pour les ovins), et une race herbagère précoce (l'Angus pour les bovins et la Suffolk pour les ovins). La deuxième pratique testée par les chercheurs est l'association des deux espèces, bovins et ovins, dans un système mixte. L'association des deux espèces permet de mieux valoriser l'herbe et de réduire les infestations parasitaires qui surviennent au pâturage, en diluant le nombre de parasites par espèce, la plupart d'entre eux étant spécifiques à une espèce animale. On limite alors les besoins de traitements médicamenteux et on favorise la croissance des animaux.



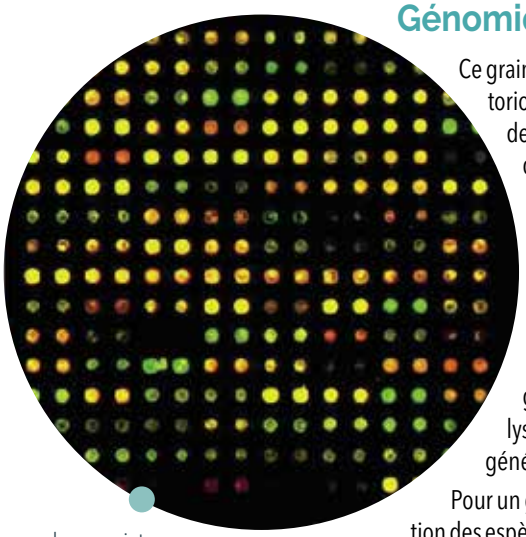


Diversifier le régime des poulets

Au sein des lignées commerciales de poulets, il existe une grande variabilité dans les performances de digestion des individus. C'est donc que la génétique a son mot à dire. En mettant à profit la variabilité génétique des poulets, des chercheurs d'INRAE sont parvenus à sélectionner une lignée qui grossit très bien avec des aliments alternatifs, par exemple des coproduits de céréales et de protéagineux, de préférence made in France. Cela éviterait l'importation de soja mais ce n'est pas tout : ces poulets aux capacités digestives accrues produisent, pour cette même raison, beaucoup moins de déchets que leurs congénères. Ceci diminue d'autant leur impact sur l'environnement. Pour aller plus loin dans cette voie, les chercheurs ont mis au point un outil qui permet aux sélectionneurs d'améliorer ce caractère afin de mettre à la disposition des éleveurs des poulets mieux adaptés aux aliments de demain.

Valoriser la diversité génétique par sélection génomique

Génomique : sélection 3.0



Biopuce, chaque point correspond à un gène et sa couleur traduit son niveau d'expression.

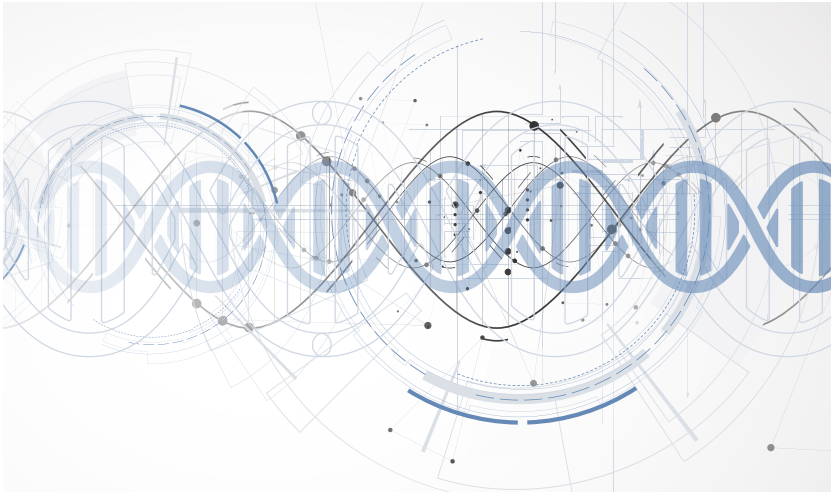
Ce grain de blé que j'ai dans la main, est-il bien équipé génétiquement pour résister, plus tard, à la septoriose ? Je n'ai plus à attendre l'attaque du champignon pour en avoir le cœur net. La progéniture de ce taureau-ci sera-t-elle aussi productive que celle de son voisin de stalle ? Je peux le découvrir dès à présent, sans attendre que sa descendance devienne adulte. En effet, une analyse de l'ADN me permet désormais de prédire au moins en partie les caractéristiques des individus avant qu'elles ne s'expriment. Ceci, grâce à une révolution qui s'étend rapidement dans tout le monde agricole et forestier : la prédiction génomique et ses applications en sélection.

Pour prévoir les caractéristiques d'un individu ou d'une lignée, il suffit de comparer son génome à celui d'une population de référence dont les génotypes et les phénotypes individuels sont bien connus. Pour ce faire, les chercheurs disposent désormais d'outils d'une puissance inimaginable il y a quelques années, comme des puces à ADN capables d'identifier, en une seule analyse, des millions de nucléotides présents sur le génome. Celles-ci permettent d'explorer la diversité génétique de chaque espèce, et d'associer des phénotypes à des régions précises du génome.

Pour un grand nombre d'espèces, la génomique bouleverse les perspectives d'amélioration et de sélection des espèces exploitées en agriculture. En effet, tous les caractères d'intérêt et même les plus complexes, de la longueur des racines d'une plante aux capacités digestives d'un poulet, peuvent être analysés et sélectionnés s'ils sont héritables. Ceci promet le développement de nouvelles races et variétés capables de répondre au mieux à la complexité des défis qui doit relever l'agriculture : changement climatique, maladies, productivité, réduction d'intrants, tout en veillant à une bonne gestion de la diversité génétique sur plusieurs générations.

La révolution « omique »

En complément de la génomique, de nouvelles techniques en plein essor offrent encore plus de maîtrise sur la sélection des lignées ou individus-élites. Il s'agit de la série dite des « omiques » : transcriptomique, protéomique, métabolomique… Ces approches permettent, par exemple, l'analyse de l'ensemble des protéines synthétisées par un organisme, de l'ensemble des ARN messagers, ou bien encore de l'ensemble des métabolites produits. Grâce à elles, il est possible d'étudier comment les gènes s'expriment en fonction des conditions environnementales. Ainsi, les « omiques » permettent de mieux appréhender le comportement des lignées et variétés, de prévoir leur rendement, leur résistance, leur efficacité, non pas pour un environnement moyen qui n'existe peut-être pas mais dans plusieurs contextes environnementaux bien précis et spécifiques de chaque animal et végétal.



La phénomique : une omique low-cost

Des équipes INRAE sont parvenues à prévoir le rendement et la date de floraison d'une lignée de blé dans un site donné à l'aide d'un simple spectromètre infrarouge. Pour cela, les chercheurs ont enregistré des données spectroscopiques sur des poudres de grains ou de feuilles de blé. Puis, ils ont comparé ces données avec les spectres d'un ensemble de lignées de référence dont ils connaissaient déjà le phénotype. Pour bien asseoir cette preuve de concept, ils ont répété l'expérience avec des peupliers. Cette fois, ils ont prédit avec une bonne précision la croissance des arbres et les dates d'apparition et de chute des feuilles à partir de spectres établis sur des poudres de bois.

Cette innovation ouvre un nouvel horizon : celui de la phénomique. Plus facile et moins chère à mettre en œuvre que les autres « omiques », elle permettra de mettre à disposition d'un plus grand nombre de sélectionneurs les techniques prédictives de sélection haut débit. La phénomique pourrait ainsi devenir une solution *« low cost »* pour dynamiser l'amélioration génétique d'espèces animales et végétales qui ne jouissent pas d'énormes marchés.



Plateforme de phénotypage à haut-débit du Laboratoire d'écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux (LEPSE) à Montpellier. Les objectifs sont d'analyser et modéliser la variabilité génétique des réponses des plantes à des conditions environnementales contrastées, en particulier la sécheresse et les températures élevées.

Qui a peur du changement climatique ?

Le changement climatique, qui déploie son cortège de sécheresses à répétition, vagues de chaleur et besoins accrus en eau, est déjà là. Les scénarios climatiques prévoient des chutes dans les rendements de certaines cultures et de rudes épreuves pour les agriculteurs. Les éleveurs et les gestionnaires des forêts ne sont pas épargnés : le changement climatique les concerne aussi. Pourtant, la situation est loin d'être désespérée. En effet, le monde agricole et forestier dispose d'un allié de taille : l'immense diversité génétique des espèces animales et végétales.

Les chercheurs d'INRAE s'efforcent de trouver dans la variabilité génétique du maïs, du blé, des pommes de terre, des porcs, des poulets… les caractères qui leur permettront de s'adapter et de mieux résister par exemple au manque d'eau ou aux températures caniculaires. Une fois ces lignées disponibles, les éleveurs et agriculteurs n'auront plus qu'à choisir les plus performantes sous ces nouvelles conditions.

Un exemple d'aujourd'hui ? Les agriculteurs français choisissent déjà des variétés de maïs plus tardives pour contrebalancer la chaleur et le manque d'eau des mois estivaux. Une équipe INRAE a modélisé cette capacité d'adaptation en fonction de 12 scénarios climatiques, et montré que les rendements du maïs, malgré le changement climatique, pourraient se maintenir ou légèrement augmenter si les agriculteurs continuent à adapter leurs variétés.

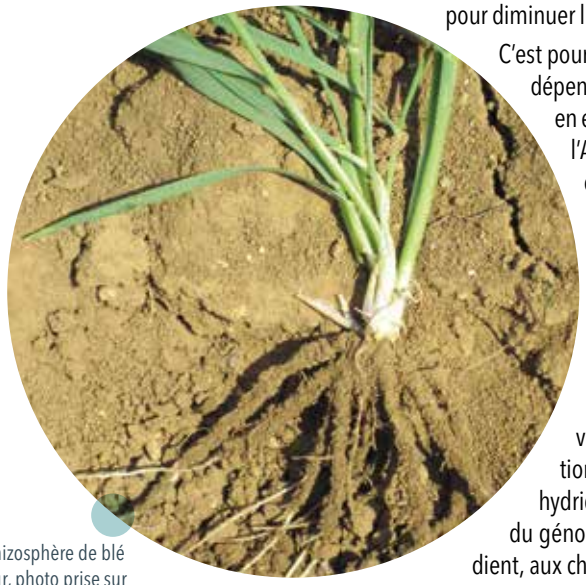
Choisir ses semences : un modèle à la rescousse

Je suis producteur de maïs, et je voudrais semer la variété qui m'offrira le meilleur rendement dont mon champ est capable. Comment choisir cette variété ? Le rendement dépend, bien sûr, des interactions entre le génome de la variété et les conditions environnementales. Mais devant tant de combinaisons possibles, comment ne pas perdre la tête ? Heureusement, les chercheurs se penchent sur la question.

Une équipe INRAE vient de mettre au point un modèle capable de prédire le rendement d'un champ de maïs en fonction du génome de la plante et des conditions environnementales. Pour cela, ils ont étudié le rendement de 246 variétés de maïs dans 25 sites situés dans 5 pays européens et au Chili. Le modèle offre déjà des prédictions plus précises que celles obtenues par les moyens actuels. Ainsi, il pourra devenir un outil de décision permettant aux agriculteurs de mieux choisir leurs semences, et d'atténuer les effets du changement climatique.

Comment rendre l'agriculture plus agro-écologique ?

Grâce à la sélection, les rendements des variétés commerciales des grandes cultures ont fortement augmenté au fil des dernières décennies. Certes, mais il ne faut pas perdre de vue que ces variétés ont été développées pour pousser dans le meilleur des mondes possible : loin des contraintes d'eau et avec un apport important d'intrants. Le changement climatique et les efforts pour diminuer l'utilisation d'engrais chimiques changent la donne.



Rhizosphère de blé dur, photo prise sur un essai mené à l'unité expérimentale INRAE Diascope à Mauguio (Hérault).

C'est pourquoi, en cohérence avec le développement de l'agro-écologie et la volonté de réduire la dépendance aux intrants, la recherche s'efforce de créer de nouvelles variétés moins gourmandes en eau, en phosphore et en azote. C'est là l'un des buts du projet SolACE (pour Solutions pour l'Amélioration des Agro-écosystèmes et l'efficience des cultures pour l'utilisation de l'eau et des éléments minéraux), qui réunit 25 partenaires européens : trouver, dans les réserves de diversité génétique du blé dur, du blé tendre et de la pomme de terre, les traits permettant d'adapter ces cultures majeures à des conditions plus rudes sans pour autant perdre en efficacité.

La racine du problème

Les plantes ne restent jamais immobiles : ce sont même de grandes exploratrices. Avec leurs racines, elles parcourent le sol pour aller chercher l'eau et les nutriments qui les font vivre. Mais voilà, l'agriculture intensive, basée sur l'irrigation et les engrais, n'a pas sélectionné les variétés au système racinaire le plus performant pour faire face à la fois au stress hydrique et au stress nutritionnel. Le projet SolACE cherche à caractériser les traits et les régions du génome qui permettent aux plantes de mieux explorer le sol. Pour cela, les chercheurs étudient, aux champs et dans de grandes plateformes de phénotypage, 250 variétés de blé dur, 250 de blé tendre et 26 variétés de pomme de terre. À partir du comportement des racines face à ces stress combinés, ils espèrent trouver les profils génétiques les plus efficaces pour tirer parti des ressources du sol, et obtenir des variétés mieux adaptées à des sols à la fois plus secs et plus pauvres.

Resserrer l'alliance plantes-microbes

Les relations entre certains microorganismes du sol et les plantes sont parmi les plus beaux exemples de vie en communauté. Les premiers, en colonisant les racines, aident la plante à obtenir eau et nutriments. En échange, celle-ci leur cède une partie des sucres qu'elle produit. Or, au sein d'une même espèce végétale, certains individus sont capables d'établir une alliance plus étroite et plus performante avec ces microbes. D'où l'idée, explorée par les chercheurs du programme SolACE, d'aller chercher dans cette variabilité génétique, les profils qui s'associent le mieux avec les bactéries et les champignons du sol. Le but : obtenir des plantes plus résistantes aux stress.

Des idées fraîches pour l'élevage des porcs

De tous les animaux d'élevage, les porcs comptent parmi ceux qui souffrent le plus de la chaleur. Au grand dam des éleveurs, lorsque l'animal suffoque, il arrête de se nourrir et peut même en mourir. Les éleveurs qui ont vécu la canicule de 2003 peuvent témoigner de cette surmortalité. Pourtant, aux Antilles, il existe une race particulièrement bien adaptée aux chaleurs torrides. Il s'agit de la race Créole, qui a évolué à partir des porcs emmenés par les conquistadors espagnols au XVIème siècle. Dans le cadre du projet PigHeaT, les scientifiques d'INRAE cherchent à caractériser les déterminants génétiques de cette adaptation à la chaleur et à mieux comprendre les mécanismes physiologiques développés par cette race. Ils cherchent aussi à identifier des biomarqueurs permettant de prédire l'adaptation à la chaleur de toutes les races porcines. Pour les cochons aussi, l'heure de l'adaptation au changement climatique a sonné.



GenTree ou la mise à profit des différences

Considérons le cas du pin sylvestre. Cet arbre aux mille usages a su s'adapter à des climats on ne peut plus variés. Des sierras espagnoles aux steppes sibériennes, en passant par l'Écosse et la Scandinavie, aucun climat ne semble le rebuter. Au fil des millénaires, des migrations et de l'évolution, chaque population locale a développé ses propres caractéristiques, ses propres mécanismes d'adaptation et son propre arsenal génétique.

C'est en exploitant cet immense réservoir de biodiversité que l'on pourra préparer les forêts au changement climatique. C'est là l'idée en toile de fond de GenTree, un projet de recherche piloté par INRAE qui associe 22 partenaires européens. GenTree se penche sur la diversité de douze espèces majeures d'arbres forestiers, parmi lesquelles des espèces emblématiques des forêts françaises comme le chêne sessile, le sapin pectiné, le hêtre, le peuplier noir et bien sûr, le pin sylvestre. Parmi les principaux objectifs des chercheurs, améliorer les méthodes de gestion de ces ressources naturelles et faire évoluer normes et réglementations de façon à mieux conserver et valoriser cette diversité génétique.

La migration assistée à la loupe

L'une des normes les plus répandues pour la gestion des forêts indigènes est de n'y semer ou planter que des graines récoltées sur place ou à proximité de ce que l'on appelle la « région de provenance locale » en termes forestiers. Voilà qui semble tomber sous le sens. Il faut, bien sûr, protéger le patrimoine génétique des ressources locales, et ne permettre leur renouvellement que par des arbres bien adaptés à leur milieu. Oui, mais... le changement climatique met tout sans dessus-dessous... Au vu des baisses de précipitations et des augmentations de température annoncées, ne vaudrait-il pas mieux, parfois, planter des variétés venues de climats plus secs et chauds ? Une telle intervention, appelée migration assistée, ne doit être réalisée que de façon raisonnée. Avant de la mettre en œuvre, il faut en avoir mesuré toutes les conséquences à court et long termes. C'est à ces questions sur les capacités d'adaptation des ressources génétiques que s'attellent les chercheurs de GenTree. Leur but, mettre en accord les normes de gestion des forêts et les données scientifiques les plus solides afin de réduire les effets du changement climatique.

Jeu de massacre sur le Mont Ventoux

Depuis la terrible canicule de l'été 2003, les forêts du Mont Ventoux dépérissent sous les sécheresses à répétition. Pourtant, certains arbres, les plus coriaces, résistent. Les chercheurs d'INRAE s'intéressent à ces sapins et hêtres capables de survivre à des conditions mortelles pour la plupart de leurs congénères. Premier constat : ceux-ci sont capables d'explorer le sol bien plus en profondeur que leurs voisins. Est-ce un comportement lié à leurs gènes ? D'autres caractères génétiques peuvent-ils expliquer leur résistance ? La réponse à ces questions permettra de mieux comprendre leurs mécanismes d'adaptation à la sécheresse et de mettre à profit ces caractères pour envisager une sylviculture favorisant les ressources génétiques les plus résistantes au changement climatique.



Dépérissement de sapins sur le versant nord du Mont Ventoux suite aux évènements de canicule et sécheresse depuis 2003.

Des prairies plus riches, plus grasses et plus constantes

L'herbe dans le pré du voisin sera-t-elle toujours aussi verte avec le changement climatique ? Sans doute, pour peu qu'il sache mettre à profit la biodiversité végétale. On savait déjà que la diversité en espèces avait un effet positif sur la productivité des prairies. À présent, grâce aux travaux d'une équipe d'INRAE, on sait que la diversité au sein même des espèces semées est tout aussi importante. Au terme d'une expérience qui a duré six ans, les chercheurs ont montré que cette diversité intra-spécifique stabilise la production des prairies semées au cours du temps et permet un meilleur équilibre entre légumineuses et graminées. Mieux encore, en diversifiant espèces et variétés au sein de la prairie, on obtient des prairies plus résilientes face au stress hydrique et au vieillissement. Forts de ces résultats, les scientifiques conseillent les semenciers pour préparer des mélanges diversifiés d'espèces prairiales.



Faire face aux bioagresseurs



La recherche entre dans la course aux armements

« À la ferme », écrivait Orwell, *« certains sont plus égaux que d'autres »*. Chez les animaux et les végétaux, il y a les petites natures qui tombent malades à tous les coups et les durs-à-cuire que rien ne peut terrasser. La diversité génétique au sein d'une espèce donnée explique une partie de ces différences. Certains individus ont la chance de porter les « bonnes » variantes des gènes, celles qui leur permettent de lutter contre virus, bactéries, champignons, insectes et autres agresseurs. Ils sont en tête de cette course aux armements qui se livre depuis la nuit des temps entre les espèces et leurs agents pathogènes.

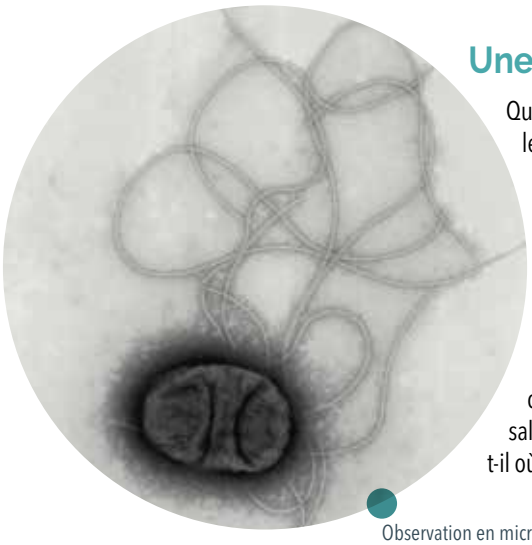
Dans le contexte de la transition agro-écologique vers des formes d'agriculture qui fassent moins appel aux antibiotiques et aux pesticides, les chercheurs analysent ces caractères et mécanismes de défense associés dans le but de mieux les exploiter. Mais ce n'est pas tout : les équipes d'INRAE développent des stratégies pour éviter que les agresseurs n'apprennent trop vite à contourner les défenses de nos animaux et cultures.



Blinder le blé contre la septoriose

Un milliard d'euros par an : voilà ce que les agriculteurs européens dépensent en fongicides pour défendre leur blé contre la septoriose. Cela n'empêche pas ce champignon de causer en moyenne une perte équivalente à une tonne et demie de blé par hectare et par an. Plus inquiétant encore, ce pathogène possède une capacité évolutive hors du commun, il est de moins en moins sensible aux fongicides. Afin de mieux défendre les cultures, une équipe INRAE cherche à caractériser les mécanismes de résistance du blé. Elle a ainsi découvert, grâce au CRB « Céréales à paille » d'INRAE, une variété de blé venue de Colombie qui dispose d'une résistance à large spectre contre la septoriose. Pour la mettre à profit, ils caractérisent l'arsenal génétique de cette variété.

Cette même équipe est parvenue à caractériser, pour la première fois, l'un des 21 gènes de résistance dont dispose le blé pour se défendre contre la septoriose. Le gène Stb6 code pour une protéine transmembranaire capable de reconnaître les modifications moléculaires engendrées par le champignon et de déclencher les mécanismes de défense face à l'agression. Avec ces travaux, les chercheurs veulent offrir aux semenciers de nouveaux leviers pour contrer le champignon.



Une perfide bactérie des volailles

Quoi de plus insidieux que la salmonelle ? Cette bactérie peut vivre dans l'intestin des poulets sans que ceux-ci ne tombent malades. Mais lorsque la salmonelle passe aux œufs et à la viande, c'est nous, bipèdes sans plume, qui en subissons les amères conséquences. Pourtant, comme l'a montré une équipe INRAE, tous les poulets ne réagissent pas de la même façon à la présence de la bactérie. Alors que certains gardent longtemps l'agent pathogène dans leur intestin, d'autres l'expulsent aussi sec. Les chercheurs d'INRAE tentent à présent d'identifier les gènes à l'origine de ces différences. Deux grandes hypothèses, sans doute complémentaires, sont à l'étude. D'un côté, certains gènes pourraient doter les individus non porteurs d'un système immunitaire plus efficace. De l'autre, la composition de leur microbiote intestinal les rendrait capables d'éliminer rapidement la salmonelle. Là aussi, leurs gènes pourraient en être en partie responsables. Le jour viendra-t-il où la bactérie ne saura plus où se cacher ?

Observation en microscopie électronique à transmission des flagelles de *Salmonella enteritidis*.

Les arbres font de la résistance

A priori, la lutte entre les arbres et les pathogènes paraît bien inégale : en effet, virus, bactéries et champignons se reproduisent à une allure folle, ce qui leur permet de muter, d'innover et de trouver de nouvelles stratégies pour attaquer des organismes qui doivent leur sembler pétrifiés dans le temps. Il n'en est rien. Le séquençage du génome du chêne, publié en 2018, a montré que l'évolution a bien donné aux grands arbres les armes pour se défendre. Les chercheurs d'INRAE ont montré que le système immunitaire des arbres dispose de deux fois plus de gènes que les plantes annuelles et qu'ils ont une diversité génétique très élevée. Deux atouts qui leur permettraient de faire face à ces bioagresseurs tout au long de leur vie.



La forêt qui se cache dans l'arbre

Du neurone au phagocyte, en passant par les hépatocytes, toutes nos cellules partagent le même génome. Longtemps, on a cru que ce qui était vrai pour les animaux était vrai pour tous les organismes multicellulaires. Or, de récents travaux de séquençage ont montré qu'au fil des ans, les branches des arbres divergent génétiquement les unes des autres. Des mutations s'accumulent dans le génome des branches, faisant de l'arbre une véritable « chimère » végétale. Une équipe d'INRAE a montré que, chez le chêne, ces mutations pouvaient même se transmettre aux descendants. Pour l'arbre, cette diversité intra-individuelle peut constituer une assurance-vie : les chercheurs ont observé en effet des cas où certaines branches tiennent tête à des insectes défoliateurs, alors que d'autres dépérissent. C'est que, au fil des mutations, les premières ont dû acquérir des mécanismes de résistance qui leur ont permis de survivre.



Le paysage : allié contre les maladies

Lorsqu'un semencier propose une variété de plante résistante à une maladie, les agriculteurs l'utilisent le plus souvent jusqu'à ce que, au bout de quelques saisons, le pathogène trouve le moyen de contourner la résistance. Il n'y a plus qu'à recommencer à zéro.

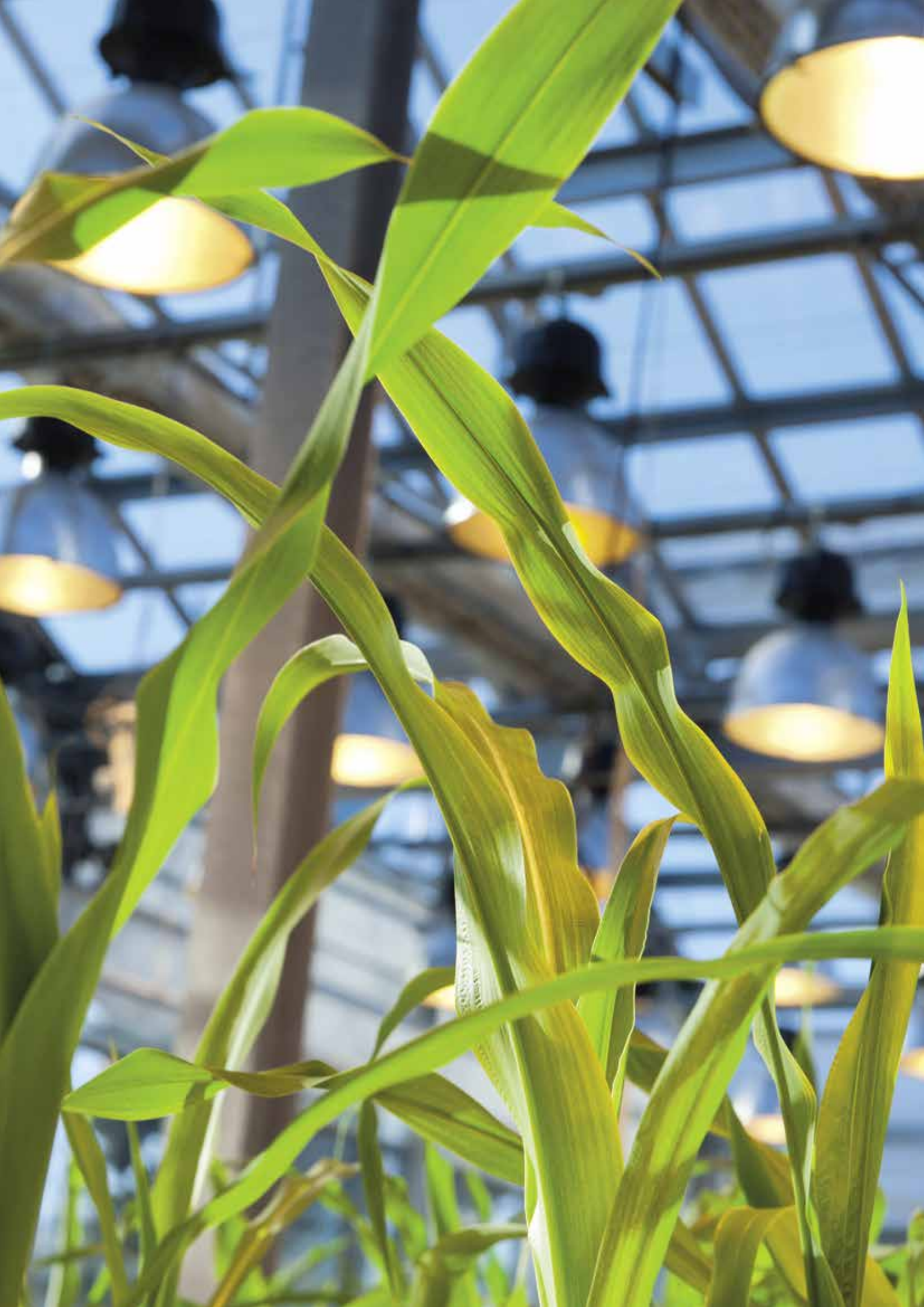
Or, la biodiversité cultivée peut se révéler une arme efficace contre cette capacité d'adaptation des pathogènes. En effet, en semant un ensemble de variétés et non pas une seule en monoculture, on peut ralentir l'évolution des pathogènes tout en freinant l'expansion des maladies. Pour mieux utiliser ce levier, les chercheurs d'INRAE réalisent un effort de modélisation afin de définir la meilleure distribution des variétés au sein d'un paysage pour freiner l'adaptation des pathogènes tout en gardant un rendement acceptable.

La diversité des rizières du Yuanyang

Certes, les célèbres rizières en terrasse du Yuanyang en Chine forment un paysage spectaculaire. Mais pour les chercheurs INRAE impliqués dans le projet Riz Éternel, c'est la diversité des riz qui y sont cultivés qui est à couper le souffle. Elle est en effet équivalente au reste de la diversité mondiale de riz. Outre cette diversité, ces rizières sont remarquables pour leur étonnante résistance aux maladies comme la pyriculariose. Les agriculteurs chinois ont bien compris que la diversité des semences était leur meilleure arme contre les parasites. Par exemple, ils ont coutume de semer, dans leurs champs de riz *Indica*, des îlots de riz *Japonica*, le fameux riz gluant. Cette dilution protège cette variété des champignons parasites. Devant tant de variétés mélangées à un seul endroit, les parasites n'arrivent pas à trouver un angle d'attaque commun. Pour les chercheurs d'INRAE, cette diversité est un trésor à conserver précieusement, et leurs travaux ont conduit les autorités locales à créer une AOC spéciale pour protéger le Yuanyang.

Une partie de l'équipe du projet « Riz éternel » sur le terrain (terrasses de Yuanyang, Yunnan, Chine). Le développement dans le paysage de la maladie causée par le champignon pathogène *Magnaporthe oryzae* est empêché par le déploiement de systèmes immunitaires variés. © Cirad, H. Adreit





INRAE, membre fondateur de la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité

La **Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité (FRB)** est une fondation de coopération scientifique créée en 2008, à la suite du Grenelle de l'environnement, avec le soutien des ministères de la Recherche et de l'écologie et de huit établissements publics de recherche dont INRAE, rejoints depuis par LVMH, l'Ineris et l'Université de Montpellier.
La FRB a pour mission de favoriser au niveau national, communautaire et international le développement, le soutien et l'animation des activités de recherche sur la biodiversité et leur valorisation, dans les domaines biologique, socio-économique et juridique, et des activités associées de formation, de sensibilisation et de diffusion des résultats. Elle diffuse des connaissances permettant de mieux connaître les aspects scientifiques de la biodiversité, des gènes aux écosystèmes, ainsi que le paysage des acteurs de la recherche autour des grands enjeux.
La FRB est aussi une plateforme entre les acteurs de la recherche et les acteurs de la société qui a pour ambition de susciter l'innovation, de promouvoir des projets scientifiques en lien avec la société et de développer des études, synthèses et expertises. Ceci est permis par l'existence d'un Conseil d'orientation stratégique qui rassemble près de 240 acteurs (entreprises, syndicats, ONG, collectivités territoriales, etc.) porteurs d'enjeux de la biodiversité. Ceux-ci apportent leur expertise de terrain et participent aux activités en co-construisant des questions de recherche et en encourageant les transferts de connaissances.
La FRB ne conduit pas de recherche en propre mais mobilise et appuie les équipes de recherche, notamment pour répondre aux grands questionnement scientifiques identifiés dans les prospectives qu'elle conduit en mobilisant à la fois son Conseil scientifique et son Conseil d'orientation stratégique.

Quelques exemples d'actions menées par la FRB :

- L'existence depuis 2010 du **« CEntre de synthèse et d'analyse sur la biodiversité » (CESAB)**, qui a pour mission le développement, le soutien et la valorisation des activités de synthèse scientifique sur la biodiversité. L'assemblage et la combinaison de données existantes ainsi que la réflexion poussée autour de nouveaux concepts et idées, génèrent de nouvelles avancées, tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée. Le CESAB fonctionne par appels à projets ouverts à des consortiums de chercheurs français et internationaux. Il accueille dans ses locaux des groupes de chercheurs pour des sessions de travail qui s'inscrivent dans la durée.

- **La coordination de BiodivERsA**, le réseau européen créé en 2005 d'agences et ministères qui programment et financent la recherche sur la biodiversité et les services écosystémiques en Europe. Le réseau regroupe 36 partenaires de 23 pays européens. Les partenaires de BiodivERsA ont uni leurs efforts afin de développer une diversité d'activités, allant de la cartographie du paysage de la recherche à la programmation et au financement conjoint de recherches sur la biodiversité et les services écosystémiques. De plus, le réseau s'investit en faveur de l'implication des parties prenantes tout au long du processus de la recherche et œuvre à la dissémination des résultats des projets de recherche financés et à la transmission des connaissances.

- **L'hébergement du secrétariat scientifique du Comité français pour l'IPBES** (Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques), qui a pour missions de promouvoir la mobilisation des experts français pour les travaux de l'IPBES, d'appuyer les représentants français à l'IPBES lors des plénières, et de relayer les travaux de l'IPBES dans un format approprié en fonction des acteurs.

Les chercheurs INRAE sont impliqués dans les instances de la FRB (Conseil scientifique de la FRB, Conseil scientifique du CESAB, ...) ainsi que dans la coordination de BiodivERsA. Ils participent aussi aux diverses actions de la Fondation.

Contacts scientifiques

Coordinateur scientifique :

Thierry Caquet
Directeur scientifique environnement INRAE :
thierry.caquet@inrae.fr

Concevoir des paysages agro-écologiques

Le réseau SEBIOPAG

Sandrine Petit
sandrine.petit-michaut@inrae.fr - 03 80 69 30 32
Unité Agroécologie (AgroSup Dijon. Université de Bourgogne. CNRS), INRAE Bourgogne-Franche-Comté

Le verger rond de Gotheron

Sylvaine Simon
sylvaine.simon@inrae.fr - 04 75 59 92 21
Unité Expérimentale Recherches Intégrées - Gotheron, INRAE Provence Alpes Côte d'Azur (PACA)

De l'importance des habitats semi-naturels

Adrien Rusch
adrien.rusch@inrae.fr - 05 57 12 26 43
Unité Santé et agroécologie du vignoble (INRAE, Bordeaux Sciences Agro), INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Un domaine expérimental tout entier dédié à l'agro-écologie

Stéphane Cordeau
stephane.cordeau@inrae.fr - 03 80 69 32 67
Unité Agroécologie (AgroSup Dijon. Université de Bourgogne. CNRS), INRAE Bourgogne-Franche-Comté

La diversité cachée, à étudier sans délai

Julien Pottier
julien.pottier@inrae.fr - 04 43 76 16 18
Unité mixte de recherche sur l'Écosystème Prairial, INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

BIOFOR, un brainstorming autour de la forêt

Antoine Brin
antoine.brin@purpan.fr - 05 61 15 29 85
Luc Barbaro
luc.barbaro@inrae.fr - 05 61 28 52 58
Unité Dynamiques et écologie des paysages agriforestiers (INRAE, INP Toulouse), INRAE Occitanie-Toulouse

Les oiseaux prairiaux, objets de toutes les attentions

Rodolphe Sabatier
rodolphe.sabatier@inrae.fr - 04 32 72 25 77
Unité de recherche Écodéveloppement, INRAE PACA

La tique, voyageuse immobile

Olivier Plantard
olivier.plantard@inrae.fr - 02 40 68 77 71
Unité Biologie, épidémiologie et analyse de risque en santé animale (INRAE, Oniris), INRAE Pays de la Loire

Diversifood : en route vers l'agriculture de demain

Véronique Chable
veronique.chable@inrae.fr - 02 23 48 70 49
Unité Biodiversité agroécologie et aménagement du paysage (INRAE, Agrocampus ouest, ESA d'Angers), INRAE Bretagne-Normandie

Le projet API-SMAL

Vincent Martinet
vincent.martinet@inrae.fr - 01 30 81 53 57
Unité Économie Publique (INRAE, AgroParisTech), INRAE Ile-de-France-Versailles-Grignon

Prédire les effets des changements de pratiques agricoles

Raja Chakir
raja.chakir@inrae.fr - 01 30 81 53 39
Unité Économie Publique (INRAE, AgroParisTech), INRAE Ile-de-France-Versailles-Grignon

Mesurer la capacité productive de la biodiversité

Pierre Dupraz
pierre.dupraz@inrae.fr - 02 23 48 56 06
SMART-LERECO - Laboratoire d'Études et de Recherches en Économie sur les Structures et Marchés Agricoles, Ressources et Territoires (INRAE, Agrocampus ouest), INRAE Bretagne-Normandie

Compenser la perte de biodiversité

Michel Trommetter
michel.trommetter@inrae.fr - 04 76 82 78 03
Unité Économie Appliquée de Grenoble, INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Scruter l'écologie des communautés

Dis-moi ce que tu fais, je te dirai qui tu es

Benoît Jaillard
benoit.jaillard@inrae.fr - 04 99 61 23 82
Unité Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et agrosystèmes, INRAE Occitanie-Montpellier

Les richesses insoupçonnées du sol

Lionel Ranjard
lionel.ranjard@inrae.fr - 03 80 69 30 88
Unité Agroécologie (AgroSup Dijon. Université de Bourgogne. CNRS), INRAE Bourgogne-Franche-Comté

Des systèmes de culture économes en intrants

Jean-Noël Aubertot
jean-noel.aubertot@inrae.fr - 05 61 28 50 21
Unité AGroécologie, Innovations, teRritoires (INRAE, INP Toulouse), INRAE Occitanie-Toulouse

Les bandes fleuries, de superbes refuges pour les auxiliaires des cultures

Antoine Gardarin
antoine.gardarin@inrae.fr - 01 30 81 54 40
Unité Agronomie (INRAE, AgroParisTech), INRAE Ile-de-France-Versailles-Grignon

Écobordure : savoir lire la biodiversité des bordures de champs

Audrey Alignier
audrey.alignier@inrae.fr - 02 23 48 57 70
Unité Biodiversité agroécologie et aménagement du paysage (INRAE, Agrocampus ouest, ESA d'Angers), INRAE Bretagne-Normandie

Un outil simple pour évaluer la biodiversité des forêts

Laurent Larrieu
CRPF Occitanie Toulouse
laurent.larrieu@inrae.fr - 05 61 28 50 85
Unité Dynamiques et écologie des paysages agriforestiers (INRAE, INP Toulouse), INRAE Occitanie-Toulouse

Choisir les bons assemblages d'espèces forestières

Bastien Castagneyrol
bastien.castagneyrol@inrae.fr - 05 35 38 53 02
Unité Biodiversité, Gènes et Communautés (INRAE, Université de Bordeaux), INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Des lignes d'arbres dans les parcelles, des espaces semi-naturels d'une grande richesse

Delphine Mézière
delphine.meziere@inrae.fr - 04 99 61 29 17
Unité Fonctionnement et conduite des Systèmes de culture Tropicaux et Méditerranéens (INRAE, Cirad, Montpellier Supagro), INRAE Occitanie-Montpellier

Les vertus des systèmes d'agriculture mixtes

Audrey Fanchone
audrey.fanchone@inrae.fr - 05 90 25 54 30
Unité de Recherches Zootechniques, INRAE Antilles-Guyane

À INRAE, on expérimente la prairie verticale !

Sandra Novak
sandra.novak@inrae.fr - 05 49 55 60 67
Unité expérimentale Fourrages environnement ruminants Lusignan, INRAE Nouvelle-Aquitaine-Poitiers

la diversité animale pour des sytèmes d'élevage allaitant plus agro-écologiques

Sophie Prache
sophie.prache@inrae.fr - 04 73 62 40 63
Unité mixte de recherche sur les herbivores (INRAE, VetAgro Sup), INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

La résistance est dans la différence

Nathalie Mandonnet
nathalie.mandonnet@inrae.fr - 05 90 25 54 08
Unité de Recherches Zootechniques, INRAE Antilles-Guyane

Réduire l'infestation parasitaire des lapins qui pâturent

Laurence Lamothe
laurence.lamothe@inrae.fr - 05 61 28 53 18
Unité Génétique physiologie et systèmes d'élevage (INRAE, INP Toulouse), INRAE Occitanie-Toulouse

Les microalgues, incontournables indicateurs de l'état des milieux aquatiques
Frédéric Rimet
frederic.rimet@inrae.fr - 04 50 26 78 74
Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Écosystèmes Limniques (INRAE, Université de Savoir Mont blanc),
INRAE Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes

Entre les abeilles, la concurrence est rude
Mickaël Henry
mickael.henry@inrae.fr - 04 32 72 26 01
Unité Abeilles et Environnement, INRAE PACA

La biodiversité gage de stabilité
Nicolas Gross
nicolas.gross@inrae.fr - 04 43 76 16 09
Unité mixte de recherche sur l'écosystème prairial, INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Les plantes interagissent... et c'est formidable
Fabrice Roux
fabrice.roux@inrae.fr - 05 61 28 54 59
Laboratoire des Interactions Plantes Micro organismes (INRAE, CNRS), INRAE Occitanie-Toulouse

Tous différents, tous holobiontes
Jean-Christophe Simon
jean-christophe.simon@inrae.fr - 02 23 48 51 54
Institut de génétique environnement et protection des plantes (INRAE, Agrocampus ouest, université de Rennes 1), INRAE Bretagne-Normandie

Les champignons forestiers, un monde d'interactions
Francis Martin
francis.martin@inrae.fr - 03 83 39 40 80
Unité Interactions arbres/micro-organismes (INRAE, Université de Lorraine), INRAE Grand Est-Nancy

Un modèle statistique pour soutenir la protection des espèces
Régis Sabbadin
regis.sabbadin@inrae.fr - 05 61 28 54 76
Unité Mathématiques et informatique appliquées Toulouse, INRAE Occitanie-Toulouse

Comprendre la dynamique des populations

Un lézard dans la théorie
Vincent Calcagno
vincent.calcagno@inrae.fr - 04 92 38 64 31
Institut Sophia Agrobiotech (INRAE, CNRS), INRAE PACA

Les arbres partent ils aussi à la retraite ?
Denis Loustau
denis.loustau@inrae.fr - 05 57 12 28 51
Unité Interactions sol plante atmosphère (INRAE, Bordeaux Sciences Agro),
INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Comment les herbivores changent la forêt
Jean-Luc Dupouey
jean-luc.dupouey@inrae.fr - 03 83 39 40 49
Unité SILVA (INRAE, AgroParisTech, Université de Lorraine), INRAE Grand Est-Nancy

Pas de Brexit pour les truites de mer
Marie Nevoux
marie.nevoux@inrae.fr - 02 23 48 52 35
Unité Écologie et santé des écosystèmes (INRAE, Agrocampus ouest),
INRAE Bretagne-Normandie

Pl@ntnet : l'appli qui fait de vous un botaniste
Christophe Botella
christophe.botella@cirad.fr
Unité Botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations, INRAE Occitanie-Montpellier

L'économie se penche sur les espèces invasives
Jean-Michel Salles
jean-michel.salles@supagro.inra.fr
Pierre Courtois
pierre.courtois@inrae.fr
Centre d'Économie de l'environnement Montpellier, INRAE Occitanie-Montpellier

Cultiver la diversité génétique

La grande épopée des animaux
Bertrand Servin
bertrand.servin@inrae.fr - 05 61 28 51 17
Unité Génétique physiologie et systèmes d'élevage (INRAE, INP Toulouse), INRAE Occitanie-Toulouse

Quand la diversité génétique participe à l'évolution de l'aquaculture
Mathilde Dupont-Nivet
mathilde.dupont-nivet@inrae.fr - 01 34 65 23 49
Unité Génétique animale et biologie Intégrative (INRAE, AgrParisTech), INRAE Ile-de-France - Jouy-en-Josas

Réduire la quantité de méthane émise par les vaches Des gènes pour une viande tendre et juteuse
Gilles Renand
gilles.renand@inrae.fr - 01 34 65 22 12
Unité Génétique animale et biologie Intégrative (INRAE, AgrParisTech), INRAE Ile-de-France - Jouy-en-Josas

la diversité animale pour des sytèmes d'élevage allaitant plus agro-écologiques
Sophie Prache
sophie.prache@inrae.fr - 04 73 62 40 63
Unité mixte de recherche sur les herbivores (INRAE, VetAgro Sup),
INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Diversifier le régime des poulets
Sandrine Grasteau
sandrine.grasteau@inrae.fr - 02 47 42 76 91
Unité Biologie des oiseaux et aviculture (INRAE, Université de Tours), INRAE Val de Loire

Génomique : sélection 3.0
Vincent Segura
vincent.segura@inrae.fr - 02 38 41 78 11
Unité Biologie intégrée pour la valorisation de la diversité des Arbres et de la Forêt, INRAE Val de Loire
Renaud Rincent
renaud.rincent@inrae.fr - 04 43 76 75 71
Unité Génétique diversité des écophysiologie des céréales (INRAE, université Clermont-Auvergne),
INRAE Clermont-Auvergne - Rhône-Alpes

Qui a peur du changement climatique ?
François Tardieu
francois.tardieu@inrae.fr - 04 99 61 26 32
Laboratoire d'écophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux (INRAE, Montpellier Supagro),
INRAE Occitanie-Montpellier

Comment rendre l'agriculture plus raisonnable agroécologique ?
Philippe Hinsinger
philippe.hinsinger@inrae.fr - 04 99 61 22 49
Unité Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et agrosystèmes (INRAE, IRD, Montpellier SupAgro, Cirad), INRAE Occitanie-Montpellier

Des idées fraîches pour l'élevage des porcs
Jean-Luc Gourdine
jean-luc.gourdine@inrae.fr - 05 90 25 59 42
Unité de Recherches Zootechniques,
INRAE Antilles-Guyane

GenTree ou la mise à profit des différences
Bruno Fady
bruno.fady@inrae.fr - 04 32 72 29 08
Unité Écologie des Forêts Méditerranéennes,
INRAE PACA

Des prairies plus riches, plus grasses et plus constantes
Isabelle Litrico
isabelle.litrico-chiarelli@inrae.fr - 05 49 55 61 48
Unité de Recherche pluridisciplinaire prairies et plantes fourragères, INRAE Nouvelle-Aquitaine-Poitiers

Blinder le blé contre la septoriose
Cyrille Saintenac
cyrille.saintenac@inrae.fr - 04 43 76 15 26
Unité Génétique diversité et écophysiologie des céréales (INRAE, Université Clermont Auvergne),
INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes

Un perfide parasite des volailles
Fanny Calenge
fanny.calenge@inrae.fr - 01 34 65 29 14
Unité Génétique animale et biologie Intégrative (INRAE, AgrParisTech), INRAE Ile-de-France - Jouy-en-Josas

Les arbres font de la résistance
Christophe Plomion
christophe.plomion@inrae.fr - 05 35 38 53 26
Unité Biodiversité, Gènes et Communautés (INRAE, Université de Bordeaux), INRAE Nouvelle-Aquitaine-Bordeaux

Le paysage : allié contre les maladies
Julien Papaix
julien.papaix@inrae.fr - 04 32 72 21 45
Unité Biostatistique et Processus Spatiaux, INRAE PACA

La diversité des rizières du Yuanyang
Jean-Benoit Morel
jbmorel@cirad.fr - 04 99 62 48 37
Unité Biologie et génétique des interactions plante-parasite (INRAE, Cirad, Montepllier Supagro),
INRAE Occitanie-Montpellier

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

Rejoignez-nous sur :

inrae.fr/presse

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

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

Conception et réalisation : Studio graphique - INRAE-Direction de la communication / Photos : © Inrae/Fotolia/Shutterstock