

FOCUS

LA BIODIVERSITÉ

FOCUS

LA BIODIVERSITÉ



page 04
ÉDITO



page 06
DÉBAT



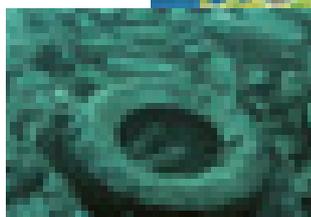
page 12
COMPRENDRE
LA BIODIVERSITÉ



page 18
LA DYNAMIQUE
DES ÉCOSYSTÈMES



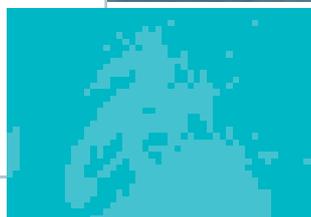
page 24
IMPACT SUR LA SANTÉ



page 30
LA BIODIVERSITÉ
EN DANGER



page 36
GESTION DURABLE



page 43
LA BIODIVERSITÉ
EN QUELQUES CHIFFRES

LA RECHERCHE SUR LA BIODIVERSITÉ

L'immense variabilité du vivant sur la Terre est l'une des grandes énigmes de la science moderne. Pourquoi tant d'espèces coexistent-elles ? Était-ce inévitable au regard des lois de l'évolution ? Quelle est l'histoire du vivant ? Comment les espèces se sont-elles différenciées ? Comment se sont-elles succédé dans le temps ? Quel a été leur impact dans la mise en place de l'environnement planétaire que nous connaissons ? Quel rôle jouent-elles actuellement dans la dynamique de cet environnement ? Toutes ces questions occupent les biologistes depuis des décennies et sont à l'origine d'une passionnante aventure intellectuelle. Mais depuis la conférence de Rio de Janeiro en 1992, la biodiversité est aussi devenue une question de société et l'un des enjeux majeurs du développement durable. Protéger, gérer la biodiversité. Oui, mais pourquoi ? S'il est besoin de trouver une raison à cette nécessaire protection, à cette gestion, alors il suffit de mentionner que la biodiversité, c'est la vie de la planète. Les humains y puisent leurs ressources alimentaires et les matières premières nécessaires à leur survie.

La biodiversité suscite à la fois des inquiétudes et des espoirs – des inquiétudes dues au rythme extraordinairement élevé de disparition d'espèces que nous connaissons aujourd'hui. Dès lors, le citoyen s'interroge légitimement sur la gravité de la situation. Traduite en termes scientifiques, cette question alimente une vaste problématique autour de la valeur fonctionnelle de la biodiversité. Il s'agit, par exemple, de définir la place qu'occupent les espèces dans les ensembles biophysicochimiques dans lesquels elles sont insérées, autrement dit, leur position dans l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes. Ou de déterminer s'il existe un nombre minimal d'espèces nécessaires à la persistance de l'écosystème et si la diversité génétique joue le même rôle que la diversité d'espèces vis-à-vis des performances de l'écosystème.

Ces problèmes ne présentent pas qu'un intérêt théorique pour l'écologiste. Ils renvoient aussi directement à ce qui fait la qualité de notre environnement. Il suffit pour s'en convaincre de rappeler la place centrale occupée par la biodiversité dans ce qu'on appelle les services écosystémiques, ces fonctions répertoriées dans le *Millenium Ecosystem Assessment* et qui jouent sur la composition chimique de l'eau, celle de l'atmosphère, sur la propagation des maladies... Ou de rappeler que la réponse des écosystèmes aux changements de climat dépendra avant tout du nombre d'espèces présentes dans les écosystèmes, de la nature de leurs relations, de leur capacité à se disperser dans l'environnement et de leur influence sur la variabilité génétique. Ainsi l'extraordinaire plasticité de certains génomes, comme celle des génomes microbiens, est une réponse des organismes vivants aux modifications dans le temps et l'espace de l'environnement dans lequel les humains vivent. L'avenir de notre planète est lié à la maîtrise de cette biodiversité.

La biodiversité suscite aussi l'espoir. Tout d'abord, la disparition des espèces n'est pas une fatalité, elle peut être freinée ou annulée par des méthodes innovantes de gestion de l'espace et de réintroduction d'espèces, basées sur les résultats les plus récents de la recherche. Ensuite, les organismes représentent une source quasi inépuisable de molécules d'intérêt pour la pharmacie et l'industrie chimique, qui aident quotidiennement à lutter contre les maladies ou à produire certaines substances indispensables à l'industrie. La connaissance des substances naturelles, de leur variabilité, de leur modification spatio-temporelle est aussi une chance pour notre avenir. Enfin, la manipulation de populations de plantes, d'animaux ou de micro-organismes *in situ* permet de réhabiliter des milieux dégradés ou de maximiser certaines de leurs caractéristiques ou fonctions selon les problèmes d'environnement ou d'exploitation des ressources naturelles qui se posent.

L'ACTION DU CNRS

Le CNRS, en partenariat avec les universités, le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), l'Inra, l'IRD, le Cirad, l'Ifremer... est totalement engagé dans la recherche sur la biodiversité et, conscient de ses responsabilités en matière d'élaboration des bases scientifiques du développement durable, il en a fait une de ses grandes priorités. Concrètement, le CNRS s'efforce de stimuler l'innovation théorique et empirique dans quatre grands domaines : l'analyse et la gestion de la biodiversité, les mécanismes d'émergence et de maintien de la biodiversité, les interactions entre biodiversité et environnement ainsi que les dimensions culturelles, sociales et économiques de la biodiversité. Le CNRS développe cette action à partir d'études réalisées en collaboration avec des chercheurs de différentes régions du monde en particulier la Guyane et les DOM-TOM, l'Afrique australe (Afrique du Sud et Madagascar), l'Asie... Il mobilise pour cela dans ses laboratoires propres ou associés aux universités et aux organismes partenaires (MNHN, Inra, IRD, Cirad, Ifremer) environ 2300 personnes, dont un millier d'agents CNRS. Tous les départements scientifiques du CNRS sont concernés par la problématique de la biodiversité en raison de son caractère fondamentalement pluridisciplinaire. Le département Environnement et développement durable gère directement les unités les plus fortement impliquées, assure la formation et l'animation scientifique en biodiversité, organise des programmes de recherche et des programmes d'équipement.

Le CNRS définit sa politique en partenariat avec les autres organismes et institutions nationales. Un des acteurs historiques de la concertation est l'Institut national des sciences de l'Univers, très impliqué dans le financement de la recherche sur la diversité des organismes marins, sur les interactions entre la biosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère, sur la paléo-biodiversité. Le CNRS est également membre de deux groupements scientifiques, l'Institut français de la biodiversité et le Bureau des ressources génétiques, qui ouvrent régulièrement des appels d'offres de recherche, qui représentent la France dans de nombreuses instances européennes et internationales et qui proposent des politiques nationales dans les domaines concernés. Le CNRS participe à diverses instances de l'Agence nationale de la recherche, bailleur de fonds essentiel dans le paysage national. Il soutient aussi des organisations européennes comme l'*European Science Foundation* à travers l'*Eurocore Eurodiversity* ou des réseaux d'excellence comme *Marine Genomics*.

L'un des grands obstacles actuels rencontrés par les chercheurs est l'étude à long terme de populations, de communautés ou d'écosystèmes modèles, le suivi en continu des variations de l'environnement – y compris dans sa dimension biologique –, la modélisation de l'évolution ou du fonctionnement des écosystèmes ainsi que l'expérimentation sur des assemblages biologiques de complexité variée. Une proportion toujours croissante des résultats publiés dans le monde sur la dynamique de la biodiversité repose pourtant sur des infrastructures techniques dédiées à ces approches. Il y a donc une dimension stratégique dans le développement de tels outils dans notre pays. Le CNRS soutient financièrement, ou à travers la mise à disposition de personnel, les zones ateliers de recherche sur l'environnement et les observatoires de recherche en environnement comme la station des Nouragues en Guyane. Il a initié également un programme ambitieux d'Ecotron (un à Montpellier et un près de Fontainebleau), des dispositifs permettant d'expérimenter en milieu confiné sur des écosystèmes naturels ou artificiels.

René Bally et Luc Abbadie, directeurs scientifiques adjoints
au département Environnement et développement durable

Bernard Delay, directeur scientifique du département
Environnement et développement durable

06

DÉBAT

BIEN QU'IL SOIT POPULAIRE, LE CONCEPT DE BIODIVERSITÉ N'EN EST PAS MOINS COMPLEXE. POUR VOUS MONTRER L'ÉTENDUE DES QUESTIONS QU'IL SOULÈVE, CINQ CHERCHEURS : ÉCOLOGISTES, SYSTÉMATIENS, GÉNÉTICIENS... SE SONT RÉUNIS AUTOUR DE RENÉ BALLY, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE ADJOINT DU DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DU CNRS ET C'EST LEUR DISCUSSION, QUELQUEFOIS PÉDAGOGIQUE, D'AUTRES FOIS POLÉMIQUE QUI VOUS EST RAPPORTÉE ICI. TOUR DE TABLE AVEC LUC ABBADIE, ROBERT BARBAULT, PIERRE-HENRI GOUYON, HERVÉ LE GUYADER ET MICHEL VEUILLE.

QU'EST-CE QUE LA BIODIVERSITÉ ?

PIERRE-HENRI GOUYON : Les humains ont pris très tôt conscience de la biodiversité. Nécessairement s'est imposée l'idée d'une classification de ce fouillis qu'est la nature. Les objets vivants sont classés dans toutes les cultures connues. La méthode de classement, en revanche, est assez variable d'une culture à l'autre.



Notre première vision de la biodiversité est exclusivement centrée sur une classification par espèces. Linné affirme que toutes les espèces proviennent de la main même du Créateur tout puissant et que ces espèces se reproduisent dans les limites de leur propre type. Il disqualifie totalement toute importance de la diversité dans les espèces. C'est la vision

occidentale du XVIII^e siècle. On la retrouve déjà dans la Genèse quand Noé conserve chaque espèce en ne gardant qu'un unique couple d'individus. Darwin va révolutionner cette classification. Il amène l'idée que la diversité dans l'espèce et la diversité entre espèces sont de même nature. C'est-à-dire que la diversité entre les espèces n'est que l'amplification de la diversité au sein des espèces.



HERVÉ LE GUYADER : Il y a trois niveaux de définition de la biodiversité : biodiversité des gènes, biodiversité des organismes et biodiversité des écosystèmes. Ce que vient de dire Pierre-Henri Gouyon montre que les biodiversités entre espèces et entre gènes sont totalement liées. Il faut rajouter que tout ceci prend place dans un espace-temps. On ne connaît pas la biodiversité des espèces,

on n'a pas tout décrit, la biodiversité des gènes encore moins et la biodiversité des écosystèmes, je ne crois pas non plus. Il va falloir protéger quelque chose que l'on ne connaît pas au sens absolu du terme.



MICHEL VEUILLE : Le mot de « biodiversité » est récent. En tant que systématiens, généticiens, écologistes, nous avons perçu, au cours de notre génération – accompagnant la mise en place de la transversalité des études de la biodiversité – tant au niveau de la visibilité culturelle et sociale de la biodiversité qu'au niveau de la synergie des actions de recherche, comme le montre la création, au CNRS, d'un département transversal consacré à l'environnement et au développement durable.

Pierre-Henri Gouyon est professeur au Muséum national d'histoire naturelle de Paris, à l'INA-PG et à l'École polytechnique de Paris. Il est chercheur au laboratoire « Fonctionnement et évolution des systèmes écologiques ».

Hervé Le Guyader est professeur à l'université Paris 6 et directeur de l'unité de recherche « Systématique, adaptation, évolution ».

Michel Veuille est directeur d'études à l'École pratique des hautes études, directeur du département Systématique et évolution du Muséum national d'histoire naturelle et directeur du groupement de recherche « Génomique des populations ».

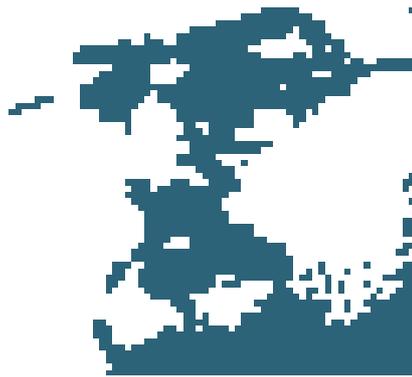


ROBERT BARBAULT : Je situe la création du mot « biodiversité » dans le contexte de la Conférence de Rio, même si c'était quelques années avant, dans des séminaires scientifiques où l'on préparait les discussions. Toute la communauté scientifique s'est alors approprié le mot « biodiversité ».

MICHEL VEUILLE : Le mot biodiversité est un mot-valise extrêmement riche. C'est une prise en compte de notre ignorance. Linné connaissait quarante mille espèces. Aujourd'hui, longtemps après Darwin, on en connaît 1,8 million. Nous savons qu'il existe, pour des organismes qui se décrivent classiquement comme les animaux et les plantes, cinq à dix fois plus d'espèces c'est-à-dire de 10 à 15 millions. Pour les bactéries et les champignons, nous ne connaissons qu'une infime partie de la biodiversité. On considère actuellement que l'on ne connaît que 5 à 10 % des champignons. Nous n'avons guère de moyens d'investigation pour découvrir toutes ces espèces. Les chercheurs du Muséum national d'histoire naturelle, lorsqu'ils vont fouiller une zone du Pacifique, découvrent 20 % d'espèces nouvelles parmi les mollusques qu'ils remontent des fonds marins.

PIERRE-HENRI GOUYON : Peut-on fabriquer un concept de biodiversité dans lequel on intègre aussi bien la diversité dans l'espèce et la diversité entre espèces? Nous ne savons pas le faire aujourd'hui. Mais nous sommes dans une période propice pour commencer à y travailler. Pour construire des phylogénies – pour classer les espèces –, on utilise déjà des coalescences de gènes. On tient alors compte de la diversité génétique pour étudier la diversité entre espèces. 150 ans après Darwin, ne pourrait-on pas fabriquer un vrai concept de biodiversité qui allie la génétique et la systématique?

LUC ABBADIE : Il pourrait même allier les aspects fonctionnels, c'est-à-dire les interactions entre l'organisation du vivant et les flux de matière et d'énergie et, plus généralement, l'environnement. Il y a eu beaucoup de travaux sur la valeur fonctionnelle de la biodiversité, presque tous situés au niveau de l'espèce. Les conséquences fonctionnelles de la diversité génétique ont été très peu prises en compte. Or, le vivant varie de façon continue du gène à la communauté d'organismes en passant par l'espèce.



Il existe un lien positif entre la biodiversité et la productivité ou la stabilité d'un écosystème. Pourtant, certains écosystèmes très anciens et très productifs sont pauvres en espèces; dans ce cas, il y a probablement une diversité génétique élevée qui « compense » la faible diversité en espèces. L'équivalence fonctionnelle entre la diversité intraespèce (génétique) et interespèces reste à explorer.

PIERRE-HENRI GOUYON : Les théories conditionnent nos descriptions. Si Linné et Darwin avaient des visions différentes de la biodiversité, c'est parce qu'ils avaient des mécanismes différents en tête. Il faut abandonner l'idée de décrire la nature sans avoir d'hypothèses sur la façon dont la biodiversité s'est construite.

MICHEL VEUILLE : Il est évident que si nous avons une théorie qui expliquait pourquoi il y a tant d'espèces, ce serait aussi une théorie qui expliquerait encore mieux le fonctionnement des écosystèmes et comment nous pouvons préserver la biodiversité de troisième ordre – celle des peuplements et des écosystèmes. Elle conditionne beaucoup de choses.

HERVÉ LE GUYADER : Il faut être clair. Nous n'avons pas de théorie mais il y a

quand même un cadre conceptuel: la théorie de l'évolution. Darwin a montré que s'il y a sélection, la diversité augmente.

PIERRE-HENRI GOUYON : Bien que nous ayons un cadre conceptuel, nous ne maîtriserions le problème que si nous étions capables de dire quels sont les processus qui déterminent le nombre de génotypes et d'espèces. Nous connaissons les processus mais nous ne savons pas les organiser pour expliquer ce qui se passe à l'échelle de la Terre.

ROBERT BARBAULT : La branche écologique de la diversité du vivant s'attache à répondre à ces questions. Au-delà des relations de parenté et de la variabilité génétique, il y a des pressions de sélection. C'est le contexte écologique qui fabrique et qui permet de comprendre pourquoi il y a une accumulation de diversités, pourquoi, après chaque crise d'extinction, la biodiversité se reconstitue. Nous sommes dans un monde changeant à toutes les échelles. Il n'y a donc aucune espèce adaptée à l'ensemble des conditions de la planète. Sur cette base-là, comme pour les approches génétiques, on peut approfondir progressivement l'analyse.

C'est pour cela que, pour parler de la diversité du vivant, je commence plutôt par le global. Qu'est ce que la diversité du vivant? C'est le tissu vivant de la planète, dont on fait partie, qui est constitué par des espèces porteuses d'une grande variabilité génétique. C'est un tissu d'interactions innombrables qui évoluent dans un monde changeant. La raison d'être de la diversité, c'est l'adaptation aux changements constants dans l'espace et dans le temps.

HERVÉ LE GUYADER : Cette biodiversité, on la regarde à trois niveaux. Pierre-Henri Gouyon, quand il a commencé, a parlé des espèces. Robert Barbault y voit, au niveau planétaire, un tissu en interactions. S'il y avait un moléculiste pur et dur, il commencerait par entrer par le génome pour aboutir à la diversité des gènes. Tous les biologistes, quel que soit leur point d'entrée, arrivent, à un moment donné, dans ce concept de biodiversité.

FAUT-IL PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ ?

MICHEL VEUILLE : Au cours de notre génération, nous avons pris conscience de la fragilité de la nature. Jusqu'ici, beaucoup de biologistes pensaient en termes d'équilibre quand ils construisaient un modèle de génétique des populations.



© Pierre Lozouet, Marine Biodiversity Project et Stefano Schiparelli - Panglao Marine Biodiversity Project

▲ Seule une infime partie des espèces est connue. On découvre et on décrit 1 600 espèces marines par an. Les régions tropicales, et en particulier les récifs coralliens, sont de phénoménaux réservoirs d'espèces inconnues. En six semaines de recherches intensives sur le terrain, le *Panglao Marine Biodiversity Project* (Muséum national d'histoire naturelle / University of San Carlos / National University of Singapore) a découvert plusieurs centaines d'espèces nouvelles de crustacés et près d'un millier de nouvelles espèces de mollusques.

Pour ces biologistes, avant l'impact considérable des humains, et à quelques fluctuations post-glaciaires près, la nature était en équilibre. Elle était invulnérable. Aujourd'hui, nous savons que tel n'a pas été le cas dans l'histoire récente de la biodiversité. Nous savons qu'avant même l'impact du Néolithique, où les humains ont commencé à avoir une influence prégnante sur la nature, il y a eu des extinctions.

PIERRE-HENRI GOUYON : L'idée que les espèces s'éteignent est nouvelle. Elle est de Cuvier et n'a que 200 ans. On a mis

très longtemps à l'intégrer. Beaucoup de gens disent qu'un élément déterminant a été l'image de la Terre vue depuis la Lune. L'idée de planète bleue parle maintenant à tous.

MICHEL VEUILLE : Au-delà de la question morale posée par la conservation de l'ensemble du monde vivant tel qu'il existe, certains se demandent si autant d'espèces sont nécessaires aux groupes fonctionnels, si les récifs coralliens ont vraiment besoin de tous ces poissons-papillons... Certes il y a 15 millions d'espèces mais nous ne nous sommes jamais rendu compte de leur existence. Faut-il les garder toutes ? Toutes sont-elles utiles au maintien des écosystèmes ?

PIERRE-HENRI GOUYON : Je fais partie de ceux qui pensent qu'effectivement il n'y a pas de nécessité écologique à ce qu'il y ait une immense biodiversité. Je pense qu'il existe un nombre d'espèces et un nombre de génotypes pour les espèces suffisants pour que les choses tournent proprement. Mais c'est une impression personnelle. Je n'ai pas de preuve. Ceux qui disent le contraire non plus.

ROBERT BARBAULT : Il n'y a pas de preuves mais il y a quand même des indications.

PIERRE-HENRI GOUYON : Pour moi, la question est d'abord morale. Je suis pour la conservation de la biodiversité. On inféode un problème moral à un résultat scientifique. C'est la même chose que lorsque l'on dit qu'il ne faut

pas être raciste parce qu'il n'y a pas de différences génétiques entre les races. Si l'on trouvait une différence génétique, pourrait-on être raciste ? Le problème est de savoir comment l'espèce humaine se perçoit en tant que gestionnaire de la Terre. Ce problème doit rester indépendant du fait de savoir si l'on a besoin de beaucoup d'espèces pour telle ou telle raison écologique ou de durabilité. Oui, je suis pour le maintien de la biodiversité, d'abord pour des raisons morales et si, en plus, il existe des raisons pratiques et concrètes, tant mieux.

LUC ABBADIE : Je suis d'accord avec toi, il y a d'abord des raisons morales pour préserver la biodiversité... mais il y a aussi des raisons plus objectives. Au fond, si je reprends ce que nous venons de dire, la biodiversité actuelle est le résultat d'un empilement d'événements passés, d'une série de réactions de chaque espèce à des environnements disparus et à la présence d'autres espèces. Certains organismes étaient nombreux à une époque. Ils le sont moins aujourd'hui, mais ils peuvent revenir en force en fonction des fluctuations de l'environnement.

L'échelle de temps est importante. Certains résultats scientifiques peuvent être, et sont, mal interprétés. On entend des conclusions comme « Il y a beaucoup d'espèces qui ne servent à rien, les écosystèmes pourraient fonctionner avec moins d'espèces ». Sauf que nous ne voyons qu'une image instantanée de la biodiversité. Une espèce qui semble



© NASA / Science Photo Library

▲ Photographie de la Terre depuis l'espace (1968). Pour beaucoup, voir la Terre depuis l'espace a permis de remettre en question la

toute puissance de la nature et d'intégrer les notions de fragilité de la nature et de disparition des espèces.



▲ Fonds marins de la Méditerranée et du Pacifique. Les écosystèmes tropicaux ont subi peu de perturbations, c'est pourquoi la biodiversité y est plus grande qu'en Méditerranée.

redondante aujourd'hui, non indispensable, peut lors de l'épisode suivant devenir « vitale » pour l'écosystème parce que l'environnement aura changé, qu'il aura plu un peu plus ou un peu moins par exemple...

La biodiversité est une réserve de réponses du vivant aux changements de l'environnement, qui ont été testées dans le passé pendant des milliers et des millions d'années. Si nous amenuisons cette réserve, il y aura un décalage entre la variabilité de l'environnement et l'éventail des réponses possibles. Toute espèce a probablement eu, à un moment donné, un impact important sur l'environnement. La notion d'espèce clé est dangereuse car une espèce n'est « clé » qu'à un moment donné.

HERVÉ LE GUYADER : La Terre a une stabilité extraordinaire. À la fin du Permien, 80 % des espèces ont disparu et cette perturbation a été absorbée. On s'est toujours interrogé sur les raisons pour lesquelles la biodiversité, du Pacifique Ouest par exemple, est bien plus grande que celle de la Méditerranée. C'est encore un problème de stabilité. Les écosystèmes tropicaux ont été très stables au point de vue environnement, tandis qu'en Méditerranée, que ce soient les glaciations ou l'évaporation de la mer au Néocène, les fluctuations ont été importantes. La biodiversité a souvent diminué brutalement et n'a jamais retrouvé le niveau des écosystèmes tropicaux. C'est une des interprétations possibles.



PIERRE-HENRI GOUYON : Ce sont des perturbations générales. L'assèchement est généralisé. Si on compare la diversité des plantes d'Afrique et d'Amérique du Sud, on trouve le résultat inverse. Le très haut degré de perturbation en Amérique du Sud a formé des zones refuges... et a certainement été la cause de l'augmentation de la biodiversité. Les perturbations ont des effets complètement opposés selon leur type.

COMMENT GÉRER LA BIODIVERSITÉ ?

MICHEL VEUILLE : Je voudrais revenir à la petite boule bleue sur laquelle les humains voyagent dans le ciel avec la biodiversité. Comme les humains prennent beaucoup de place, il y en a moins pour la biodiversité. La circulation des espèces envahissantes est un autre facteur d'érosion de la biodiversité. Celles qui font partie du cortège commensal des humains déplacent les écosystèmes natifs ou endémiques, en installant une sorte d'écosystème McDonald's, qu'on rencontrera bientôt à tous les coins de rues de la planète.

D'une certaine manière, les humains gèrent maintenant la biodiversité comme un jardin. Jusqu'ici, la biodiversité se suffisait à elle-même. Dorénavant, elle n'existera que par la place que nous lui

laisserons. L'homme est un peu, vis-à-vis de la biodiversité, dans la situation de quelqu'un qui fait sa valise et qui doit choisir ce qu'il emporte. Faut-il prendre une grande diversité de types de vêtements, ou un grand nombre de vêtements du même type? Faut-il garder beaucoup d'espèces avec peu de variabilité génétique chacune, ou faut-il garder peu d'espèces avec beaucoup de variabilité génétique chacune, afin qu'elles aient plus de possibilités d'évolution? Nous n'avons pas encore les instruments conceptuels pour résoudre ce genre de question.

PIERRE-HENRI GOUYON : Nous sommes tous d'accord là-dessus, il y a une recherche conceptuelle à faire. Ceci dit, lorsqu'on l'aura, la question

ne se posera plus de la même manière. On ne gère pas la biodiversité comme on fait sa valise. Assez curieusement, ce sont les sciences les plus déterministes qui nous donnent des leçons. Aujourd'hui les physiciens et les chimistes qui travaillent dans les nanotechnologies font s'auto-assembler des objets pour fabriquer des systèmes plutôt que d'essayer de fabriquer chaque élément du système l'un après l'autre. En biologie de l'évolution, en écologie de la biodiversité, où tout est interactions et où nous travaillons sur des systèmes très complexes, nous en sommes encore à nous demander s'il faut garder l'espèce X ou Y. Nous travaillons tous sur ce concept d'auto-organisation même si nous ne nous en rendons pas toujours compte. Nous pouvons essayer de gérer l'ensemble du système auto-organisé mais certainement pas chaque espèce une par une.

ROBERT BARBAULT : L'expression « gérer la biodiversité » est totalement démesurée par rapport à nos capacités. Par contre, nous pouvons établir des règles pour sauvegarder la diversité de vastes écosystèmes sans avoir à intervenir à l'intérieur de ces écosystèmes.

Dans la nature, il y a aussi bien des parasites, des agents pathogènes, que des ressources alimentaires et des médicaments. Il faut donc lutter. Mais c'est une lutte de type judo, qui s'appuie sur les

forces existantes. De ce point de vue là, il peut y avoir un aménagement des relations entre le développement des sociétés humaines et la sauvegarde d'un bon fonctionnement de la biosphère, mais dire que nous allons gérer, que nous allons devenir des super chefs jardiniers planétaires: non!

Il y a une différence entre ce qu'on a à faire et ce qu'on décide de faire. Nous parlons d'un choix de société. Nous pouvons désigner des hauts lieux de biodiversité, comme les récifs coralliens, et concentrer tous nos moyens pour les sauvegarder. Comme si la diversité de la toundra ou des zones froides de l'Europe, moins médiatisées, n'avaient aucun intérêt pour les gens qui y vivent. Il faut éviter la confusion entre l'analyse scientifique et les choix sociaux ou politiques.



▲ Médaille en or frappée en Inde. L'éléphant marchant vers la droite, l'Est, est une référence directe à la conquête de l'Inde et à la victoire sur les éléphants de Porus en 326 avant notre ère.

LUC ABBADIE : Gérer revient à créer un système en partie artificiel que nous croyons contrôler. Or nous n'avons pas

les moyens intellectuels de ce contrôle. Je prends un exemple concret: les systèmes agricoles. Ils fonctionnent souvent mal malgré des apports d'énergie et de nutriments énormes. Pourquoi? Parce que nous avons changé certains acteurs et certains processus sans vérifier la cohérence de ces changements avec la logique d'ensemble de l'écosystème. Cette logique est difficile à percevoir: les systèmes naturels, durables, diversifiés, productifs, constituent de bons modèles pour la définir.

Nous avons à peu près compris le principe de la mécanique évolutive, mais les interactions qu'elle génère en aval sont d'une énorme complexité. Au cours de l'histoire de la planète, une multitude de scénarios « biodiversité-environnement » ont été testés et subsistent dans l'organisation actuelle de la biodiversité. Il faut essayer de conserver ce potentiel, même si par ailleurs je suis un chaud partisan de l'ingénierie écologique. Il y a des modèles naturels sur lesquels nous avons intérêt à réfléchir.

HERVÉ LE GUYADER : Voici trois exemples des actions actuelles pour la « conservation de la biodiversité ». L'association des Croqueurs de pommes. Que font-ils? Ils sont en train de « sauver » toutes les variétés de pommes qui disparaissent. On est à l'intérieur d'une même espèce, on fait de la variabilité intraspécifique.

Certaines personnes se battent pour que les dauphins ou les baleines restent en vie. Ils focalisent sur une espèce, mythique la plupart du temps, parce que c'est gros, parce que c'est beau, parce que c'est un peu exceptionnel.

Troisième exemple: les Australiens et la grande barrière de corail. Imaginez que les poissons des récifs coralliens soient moins colorés, je ne suis pas sûr qu'on entendrait autant parler d'eux.

J'ai choisi ces trois exemples parce qu'ils représentent les trois niveaux de la biodiversité. Il est bien évident que jamais on ne pourrait « gérer », comme les Croqueurs de pommes, toutes les espèces. Effectivement, les récifs coralliens sont des écosystèmes phares mais l'écosystème toundra n'en est pas moins extraordinaire.

LA BIODIVERSITÉ, VALEUR ÉTHIQUE OU ÉCONOMIQUE ?

PIERRE-HENRI GOUYON : Je compare le problème éthique lié à la biodiversité au problème de la peine de mort. On peut trouver beaucoup d'arguments rationnels en faveur de la peine de mort. Simplement, une société qui se donne le droit de tuer les gens est une société qui se dévalorise elle-même. Une société qui se donnerait le droit de détruire toutes les espèces vivantes qui ne l'intéressent pas, pour moi, ce serait du même ordre. On peut discuter de l'utilité de la biodiversité pour les humains – et je pense que c'est bien d'en discuter – mais ce n'est pas cela le problème numéro un. Le plus important, c'est notre perception de nous-même dans notre rapport à la nature, dont nous sommes issus, dont nous faisons partie. Nous sommes aujourd'hui dans un système social, économique et politique qui a du mal à prendre ce genre de dimensions en compte. À moins de réussir à donner une valeur économique aux valeurs éthiques, je crains que l'attitude qui consiste à calculer systématiquement une valeur économique à tout, y compris à la biodiversité, ne permette pas de prendre en compte la dimension la plus essentielle de la question.

MICHEL VEUILLE : Depuis 1992, la Convention sur la diversité biologique de Rio nous a donné un cadre de réflexion différent du cadre de réflexion dans l'absolu – je dirais philosophique – sur la biodiversité. Cette convention a l'intérêt de rassembler des nations pour lesquelles la biodiversité est perçue de manières différentes: comme richesse esthétique, comme richesse matérielle ou comme ressource potentielle – ressource économique y compris. La Conférence de Rio a permis une réflexion commune, qui sort de ce faux débat sur la valeur de la biodiversité en soi, et qui nous met face à nos responsabilités.

ROBERT BARBAULT : Je pense que la première chose à dire quand on vous demande à quoi cela sert – question agaçante et mal formulée, parce qu'on ne dit pas à quoi cela doit servir –, c'est que la diversité du vivant est le fruit de quatre milliards d'années d'évolution. Les espèces ont inventé des choses. Pendant des

LA CONVENTION SUR LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE

La Convention sur la diversité biologique est un engagement historique. C'est le premier traité conclu au niveau mondial qui aborde tous les aspects de la diversité biologique. Il concerne non seulement la protection des espèces mais également celle des écosystèmes, du patrimoine génétique, ainsi que l'utilisation durable des ressources naturelles. Il est le premier à reconnaître que la conservation de la diversité biologique est une « préoccupation commune à l'humanité » et qu'elle fait partie intégrante d'un développement socio-économique durable.

- Ouverture à la signature lors du « Sommet de la Terre », à Rio de Janeiro, le 5 juin 1992.
- Entrée en vigueur le 29 décembre 1993, 90 jours après la 30^e ratification.
- Ratifiée par 188 pays.

millions d'années, elles ont résolu des problèmes pour survivre, pour se multiplier... Cela doit susciter notre respect. Tout saccage est d'abord une atteinte à notre statut d'espèce humaine. Une fois qu'on a dit cela, on a dit l'essentiel. Ensuite, on peut dire que nous dépendons de la diversité du vivant et de toutes les interactions qu'elle implique. Nous en dépendons pour les valeurs esthétiques ou spirituelles qui lui sont associées mais aussi pour nous nourrir, pour nous soigner... Donner un chiffre économique à toute chose n'est pas nécessaire. Certains s'alarment de la disparition d'espèces. D'abord, ce n'est pas totalement irréversible. Et d'autre part, la crise de la biodiversité est une occasion pour l'espèce humaine de réagir, de reconsidérer ses objectifs de développement. Cela renvoie à l'impératif d'un développement durable sauf que, pour l'instant, c'est plutôt de « développement pourvu que cela dure » dont il est question.

LUC ABBADIE : La biodiversité est un symbole de durabilité et d'adaptabilité. Notre mode de développement n'est pas durable parce qu'il n'est pas adapté à la finitude des ressources et qu'il ignore le rôle que jouent les autres espèces dans la régulation de notre environnement. Nous sommes dans une véritable crise de civilisation : il faut réinventer le monde, et l'histoire du vivant peut nous aider à trouver quelques bonnes idées...

ROBERT BARBAULT : Le concept de service écologique, même s'il est agaçant, a quand même le mérite de faire comprendre que certaines choses d'importance pour notre bien-être peuvent échapper aux lois du marché... jusqu'à ce qu'elles soient dégradées au point que la mise en

place de dispositifs techniques de substitution devient inévitable – ce qui s'avère fort coûteux. Les grands industriels de l'eau savent bien que préserver la qualité des écosystèmes, et donc de la biodiversité, coûte moins cher que de construire et d'entretenir de grandes usines de traitement de l'eau.

PIERRE-HENRI GOUYON : On entend toujours « Mais les scientifiques vont trouver ». Il est important de le dire ici : la solution que nos contemporains attendent, on ne va pas la trouver. Nous avons la solution théorique du problème mais cette solution n'est pas celle qu'ils espèrent. Elle est de l'ordre de la régulation de la consommation, de la dépense...

MICHEL VEUILLE : Le premier acte de la raison, à l'image de Socrate, c'est de savoir sonder son ignorance. La science ne peut pas tout, et ne peut notamment pas prévoir précisément l'avenir, même si son rôle reste d'éclairer le citoyen. L'autre domaine où l'on fait des prévisions dans notre monde, c'est la politique. On peut gloser sur les promesses non tenues, et sur les conséquences réelles des actions des politiciens. Néanmoins, le résultat de la mise bout à bout des actes politiques, c'est l'Histoire. Elle va dans son sens, vaille que vaille. C'est à peu près l'image de ce que nous pouvons humblement espérer faire au cours de ce XXI^e siècle pour sauvegarder la biodiversité. Or quoi que nous fassions, consciemment ou non, dans le domaine de l'interventionnisme ou du laisser-faire, ce que nous ferons ou ne ferons pas sera déterminant pour la sauvegarde de la biodiversité. La science reste à la base de notre réflexion, même s'il faut combattre la foi absolue dans la science.



▲ Chenille de *Vettius tertianus* au dernier stade de développement. Cette chenille parasite les jardins habités par la fourmi *Pachycondyla goeldii*.

PIERRE-HENRI GOUYON : Et dans la technique surtout, plus que dans la science.

HERVÉ LE GUYADER : Je reviens encore à cette question de problème de notion de temps. Au XVIII^e siècle, les forestiers géraient la forêt pour les générations futures. Ils laissaient pousser des chênes pour faire des bateaux. Ils savaient qu'ils ne verraient jamais de leur vivant ces chênes utilisés. Actuellement la constante de temps de réflexion des politiques, c'est quelques années, le temps d'un mandat.

MICHEL VEUILLE : La biodiversité se caractérise par sa transversalité, y compris maintenant au CNRS. Mais évidemment, pour être transversal, il faut d'abord être orthogonal à quelque chose qui préexiste. Il y a effectivement des fondements scientifiques à ce domaine transversal. L'intérêt d'un établissement comme le CNRS, c'est précisément de réunir à la fois la recherche fondamentale et une vision transversale qui organise l'ensemble.

12

COMPRENDRE LA BIODIVERSITÉ

DE LA VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE À LA RICHESSE DES FAUNES ET DES FLORES, DE LA DIVERSITÉ DES ESPÈCES QUI COMPOSENT CES DERNIÈRES À LA DIVERSITÉ DES ÉCOSYSTÈMES ET DES PAYSAGES, COMPRENDRE LA BIODIVERSITÉ C'EST D'ABORD IDENTIFIER, INVENTORIER ET CLASSER LES ENTITÉS BIOLOGIQUES QUI LA CONSTITUENT : LES ESPÈCES. MAIS C'EST AUSSI ANALYSER LA STRUCTURE GÉNÉTIQUE DE LEURS POPULATIONS, RECONSTITUER L'HISTOIRE DES LIGNÉES ET MIEUX APPRÉHENDER LE JEU ET L'AMPLEUR DE LA PLASTICITÉ PHÉNOTYPIQUE. C'EST ENFIN SE PENCHER SUR LA RICHESSE DES INTERACTIONS ENTRE ESPÈCES, QUI CONSTITUENT LA TRAME ÉCOLOGIQUE DE CE QU'IL EST CONVENU D'APPELER LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITÉ.

■ COMBIEN Y A-T-IL D'ESPÈCES SUR TERRE ?

De temps à autre, l'annonce de la découverte d'une plante ou d'un animal quitte le champ des cercles de spécialistes et atteint la presse quotidienne. Ainsi, la découverte du plus petit vertébré du monde, *Paedocypris progenetica*, un poisson des mangroves de Sumatra d'à peine 8 millimètres, ou encore la description de *Kiwa hirsuta*, représentant une nouvelle famille de crustacés du Pacifique oriental, ont été très médiatisés.

Derrière ces « coups » médiatiques, l'inventaire de la planète se poursuit au rythme annuel de 16 000 nouvelles descriptions d'espèces. Même en Europe, l'inventaire continue au rythme de 600 descriptions d'espèces animales par an, sans aucun ralentissement depuis le début du xx^e siècle. En réalité, la seule certitude acquise au cours des vingt dernières années est que le nombre total d'espèces vivantes est supérieur d'un, voire de deux, ordres de grandeur par rapport au 1,8 million d'espèces déjà décrites. Les forêts tropicales, les récifs coralliens, les grands bassins océaniques et l'ensemble des parasites constituent les principaux réservoirs d'espèces inconnues. De nouveaux types d'organisations (classes, ordres nouveaux) restent sans aucun doute à découvrir chez les eucaryotes unicellulaires. L'achèvement de l'inventaire des vertébrés, des phanérogames et de quelques rares groupes d'invertébrés (papillons diurnes, odonates) est sans doute globalement à notre portée avec les moyens humains existants. Pour la majorité des groupes, cependant, les moyens humains et méthodologiques de description de la diversité des espèces sont globalement inadaptes à la tâche et devraient être eux aussi réévalués d'un ou deux ordres de grandeur.

Au rythme actuel de l'inventaire, la plupart des espèces seront éteintes avant même d'avoir été décrites et nommées. De ce point de vue, si la révolution moléculaire a, dès les années 70, bouleversé la taxonomie des procaryotes, son apport à la taxonomie des eucaryotes reste pour le moment marginal. L'impact d'initiatives internationales telles que le *Barcode of Life*, qui consiste à séquencer le gène codant pour la Cytochrome oxydase 1 pour reconnaître et séparer les espèces, reste encore l'objet de discussions au sein de la communauté scientifique.



© Ifremer / A. Ellis

▲ *Kiwa hirsuta* a été découvert par un chercheur de l'Ifremer en mars 2005. Durant les premières semaines de mars 2006, de façon totalement inattendue, les médias se sont emparés de cette découverte. En quelques jours, le moteur de recherche Google affichait non plus quelques pages mais 200 000 pages évoquant cet animal.

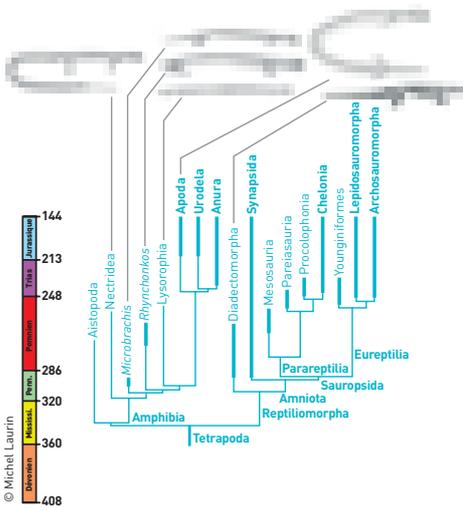
■ COMMENT CLASSER LES ESPÈCES ?

Étant donné cette multitude d'espèces vivantes, la biodiversité n'est intelligible qu'à travers des concepts. Les classifications ont pour rôle de créer ces concepts ainsi que des mots de portée générale. Une classification est arbitraire. Elle a pour fonction de remplir un cahier des charges préétabli. Les objets sont regroupés afin de rendre compte de certaines propriétés spécifiques comme, par exemple, nos besoins culinaires (fruits de mer, gibier...).

Dans le domaine des sciences biologiques, une classification peut aussi avoir pour but de créer des ensembles restituant une homogénéité des espèces en termes de relations fonctionnelles dans les milieux (phytoplancton, zooplancton). Une bonne classification rend compte des propriétés dont on a convenu.

Depuis 150 ans, dans le cadre de la théorie de l'évolution, la systématique, ou science des classifications, s'est assigné comme but de créer des concepts – des taxons – restituant les degrés d'apparentement relatifs entre les espèces. Depuis un siècle, la phylogénie est « l'arbre de la vie » qui exprime ces relations. Le rôle de la systématique ne se réduit pas à identifier des espèces, créer et gérer des noms. Elle reconstitue les relations de parenté à partir de l'anatomie comparée et aussi de la comparaison de gènes homologues. Sur un arbre phylogénétique, chaque branche de l'arbre se voit assigner un nom – celui d'un taxon – et contient toutes les branches aval. Une classification phylogénétique est un système de taxons emboîtés. Nous ne savons vraiment les fabriquer que depuis une cinquantaine d'années.

Cette classification du vivant est véritablement la réalisation d'une « révolution copernicienne » que le programme scientifique de Darwin portait en germe. Elle n'allait plus refléter la position centrale que les humains se donnaient dans l'Univers, mais les degrés d'apparentement entre les êtres.



▲ Phylogénie des tétrapodes.

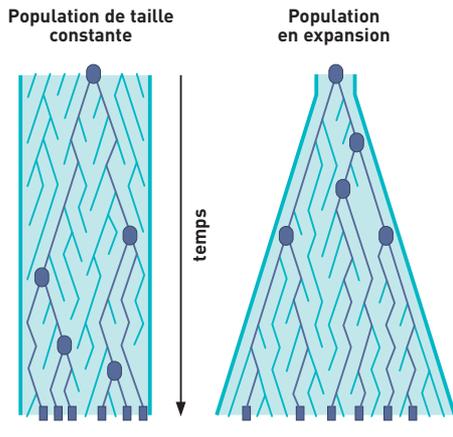
DES BASES DE DONNÉES STRATÉGIQUES

Tout comme en météorologie, la modélisation et la prédiction de la biodiversité sont possibles à condition de pouvoir s'appuyer sur de grands ensembles de données spatialisées sur les espèces. En superposant les coordonnées géographiques de la présence d'espèces avec des cartes climatiques, géologiques, écologiques... il est possible de calculer la répartition potentielle des espèces à partir de leur répartition observée. En faisant varier, par exemple, les paramètres climatiques suivant les différents modèles existants, on peut prédire l'évolution possible de la biodiversité locale en fonction du changement du climat. De telles données ont été accumulées empiriquement dans les collections de musées depuis deux siècles – comme, par exemple, les spécimens d'herbiers du Muséum national d'histoire naturelle (www.mnhn.fr) – et, beaucoup plus récemment, dans des bases de données sur les observations environnementales (inpn.mnhn.fr). Pour construire l'infrastructure qui permet d'exploiter ces données dispersées dans d'innombrables institutions, l'enjeu technologique et scientifique est de rendre interopérables les bases de données existantes. De cette façon, tout utilisateur pourra exploiter les données comme si elles étaient stockées dans une seule base. Les outils informatiques d'exploitation seront mis à disposition. Pour arriver à ce résultat, plusieurs groupes internationaux travaillent autour d'un groupement international, le GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*, www.gbif.org), sur la clarification des concepts et l'élaboration des logiciels qui permettront d'utiliser les données disparates déjà accumulées.

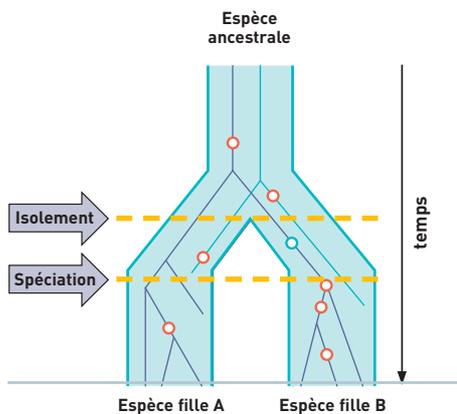


■ UNE DIVERSITÉ ANCRÉE DANS LA GÉNÉTIQUE

La plupart des mécanismes permettant d'expliquer la diversité en termes d'espèces : hasard, sélection naturelle et migration, sont aussi à l'œuvre à l'échelle des populations. Les mutations, qui se produisent au hasard dans le génome des individus, fournissent la variabilité de base sur laquelle s'exercent les autres forces évolutives.



▲ **Figure 1.** Signature moléculaire des événements démographiques passés. Dans une population, les séquences d'un même gène (ici, six séquences figurées par des carrés) ont des ancêtres communs (figurés par des cercles). Dans une population d'effectif constant, beaucoup de ces ancêtres sont récents et un petit nombre lointains. Au contraire, dans une population en expansion, la plupart des ancêtres communs datent du début de l'histoire de la population, et sont comparativement lointains. La généalogie des gènes au sein des espèces nous renseigne ainsi sur l'histoire des populations.



▲ **Figure 2.** La signature moléculaire en taxinomie, ou code-barres, est un système simple de caractérisation des espèces. Lorsque des populations d'une même espèce se séparent, puis engendrent des espèces distinctes, certains polymorphismes de l'espèce ancestrale sont fixés par hasard ou par sélection dans l'une ou l'autre des espèces filles (les mutations sont figurées par des cercles). La mutation diagnostique est figurée en bleu. Cette mutation est apparue chez l'ancêtre commun de toutes les séquences de l'espèce fille B. Elles sont la base du « code-barres » moléculaire. Cependant, toute mutation ne fait pas une espèce. La collaboration entre généticiens et taxinomistes est indispensable pour définir un système universel de code-barres.

■ LES MARQUEURS MOLÉCULAIRES DE L'HISTOIRE DES ESPÈCES

L'histoire d'une espèce laisse des traces dans ses gènes. Ces dernières années, les chercheurs ont fait un bond prodigieux dans l'interprétation de cette information moléculaire. Les généticiens des populations sont capables de recenser les gènes portant la « signature » de la sélection naturelle ou d'événements démographiques (figure 1). Chez les plantes cultivées par exemple, on peut retrouver les gènes portant le « syndrome de domestication », trace de la sélection artificielle pratiquée par les premiers agriculteurs.

Au cours des générations, des mutations apparaissent dans un gène. Le même gène peut donc être retrouvé dans le génome d'individus d'une même espèce sous des formes différentes. Des progrès déterminants sont intervenus, depuis vingt ans, dans l'interprétation de ce polymorphisme des séquences d'ADN. La « théorie de la coalescence » et le développement de nouveaux outils bio-informatiques d'analyse de données permettent d'interpréter les généalogies de gènes d'une même espèce. Les généticiens des populations ont modélisé, grâce à ces techniques, la colonisation de l'Europe par l'homme moderne. Leur modèle intègre la géographie de l'Europe et l'expansion démographique des populations.

Des laboratoires de l'Inra ont étudié la diffusion récente en Europe d'une espèce envahissante de ravageur du maïs. Ils ont retrouvé l'origine de cette invasion. Elle résulte de trois introductions distinctes d'individus venus d'Amérique du Nord. Le prochain défi à relever pour la génomique des populations (figure 2) est de mettre au point une signature moléculaire pour chaque espèce. L'information taxinomique sera alors au service de l'ensemble de la communauté scientifique.

■ DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE ET STRUCTURE DES POPULATIONS

Pour caractériser la variabilité génétique, certains marqueurs biochimiques ou moléculaires sont utilisés. Les marqueurs à déterminisme génétique simple, dont la variation est discontinue, sont essentiellement utilisés pour « marquer » les flux géniques entre individus (régimes de reproduction à une échelle locale) et entre populations (régimes de reproduction à l'échelle régionale). Ils correspondent souvent à des fragments d'ADN sans fonction connue, dont la variabilité semble neutre vis-à-vis de la sélection naturelle.

Les traits phénotypiques – les particularités apparentes – peuvent aussi être utilisés pour caractériser la diversité génétique. Ils sont souvent non neutres vis-à-vis de la sélection naturelle. On utilise donc certains caractères phénotypiques à variation continue, dont le déterminisme génétique de la variation est souvent complexe, et dont l'expression est largement influencée par le milieu d'observation. Le succès évolutif des différents phénotypes dépend du milieu, si bien qu'on peut assister à des phénomènes d'adaptation locale. La migration et la mutation ont des effets antagonistes sur cette adaptation locale. Ces deux forces évolutives injectent de la variation, sur laquelle la sélection naturelle va agir. Lorsque les populations sont de petite taille, la sélection naturelle perd de son efficacité. Par hasard, des mutations néfastes peuvent devenir plus fréquentes et conduire à une baisse de viabilité des populations. C'est ce qu'on appelle fardeau de dérive ou dépression de consanguinité.

Le chou insulaire *Brassica insularis*, par exemple, est une espèce protégée endémique cyrno-sarde dont on connaît une dizaine de populations en Corse. Ce chou a un système de reproduction auto-incompatible. Deux choux présentant le même allèle au locus d'auto-incompatibilité ne peuvent pas se reproduire entre eux. Outre des suivis démographiques annuels depuis 1999, la diversité moléculaire, la diversité de caractères quantitatifs et la diversité au locus d'auto-incompatibilité ont été étudiés. L'ensemble des résultats montre que les populations sont de petite taille, ce qui peut entraîner une perte de diversité et une absence de flux géniques entre populations. Une des populations montre, en outre, une diversité particulièrement faible au locus d'auto-incompatibilité. Ainsi, peu de croisements sont possibles entre les individus de la population. Est-il préférable de renforcer cette population au risque

de lui faire perdre son identité génétique ou de laisser faire et d'espérer l'apparition de mutations au locus d'auto-incompatibilité ? La question n'est pas encore tranchée.

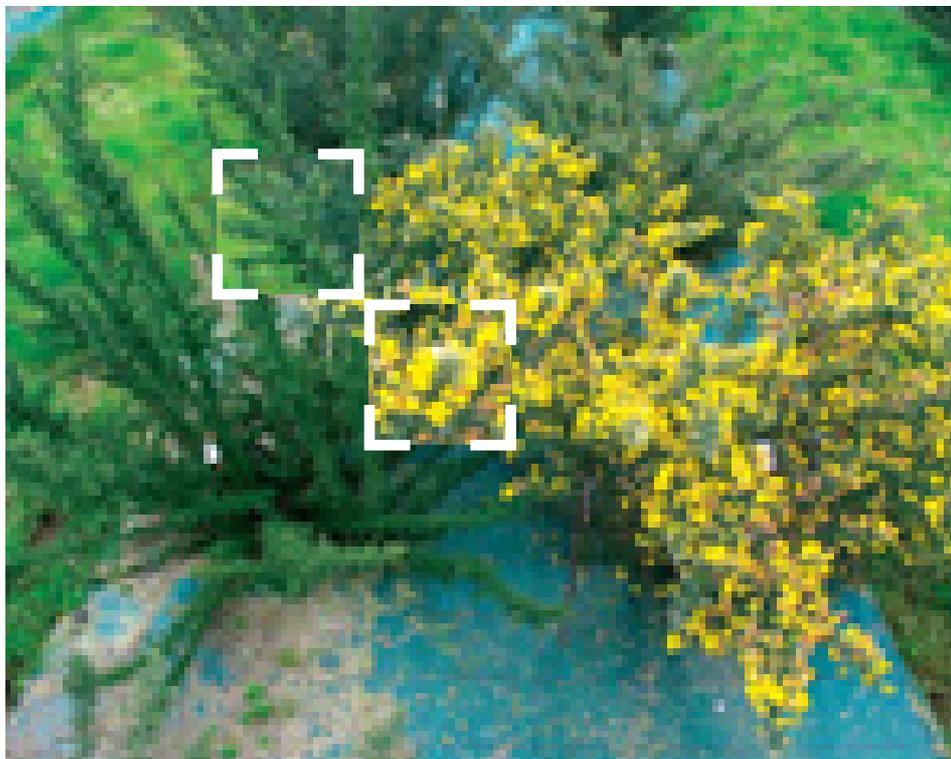
■ LA DIVERSITÉ AU-DELÀ DU GÉNÉTIQUE

Si la diversité génétique est la source majeure de diversité entre les individus d'une même espèce, il existe une diversité phénotypique qui ne lui est pas toujours liée. Par exemple, la plasticité permet à deux individus ayant le même génotype d'avoir un phénotype différent suivant leur environnement et donc de mieux s'adapter à leur milieu. Elle peut être plus ou moins importante suivant les individus et les espèces.

D'autres mécanismes, tels que l'instabilité développementale, permettent d'augmenter la variance du phénotype. Cette variabilité aléatoire peut être adaptative dans un environnement variable et imprédictible. C'est par exemple le cas pour la période de floraison de l'ajonc *Ulex europaeus*.

Enfin, un gène peut subir différentes régulations lors de sa transcription (transformation d'une séquence d'ADN en ARN). Le même génotype peut donc donner des phénotypes différents. Il peut subir des variations épigénétiques, c'est-à-dire des changements héréditaires qui ne sont pas codés par l'ADN. Ceux-ci peuvent être la principale source de diversité, comme l'a montré une équipe du laboratoire Ecobio sur l'espèce clonale envahissante *Spartina anglica*. Appréhender la biodiversité nécessite donc de prendre en compte toute la diversité, déterministe ou aléatoire, héréditaire ou non, que peut générer un même génotype.

La variabilité génétique et l'évolution génétique d'une population sont d'une immense complexité. Les phénomènes en jeu sont nombreux. On ne les connaît pas tous. La biodiversité génétique qui en résulte est très grande. Intégrons maintenant ces phénomènes à l'échelle de l'écosystème. Les relations à l'environnement, les interactions entre espèces, l'évolution de ces relations au fil du temps sont des dimensions à prendre en compte pour comprendre la dynamique écologique.



▲ Ces deux individus d'*Ulex europaeus*, d'âge identique, élevés dans les mêmes conditions expérimentales, ne fleurissent pas en même

temps. Cette expérience montre la variabilité intraspécifique de la floraison.



© CNRS Photothèque / Isabelle Olivier

▲ Population du chou *Brassica insularis* appelée *Conaca*. Non seulement la diversité génétique réduite au locus d'auto-incompatibilité a pour conséquence une réduction de la proportion de croisements compatibles, mais de plus, la pression de sélection pour résister aux parasites floraux y est sans doute affaiblie, du fait même du faible taux de reproduction dans cette population. C'est pourquoi les attaques parasitaires sont plus fortes dans cette population (ici, des pucerons) que dans les autres populations de l'île.

■ UNE BIODIVERSITÉ FAÇONNÉE PAR DE RICHES INTERACTIONS ENTRE ESPÈCES

Les interactions entre espèces sont multiples et complexes. Elles jouent un des premiers rôles sur la scène de la biodiversité.

Les parasites, par exemple, et plus généralement les symbiotes, font partie intégrante de cette biodiversité. Il a même été démontré que les groupes ayant adopté le mode de vie parasitaire se sont plus diversifiés que des groupes libres. Ceci est une manifestation du fonctionnement extrêmement dynamique des interactions durables. Les parasites sont souvent dominants sur la « scène sélective ». Ils modifient la dynamique des populations et l'évolution des espèces libres. Ils peuvent jouer un rôle prépondérant sur le succès ou la faillite d'une invasion biologique.

La réussite d'une invasion d'une nouvelle région par une espèce libre peut dépendre de la présence de ses parasites. Ils peuvent ne pas suivre l'espèce libre ou devenir encore plus virulents sur les hôtes indigènes, une sorte d'arme biologique.

Les arguments peuvent être inversés pour expliquer l'échec d'une invasion. Les scénarios sont multiples, l'intrigue peut se complexifier (presque) à souhait, et finalement la chute sera liée en grande partie aux facteurs dont dépend l'adaptation locale des hôtes ou des parasites. Parmi ces facteurs figurent essentiellement les traits composant le système génétique des espèces, les migrations, les mutations ou le mode de reproduction, en interaction avec le milieu abiotique. Les parasites sont en prise avec de multiples interactions. L'augmentation de leur transmission peut, directement ou indirectement, augmenter leurs effets pathogènes et modifier des traits liés à la reproduction, la survie voire le comportement de leurs hôtes. Les hôtes donnent la réplique. Des mécanismes se mettent en place pour éviter les parasites, stopper l'infection avant que celle-ci ne commence, ou en limiter les effets.



© CNRS Photographique / Lerouge

▲ Le mollusque aquatique *Biomphalaria glabrata* est l'hôte intermédiaire obligatoire du parasite *Schistosoma mansoni*.



© Roger Le Guen

LA COLORATION, UN SIGNAL AU CŒUR D'INTERACTIONS COMPLEXES

L'utilisation de la couleur est un des systèmes de communication animale. C'est un compromis entre être visible pour les conspécifiques et être peu visible pour les prédateurs et les proies. L'araignée crabe imite la couleur précise de la fleur sur laquelle elle évolue pour être camouflée. Elle imite cette couleur dans la gamme de sensibilité des prédateurs et des proies : les oiseaux ont quatre types de cônes (UV, bleu, vert, rouge) et les insectes en ont trois (UV, bleu, vert).

Ces systèmes visuels diffèrent fortement, non seulement par leur gamme de sensibilité mais aussi par leur nombre de photorécepteurs. Il est donc peu probable que l'araignée imite précisément la couleur de la fleur.

Une équipe du laboratoire Ecotrop a mesuré par spectroradiométrie les couleurs d'une araignée posée sur des fleurs de menthe poivrée puis sur le centre d'une fleur de séneçon jacobée. Les résultats de la modélisation montrent que le mimétisme de couleur peut opérer simultanément dans les systèmes visuels des prédateurs et des proies. Pour les oiseaux, les araignées adoptent la couleur rose des fleurs de menthe quand elles sont vues par le système à quatre cônes. De la même manière sur le séneçon, chaque araignée a la couleur individuelle du centre de la fleur jaune sur laquelle elle chasse ses proies. Au contraire, sur le fond des pétales périphériques du séneçon, où elles ne chassent pas, les araignées produisent un fort contraste de couleur, facilement détectable par les oiseaux. Pour les hyménoptères, les araignées apparaissent bleu-vert comme les fleurs de menthe dans le système à trois cônes. Elles miment précisément la couleur bleu-vert du centre des fleurs de séneçon, mais sont contrastées sur les pétales périphériques pour les hyménoptères. Ces résultats indiquent que le mimétisme de couleur des araignées crabes est efficace simultanément dans les systèmes visuels des prédateurs et dans ceux des proies.



■ UNE DYNAMIQUE QUI S'INSCRIT DANS LE TEMPS

La quantité d'espèces animales ou végétales en un lieu ne dépend pas seulement des conditions écologiques qui y règnent aujourd'hui. Elle résulte aussi d'une très longue histoire, engagée dès les temps géologiques les plus reculés. L'évolution des espèces a en effet façonné la structure et le fonctionnement des communautés vivantes. Ainsi, le formidable processus évolutif qui a abouti à l'apparition des tétrapodes et, avec eux, à la sortie des eaux des vertébrés, au Dévonien (370 millions d'années), a eu des conséquences décisives sur l'histoire de la biodiversité terrestre. À l'autre extrémité de l'échelle des temps géologiques, la radiation adaptative des rongeurs – c'est-à-dire leur rapide diversification – au Plio-Quaternaire (2 millions d'années à 50 000 ans), a enrichi les écosystèmes terrestres de milliers de nouvelles espèces de petite taille, offrant une biomasse renouvelée à un grand nombre de carnivores.



▲ Fossiles de tétrapodes du Dévonien.
Crâne d'*Ichtyostega* et d'*Acanthostega*,
patte de *Tulerpeton compsoognathus*.



▲ De petits coquillages percés, *Nassarius kraussianus*, datés de 75 000 ans, ont été découverts dans la grotte de Blombos en Afrique du Sud. Ils étaient utilisés comme objets de parure. Ce sont les plus vieux bijoux jamais découverts.

■ LES HUMAINS DANS LA BIODIVERSITÉ

Les derniers actes de l'histoire de la biodiversité sont étroitement liés à l'histoire de l'humanité. Les vestiges des sites archéologiques, notamment les restes de végétaux (charbon de bois, graines ou fruits carbonisés) et animaux (coquilles, ossements) sont détenteurs de riches informations qui éclairent la complexité des interactions entre les groupes humains et la biodiversité. Ils nous informent dans le même temps sur les modalités d'exploitation de cette matière première nécessaire à la subsistance des humains et sur l'impact de cette exploitation sur le couvert végétal, sur la structure des forêts, sur la composition des communautés animales ou sur l'extinction de tel ou tel grand prédateur. Lue sous cet angle nouveau, la documentation archéologique offre une occasion unique de percevoir les effets sur le long terme d'une grande diversité d'activités humaines, de la chasse à la pêche ou à la collecte de coquillages par de petits groupes préhistoriques jusqu'à l'exploitation organisée des campagnes par les cités antiques ou médiévales en passant par l'élevage et l'agriculture des premières sociétés villageoises. Comprendre cette interaction à l'échelle du siècle ou du millénaire constitue une contribution majeure à la compréhension de la dynamique de la biodiversité, si nécessaire à la gestion de nos ressources actuelles en vue d'un développement durable.

COMPRENDRE LA BIODIVERSITÉ

Coordinateur : Robert Barbault
Institut fédératif d'écologie fondamentale et appliquée, CNRS / université Paris 6, 7, 12 / ENS Cachan / Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) / Institut de recherche pour le développement (IRD)

Avec les contributions de :

- Philippe Bouchet
unité « Taxonomie – Collections », CNRS / MNHN
- Guillaume Lecointre
unité « Systématique, adaptation, évolution », CNRS / université Paris 6 / MNHN / IRD / ENS Paris

- Simon Tillier
unité « Systématique, adaptation, évolution », CNRS / université Paris 6 / MNHN / IRD / ENS Paris
- Isabelle Olivieri
Institut des sciences de l'évolution, CNRS / université Montpellier 2
- Michel Veuille
unité « Génomique des populations », CNRS / École pratique des hautes études (EPHE)
- Anne-Gile Atlan
unité « Écosystèmes, biodiversité, évolution » (Ecobio), CNRS / université Rennes 1
- Ioannis Michalakis
unité « Génétique et évolution des maladies

infectieuses », CNRS / IRD

- Jean-Denis Vigne
unité « Archéozoologie et histoire des sociétés », CNRS / MNHN
- Marc Théry
unité « Fonctionnement, évolution et mécanismes régulateurs des écosystèmes forestiers tropicaux » (Ecotrop), CNRS / MNHN

LA DYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES

UN ÉCOSYSTÈME EST UN DES OBJETS LES PLUS COMPLEXES AUXQUELS PEUVENT SE CONSACRER LES CHERCHEURS. PLUS QUE L'ENSEMBLE DES ESPÈCES PRÉSENTES DANS UN LIEU DONNÉ, LES ÉCOSYSTÈMES SONT AUSSI CONSTITUÉS DE TOUTES LES INTERACTIONS ÉTABLIES PAR LES ESPÈCES ENTRE ELLES ET AVEC LE MILIEU PHYSIQUE. CE RÉSEAU D'INTERDÉPENDANCES, PARTICULIÈREMENT DENSE, REND LA DYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES TRÈS DIFFICILE À ANTICIPER.

■ LES ÉCOSYSTÈMES ET LEUR DYNAMIQUE

Les écosystèmes sont des systèmes à la fois physiques et biologiques. Ils sont capables d'autorégulation et dépendent aussi bien des lois de la thermodynamique que de celles de l'évolution darwinienne.

Un écosystème peut être analysé en termes de structure. On étudie alors le type d'espèces présentes, la distribution spatiale des espèces et des constituants physiques, et l'organisation des réseaux trophiques entre espèces. Mais la description de

ces systèmes peut aussi se focaliser sur leur fonctionnement. Seront alors mis en exergue la variation temporelle de la structure, la circulation de la matière et de l'énergie au sein de l'écosystème ainsi que les échanges de matière et d'énergie avec l'atmosphère, l'hydrosphère et la géosphère.

Les écosystèmes sont aujourd'hui soumis à de fortes pressions. Ils subissent le changement rapide du climat, l'extension des zones urbanisées et des surfaces cultivées et l'érosion de la biodiversité. Pourtant, ce sont des sources d'énergie, de matériaux et de nourriture indispensables aux humains. Ils jouent un rôle essentiel de régulateur des cycles biogéochimiques. L'effort de recherche qui leur est consacré, au CNRS en particulier, est de ce fait toujours plus grand.



© CNRS Photothèque / Hervé Thery

▲ Développement de villes satellites au Brésil. Il ne reste rien de la végétation originelle de savane, seules les forêts-galeries sont en partie préservées.

■ LA BIODIVERSITÉ PRÉSERVE LES ÉCOSYSTÈMES

La diminution rapide du nombre d'espèces présentes sur la planète génère de nombreuses interrogations sur l'importance de la diversité du vivant dans la dynamique des écosystèmes. Quelles seront les conséquences de l'érosion de la biodiversité sur les performances des écosystèmes du point de vue de l'utilisation des ressources ? Face à des perturbations de natures variées comme les tempêtes, les incendies, les pollutions..., les écosystèmes seront-ils capables de se maintenir ? Dans quelles conditions conserveront-ils leurs capacités de résilience ? Il existe un lien positif entre les



© CNRS Photothèque / Xavier Lemoine

performances d'un écosystème et le nombre d'espèces qui le peuplent – sa richesse spécifique – en particulier dans les communautés végétales. C'est par exemple le cas dans les prairies européennes où la productivité végétale augmente avec le nombre d'espèces présentes, à densité égale bien entendu. Certaines observations laissent aussi présager un rôle positif majeur de la diversité génétique sur la productivité et la stabilité des écosystèmes.

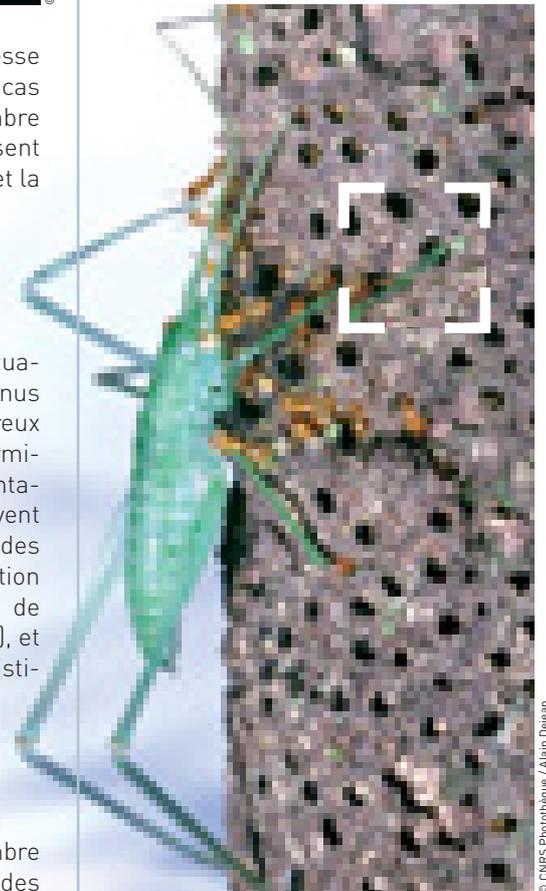
■ UNE ASSURANCE BIOLOGIQUE

La biodiversité procure à l'écosystème une capacité tampon vis-à-vis des fluctuations de l'environnement physique et biologique. Les mécanismes de cet effet, connus sous le nom d'assurance biologique, sont encore discutés et font l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques au CNRS. Ceux-ci ont pour objectif de déterminer dans quelle mesure le tirage au hasard d'espèces particulières, la complémentarité entre espèces et l'établissement de relations mutualistes entre espèces peuvent expliquer les effets positifs de la biodiversité sur les performances et la résilience des écosystèmes. Un gros effort de recherche est également engagé sur la signification fonctionnelle de la biodiversité des micro-organismes, notamment en termes de régulation de certaines étapes clés du cycle de l'azote (nitrification, dénitrification), et plus généralement sur les interactions entre la biodiversité du sol et les caractéristiques physiques et chimiques de ce dernier.

■ PRÉVOIR LE DEVENIR DES ÉCOSYSTÈMES

L'érosion de la biodiversité ne se traduit pas seulement par la réduction du nombre d'espèces, mais aussi par une modification de la structure et de la dynamique des communautés animales, végétales et microbiennes. Les mécanismes qui régulent les effectifs des populations ainsi que la nature et l'intensité des interactions entre espèces en sont donc altérés. La prévision des effets de ces changements sur le fonctionnement des écosystèmes demeure un exercice difficile et génère beaucoup d'activités de modélisation et de travaux expérimentaux. On cherche par exemple à comprendre la part des mécanismes évolutifs dans la réponse des écosystèmes à la variation du climat, ou à prédire dans quelle mesure la circulation de la matière et de l'énergie peuvent varier au sein de l'écosystème, entre l'écosystème et l'atmosphère ou l'hydrosphère, ou encore à déterminer dans quelles conditions un organisme peut acquérir le statut d'espèce invasive et les conséquences des invasions pour l'écosystème. Les espèces invasives sont elles-mêmes une source de réduction de la biodiversité. Il y a par exemple le cas fameux du séneçon du Cap (Afrique du Sud) qui a envahi toute l'Europe et qui provoque une diminution drastique du nombre d'espèces végétales présentes dans les prairies. Le changement de climat et la fragmentation des milieux

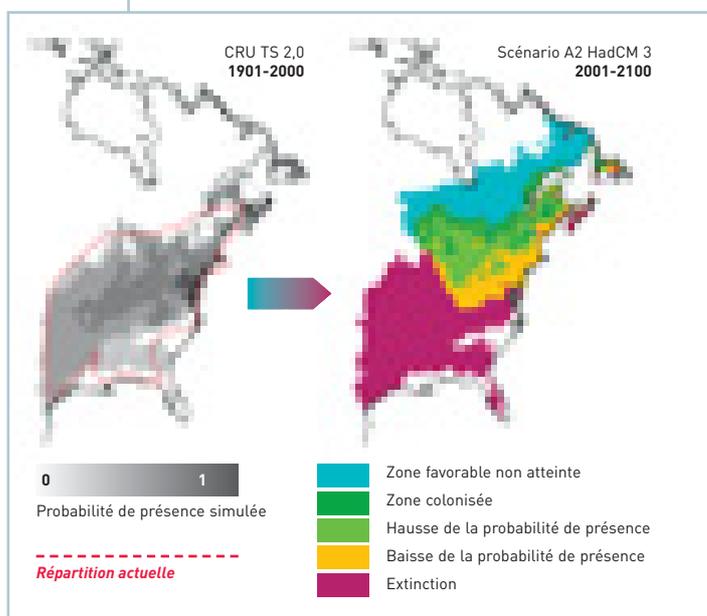
◀ Les feux de brousse annuels constituent un facteur majeur de la dynamique des savanes d'Afrique de l'Ouest.



© CNRS Photothèque / Alain Dejani

▲ Sauterelle piégée par des fourmis. Les fourmis *Allomerus decemarticulatus*, qui habitent exclusivement dans la plante *Hirtella physophora*, construisent un piège pour capturer des insectes qui sont ensuite consommés. L'association entre cette fourmi et la plante est un mutualisme : la plante fournit un logement aux fourmis sous la forme de poches situées à la base des feuilles et les fourmis protègent en contrepartie leur plante hôte contre les insectes herbivores. Grâce à ce piège, les fourmis arrivent à capturer des insectes de plus de 1 500 fois leur propre poids.

perturbent eux aussi les communautés et leurs effets s'ajoutent à ceux de la perte d'espèces. Un des grands enjeux de la recherche aujourd'hui est de définir les futures aires de répartition des espèces à partir d'une analyse de leurs traits d'histoire de vie et d'en déduire les communautés et les écosystèmes nouveaux qui se constitueront. Ainsi, selon les hypothèses retenues, le hêtre pourrait disparaître presque totalement de France ou subsister sur la partie ouest du pays à l'horizon 2100.



▲ Changement de répartition d'une espèce d'arbre nord-américain *Fraxinus americana* pour le XXI^e siècle, d'après des simulations du modèle Phenofit.

Carte de gauche : simulation de l'aire de répartition actuelle de l'espèce en utilisant les données du CRU (université *East Anglia*, Royaume-Uni).

Carte de droite : simulation de l'aire de répartition de l'espèce en 2100 en utilisant

les données du modèle HadCM3 (*Hadley Center*, Royaume-Uni) selon le scénario A2 (défini par le Giec).

La simulation montre que les capacités de dispersion de l'espèce ne lui permettront pas d'occuper l'ensemble des zones climatiquement favorables en 2100, et que les populations situées en marge sud de répartition devraient s'éteindre d'ici 2100.

IDENTIFIER LA BIODIVERSITÉ DES SOLS

La caractérisation de la biodiversité est une étape difficile dans toute étude du fonctionnement biologique des écosystèmes. Elle est même pratiquement impossible au niveau des espèces pour les micro-organismes des sols, des eaux douces et des océans. De nouveaux outils sont mis au point au CNRS pour caractériser rapidement la diversité génétique dans ces milieux et permettre des approches comparatives. Les techniques de génomique à haut débit ainsi que les puces à ADN ouvrent des perspectives prometteuses pour comprendre les variations de la biodiversité dans les sols en fonction des changements de l'environnement, y compris en cas de pollution.

Les puces à ADN permettent d'identifier les micro-organismes présents dans des environnements complexes (sols, milieux aquatiques...). Des séquences d'ADNr de différents micro-organismes sont extraites des bases de données internationales. Grâce au développement de nouveaux algorithmes, les chercheurs du laboratoire « Biologie des protistes » déterminent ensuite les oligonucléotides spécifiques de chaque espèce de micro-organisme et les fixent sur une lame de verre. Les ARN des micro-organismes du sol ou de milieux aquatiques sont alors marqués par fluorescence et s'hybrident avec les séquences spécifiques fixées sur la lame. Chaque point lumineux révèle donc la présence dans ces environnements complexes d'une espèce de micro-organisme et permet ainsi de mieux appréhender les mécanismes régissant le fonctionnement de ces écosystèmes.

DES ÉTUDES À GRANDE ÉCHELLE

Pour comprendre les conséquences des changements globaux – climatiques ou d’usage des terres – sur les populations et les communautés de vertébrés, des études à grande échelle sont nécessaires. Le Centre d’études biologiques de Chizé du CNRS mène des recherches pluridisciplinaires sur les contraintes environnementales, l’adaptation des individus et les implications pour la gestion des populations. Ces recherches ont pour but d’identifier les mécanismes impliqués à travers des recherches à long terme sur des populations de prédateurs et d’herbivores, en milieu marin comme en milieu terrestre. Une approche d’écophysiologie évolutive permet d’étudier les liens mécanistes entre les variations de l’environnement et les phénotypes. Certaines recherches montrent l’importance des variations spatiotemporelles des ressources pour la structure des communautés. D’autres s’attachent à décrire les rapports entre changements globaux et conservation de la biodiversité. Ces travaux portent principalement sur des espèces menacées (outardes, albatros) ou des espèces envahissantes (chevreuils) dont les dynamiques sont fortement tributaires des changements globaux. Ces trois axes de recherche approfondissent nos connaissances sur la dynamique des populations et des communautés animales dans un environnement changeant et permettent d’élaborer de nouveaux principes pour la gestion durable des ressources biologiques.



© CNRS Photothèque / Richard Lamoureux

■ L'ÉCOSYSTÈME, UN ENSEMBLE D'INTERACTIONS TROPHIQUES...

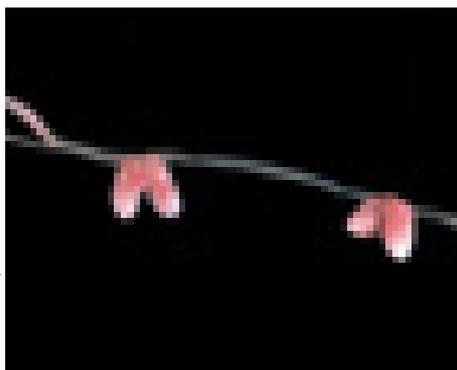
Le concept de biodiversité renouvelle profondément la recherche sur les écosystèmes en focalisant l’attention sur les interactions entre organismes et cycles géochimiques. Le milieu aquatique est particulièrement étudié de ce point de vue en raison des facilités de manipulation qu’il offre aux chercheurs. Un effort important est fourni par le CNRS dans ce domaine. Les chercheurs s’attachent à comprendre le rôle de l’organisation des réseaux trophiques – des ensembles d’espèces réunies par des relations proies-prédateurs. Ils établissent par exemple la connectivité trophique entre espèces et le rôle de leur diversité fonctionnelle sur les flux d’énergie et sur les transferts des principaux éléments (azote, phosphore, carbone...) au sein des écosystèmes. Le couplage entre les réseaux trophiques classiques (plante-animal) et les décomposeurs à travers la boucle microbienne est mieux pris en compte. Le cheminement de la matière au sein des réseaux trophiques ou la position trophique des organismes sont précisés grâce à des marqueurs de la matière organique tels que les acides gras ou les isotopes stables.

■ ...ET NON TROPHIQUES

Une attention nouvelle est aujourd’hui portée aux interactions allélopathiques, c’est-à-dire aux effets inhibiteurs ou stimulants d’une espèce sur une autre par l’intermédiaire de composés chimiques. De même, les effets des substances chimiques liées aux activités anthropiques ne peuvent être tout à fait compris indépendamment de la structure des réseaux trophiques au sein desquels elles sont libérées. Des approches théoriques et expérimentales sont développées pour mieux apprécier les

▶ À gauche : Nodosité fixatrice d’azote (symbiose *Medicago truncatula* (luzerne), *Sinorhizobium meliloti*).

À droite : Araignée *Arycote bruennichi*. Grande espèce de nos régions. Les taches bleues sont des marques faites par l’expérimentateur pour suivre individuellement le déplacement des araignées. Ceci permet de tester sur le terrain l’influence de facteurs tels que la densité des proies ou des congénères sur les changements de site de construction de la toile par un individu.



© CNRS Photothèque / Nathalie Mansion



© CNRS Photothèque / Alain Pasquet

parts relatives des effets directs et indirects de ces substances chimiques sur le fonctionnement des écosystèmes en relation avec la structure des réseaux trophiques. Tous ces aspects soulignent la diversité des réseaux d'interactions au sein des écosystèmes. Une compréhension fine du rôle de la biodiversité sur les processus fonctionnels au sein des écosystèmes n'est plus concevable aujourd'hui sans la prise en compte du couplage entre les réseaux d'interactions trophiques et non trophiques (parasitisme, compétition, allélopathie, mutualisme).

■ LES ÉCOSYSTÈMES DES VILLES

Longtemps considérée comme anecdotique, la biodiversité en milieu urbain fait aujourd'hui l'objet de plusieurs programmes de recherche au CNRS. Contrairement aux idées reçues, la ville abrite un nombre important d'espèces et certains taxons sont même mieux représentés en ville que dans les campagnes environnantes. La biodiversité urbaine constitue un modèle d'étude de choix, qui répond à bien des problématiques actuelles de l'écologie. En effet, la colonisation de ces milieux neufs, a priori peu favorables aux organismes vivants, fournit au chercheur des assemblages inédits d'espèces, c'est-à-dire de nouveaux modèles pour l'analyse des déterminants de la structure des communautés. L'extrême fragmentation du milieu urbain se traduit par la constitution d'un réseau d'habitats isolés les uns des autres qui est également mis à profit pour l'identification des processus de colonisation et d'extinction de petites populations fonctionnant en réseau (concept de métapopulation). En outre, la ville fournit un type d'habitat nouveau pour les espèces qui doivent s'y adapter. Elle constitue donc un véritable laboratoire de l'évolution où l'on peut s'attendre à observer des modifications de traits biologiques (dispersion, reproduction, comportement...) en réponse à la sélection naturelle. Enfin, en tant qu'espace artificiel, la ville permet d'étudier le rôle de l'homme sur le fonctionnement des systèmes écologiques et d'améliorer les bases scientifiques de la conservation de la biodiversité dans les milieux anthropisés.



© CNRS Photothèque / Alain R. Denez

▲ Engoulevent à longue queue, *Caprimulgus climacurus* est un migrateur afro-tropical et un hivernant régulier. Il réside en milieu anthropique : pistes, villages, cultures sur brûlis dans la région de Makokou au Gabon.



UNE STATION MARINE DÉDIÉE À LA BIODIVERSITÉ EN MÉDITERRANÉE

Les stations marines pratiquent de longue date la multidisciplinarité nécessaire à l'approche intégrée de l'écologie et de la biodiversité marines. Elles offrent des possibilités d'expérimentation, aussi bien *in situ* qu'en laboratoire avec de l'eau de mer courante naturelle, ce qui facilite la prise en compte des interactions entre les facteurs physiques du milieu et la complexité biologique. Établies depuis plus d'un siècle et demi, elles détiennent des séries d'observations à long terme de qualité permettant non seulement d'évaluer les changements de l'environnement, mais aussi de valider des modèles. Les stations marines participent aussi activement à la diffusion des connaissances vers les décideurs, vers le monde scolaire et associatif, vers le grand public, contribuant ainsi à la construction d'une bonne gouvernance de l'environnement. L'unité Dimar (Diversité, évolution et écologie fonctionnelle marine), basée dans la station marine d'Endoume, à Marseille, est une des composantes du Centre d'océanologie de Marseille. Elle rassemble les compétences nécessaires à la recherche sur les relations entre la diversité biologique (génétique, phénotypique, spécifique et fonctionnelle) et la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes marins. Une attention particulière est portée à l'impact d'un grand fleuve comme le Rhône sur les communautés benthiques et les pêcheries ainsi qu'aux invasions biologiques, la Méditerranée étant une des régions du monde les plus affectées par ce phénomène. Les résultats aident à la compréhension et à la prévision de l'impact des perturbations (naturelles ou anthropiques) et des changements climatiques sur le milieu côtier. Beaucoup de chercheurs de Dimar sont impliqués en tant qu'experts dans de nombreux programmes de protection et de conservation, tant au plan local que régional, national et européen.



© CNRS Photothèque / Jean-Georges Harmelin

▲ Tombant dans la région de Cassis avec *Parazoanthus* (anémone orange) et *Corallium rubrum* (corail rouge).



ECOTRON, LES ÉCOSYSTÈMES EN OBSERVATION

À la suite d'un article de Michel Loreau publié fin 1998 dans « Bio », le journal du département des sciences de la vie, le CNRS s'est engagé dans une politique d'équipement en Ecotron à l'échelon national. Ces plateformes techniques permettent de soumettre des écosystèmes naturels ou artificiels, ainsi que des communautés animales, végétales ou microbiennes, à des conditions environnementales prédéfinies. L'objectif est de comprendre et d'anticiper leurs réponses à des pressions comme le changement global.

Le premier Ecotron est né en Grande-Bretagne au *Centre for Population Biology (Imperial College)* près de Londres. Son objectif est de quantifier les relations entre l'organisation de la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. À ce jour, deux projets sont en développement en France et un troisième s'annonce.

Premier projet français : l'Ecotron de Montpellier, situé sur les campus du CNRS et de Baillarguet. Il offre un terrain d'expériences et, bientôt, un plateau de douze macrocosmes, des chambres confinées, éclairées en lumière naturelle, dans lesquelles le climat peut être forcé. Ces chambres seront équipées d'instruments pour la mesure en continu de la température, de l'humidité, de la teneur de l'atmosphère en CO₂... Une originalité : elles pourront accueillir des monolithes de sol intacts de 5 m³ avec leur végétation naturelle. Un plateau de mésocosmes et un de microcosmes seront réservés à des études à court terme – moins de deux ans. Ce dispositif, dédié aux écosystèmes terrestres, sera complété par la plateforme Medimeer (Sète) qui permet d'ores et déjà le confinement de communautés pélagiques.

L'Ecotron de Foljuif, près de Fontainebleau, est géré par l'École normale supérieure. Un terrain est dédié à la réalisation d'expériences à long terme en conditions naturelles. Le cœur du projet est un ensemble de 24 chambres climatiques destinées à soumettre des communautés et des écosystèmes artificiels, terrestres ou aquatiques, à des environnements variés. Des bassins permettront le suivi à long terme des interactions entre la structure des réseaux trophiques, la dynamique des communautés

planctoniques et la physico-chimie de l'eau. Des cages à populations serviront à tester l'effet du changement climatique et de la fragmentation du paysage sur la dispersion des animaux.

Enfin, des serres perfectionnées seront consacrées à l'analyse du fonctionnement des communautés végétales en conditions semi-contrôlées.

Un troisième Ecotron, dédié à la biodiversité alpine, est en cours d'étude. Il sera implanté sur le site du Jardin alpin du Lautaret, à 2 100 mètres d'altitude. Il comprendra

en particulier des serres froides autorisant un contrôle précis des paramètres du sol.



▲ Dessin d'architecte de l'Ecotron de Montpellier.



© Foljuif

◀ Ces parcelles du CNRS à Foljuif permettent aux chercheurs d'étudier à long terme l'impact du réchauffement climatique sur le fonctionnement des populations.

LA DYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES

Coordinateur : Luc Abbadie
unité « Biogéochimie et écologie des milieux continentaux », CNRS / Inra / université Paris 6 / Institut national agronomique Paris-Grignon (INA-PG) / ENS Paris / École nationale supérieure de chimie de Paris (ENSCP)

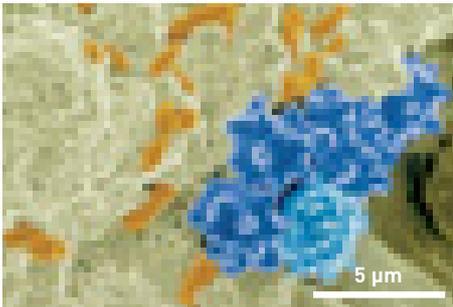
Avec les contributions de :

- Gilles Bœuf
unité « Modèles en biologie cellulaire et évolutive », CNRS / université Paris 6
- Patrick Duncan
Centre d'études biologiques de Chizé, CNRS
- Pierre-Olivier Cheptou

Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, CNRS / universités Montpellier 1, 2, 3 / École nationale supérieure agronomique de Montpellier / Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)

- Jean-Pierre Féral
unité « Diversité, évolution et écologie fonctionnelle marine », CNRS / université Aix-Marseille 2
- Gérard Lacroix
unité « Biogéochimie et écologie des milieux continentaux », CNRS / Inra / université Paris 6 / INA-PG / ENS Paris / ENSCP

2,5 MILLIARDS EN 1955, PLUS DE 6,5 MILLIARDS AUJOURD'HUI ET PRÈS DE 10 MILLIARDS DANS CINQUANTE ANS, TELLE EST L'EXPANSION RAPIDE D'*HOMO SAPIENS SAPIENS* AU SEIN DE LA BIOSPHÈRE. LES HUMAINS MODIFIENT LA TERRE ET L'ENSEMBLE DES ÉCOSYSTÈMES EN ROMPANT L'ÉQUILIBRE DES INTERACTIONS, COMPÉTITIONS ET COOPÉRATIONS ENTRE ESPÈCES. QUELLES SERONT LES CONSÉQUENCES DE L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ SUR L'ÉVOLUTION DES MICROBES QUI, COMME NOUS, FONT PARTIE DU GRAND LIVRE DU VIVANT ? NOTRE SANTÉ EN DÉPEND.



© CNRS Photothèque / D. Cot, G. Nebias

▲ Bactéries et hématies dans un intestin de souris.



© CNRS Photothèque

▲ *Staphylococcus aureus* développé sur une prothèse vasculaire.

■ LES MICRO-ORGANISMES AU CŒUR DU DÉVELOPPEMENT DES POPULATIONS HUMAINES

Les micro-organismes représentent l'une des composantes biologiques incontournables et essentielles de notre planète. L'émergence des organismes supérieurs, dont les premières formes de vie humaine, ainsi que leur impact sur l'environnement ont favorisé la sélection de nouvelles activités chez ces organismes. Ces nouveaux potentiels ont donné naissance à de nombreuses associations qui ont été bénéfiques aux humains. Cette diversité microbienne a un fort impact sur la santé des humains et sur le développement des populations humaines.

■ DEPUIS QUE L'HOMME EXISTE...

Certains micro-organismes colonisent les humains et vivent en étroite interaction avec eux. Nous les retrouvons sur la peau et au niveau de l'ensemble des voies d'entrée et d'élimination du corps humain : fosses nasales, cavité buccale, tractus digestif... Ces micro-organismes utilisent les produits du corps humain ou les aliments ingérés et digérés pour se développer. La colonisation de ces voies par ces microbes se reproduit de génération en génération depuis certainement plusieurs milliers d'années, potentiellement 195 000 ans selon les dernières datations des plus vieux crânes d'*Homo sapiens*. Ce n'est cependant que depuis une cinquantaine d'années que les bénéfices d'une colonisation par certains de ces micro-organismes sur la santé humaine sont documentés et reconnus. Certains micro-organismes peuvent dégrader les aliments non digérés par l'homme. Ils peuvent améliorer le confort digestif, stimuler notre système immunitaire et prévenir une colonisation par des organismes pathogènes. Ces observations ont donné naissance au terme « probiotique » qui désigne un micro-organisme apportant un bénéfice à la santé de son hôte. Il ne faut cependant pas oublier que malgré les bénéfices qu'ils apportent, certains micro-organismes du corps humain peuvent se transformer en agents infectieux opportunistes si notre organisme est fragilisé ou immunodéficient.

■ RECYCLAGE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET TRAITEMENT DES DÉCHETS

Les micro-organismes sont au cœur même des chaînes trophiques et des grands cycles biogéochimiques. Sans leurs contributions et leur grande diversité, il y aurait une cassure dans le recyclage de la matière organique, la biodisponibilité de nombreux éléments essentiels à la vie, et, de façon plus générale, le fonctionnement des écosystèmes. Nous serions submergés par de nombreux déchets que seuls les micro-organismes peuvent dégrader et rendre accessibles par une production dite de « régénération ». Un exemple significatif de leur activité de régénération est le cas très concret du traitement des eaux usées. Ces eaux ont souvent été la cause d'épidémies majeures (peste, choléra, typhoïde...) et produisent des odeurs nauséabondes. En 1914, des scientifiques anglais tirent bénéfice de la diversité microbienne et des études de Pasteur sur la fermentation pour développer un système de bassin où les eaux usées sont aérées et dégradées par les micro-organismes. Cette pratique s'est aujourd'hui modernisée mais utilise toujours les mêmes principes. Ces dernières années, les analyses moléculaires de la diversité microbienne ont montré une grande diversité et complexité d'interactions dans les unités d'épuration des eaux usées. Une recherche intensive est aujourd'hui développée, en particulier au CNRS, pour caractériser les micro-organismes impliqués, comprendre leur fonctionnement et étudier leurs complémentarités. Ces connaissances devraient permettre de réduire encore davantage les risques biologiques et chimiques associés aux eaux usées.

■ LA BIODIVERSITÉ PEUT PROTÉGER DES MALADIES

Plus que celle des micro-organismes, la biodiversité en général est essentielle à la régulation de notre environnement. L'apparition de la grippe aviaire en Europe et l'épidémie de Chikungunya dans l'île de la Réunion nous ont rappelé le rôle majeur joué par les réservoirs et les vecteurs hôtes dans le développement et la propagation de nombreuses maladies infectieuses. Une vision anthropocentrée, réductionniste, ne permet pas de comprendre ces problèmes d'émergences ou de résurgences de maladies. Leur complexité nous paraît inextricable car des milliers d'espèces réservoirs et de vecteurs sont liés par des interactions écologiques subissant et réagissant aux conditions du milieu. La réponse au contrôle de ces maladies à forte composante environnementale n'est pas simple. Que pouvons nous faire pour enrayer le développement de nouvelles épidémies très probables ?

Pour un très grand nombre de maladies d'origine environnementale, l'approche écologique semble la plus appropriée car le centre d'intérêt est l'interaction des êtres vivants avec un agent microbien et la manière dont cette interaction réagit aux conditions du milieu. Les plus fructueuses études de cette approche sont sans conteste celles ayant mis en évidence des phénomènes fondamentaux pour expliquer la circulation de pathogènes dans les écosystèmes. Les espèces réservoirs et de vecteurs animaux présentent des compétences très hétérogènes à retransmettre un microparasite. Cette diversité naturelle joue un rôle essentiel dans la transmission des agents infectieux dans leur environnement.

La maladie de Lyme aux États-Unis en est une remarquable illustration. La bactérie responsable de cette maladie est transmise par une tique à plusieurs espèces animales. Aux États-Unis, le petit rongeur *Peromyscus leucopus* est de loin l'espèce réservoir la plus compétente pour transmettre le microbe aux tiques lors d'une piqûre. Les conditions environnementales, notamment la fragmentation des écosystèmes forestiers, ont favorisé la pullulation de cette espèce, au détriment d'autres, entraînant du même coup une augmentation de la transmission aux vecteurs et donc aux populations humaines fréquentant les zones à risque. Cette situation n'existe pas dans d'autres régions plus boisées des États-Unis car le maintien d'une plus forte biodiversité dans ces systèmes permet une régulation de la population de *Peromyscus leucopus*. Donc, d'après cette étude, une forte diversité biologique locale tend à diluer l'agent infectieux chez des hôtes réservoirs pas ou peu compétents, et donc à diminuer le risque de passage chez les humains. Ce phénomène a été nommé « effet de dilution ».

Depuis, la modélisation mathématique a permis de montrer que ces résultats peuvent être généralisés aux maladies dites « fréquence-dépendantes » pour lesquelles un contact avec un individu infecté ne dépend pas de la densité d'individus



© CNRS Photothèque / C. Delhayre, G. Nabias

▲ *Thiobacillus ferrooxidans* sp. dans un voile bactérien d'un bassin de traitement des eaux acides polluées en arsenic, observé en microscopie électronique à balayage.



© Gilles Balança (Cirad)

▲ Les populations d'oiseaux sont des réservoirs de virus, comme celui du Nil occidental ou de la grippe aviaire. Selon la diversité d'une communauté en espèces d'oiseaux, un même agent infectieux présentera des modalités de transmission très différentes.



© Eye of Science/Coemias

▲ La maladie de Lyme entraîne, sans traitement, des troubles dermatologiques, arthritiques, cardiaques, neurologiques et parfois oculaires. L'agent responsable de cette maladie, *Borrelia burgdorferi*, est une bactérie très mobile, de forme spiralée et de 5 à 25 micromètres de longueur. Elle est transmise par des tiques.

présents. Néanmoins, le mécanisme écologique mis en cause semble plus complexe à élucider pour les maladies « densité-dépendantes ». Dans quelle mesure de tels résultats peuvent-ils être extrapolés à d'autres zoonoses et à d'autres conditions environnementales ? Aujourd'hui, des études développées au CNRS cherchent à formaliser les effets de la biodiversité et de son évolution pour d'autres maladies comme la fièvre du Nil occidental et les gripes aviaires, des maladies pour lesquelles une forte diversité d'oiseaux réservoirs est soupçonnée d'être impliquée.

L'épidémie de grippe aviaire est un phénomène probablement appelé à se répéter. Les réserves naturelles d'oiseaux et les zones humides sont des carrefours de passage d'espèces migratrices – porteuses de nombreux pathogènes – et de rencontre avec des espèces résidentes. Ces lieux sont très favorables à la circulation d'agents pathogènes, même à bas bruit. Dans quelle mesure la proximité d'élevages intensifs de volailles et de zones humides dans le département de l'Ain, où le virus H5N1 a été détecté, n'a-t-elle pas favorisé le déclenchement d'une réaction en chaîne, dans laquelle les humains ont pu également jouer un rôle, conduisant à devoir tuer plus d'un millier de gallinacés ?



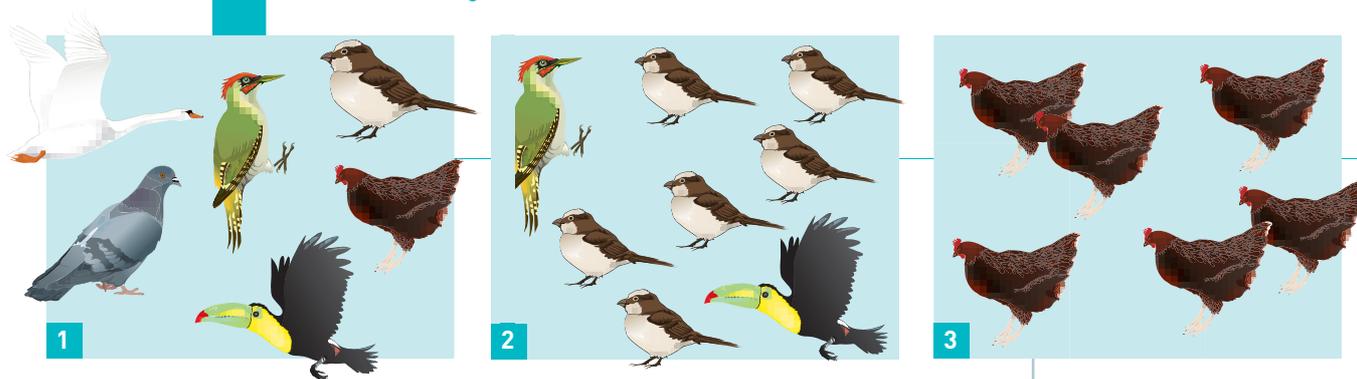
© David Aubrey / Science Photo Library

▲ Aux États-Unis, *Peromyscus leucopus* est un réservoir pour *Borrelia burgdorferi*. Ces rongeurs transmettent la bactérie aux tiques, qui la transmettent aux humains. L'étude de la dynamique de la population de rongeurs est donc nécessaire pour comprendre la fréquence de la maladie de Lyme.

LA BIODIVERSITÉ CONTRE LES ÉPIDÉMIES

Selon la diversité spécifique en espèces d'oiseaux dans une communauté, un même agent infectieux présentera des modalités de transmission très différentes :

1. En présence d'une diversité d'espèces réservoirs – chacune de ces espèces étant plus ou moins compétente pour transmettre le virus –, l'agent pathogène rencontre de nombreuses solutions pour sa transmission, avec un résultat global de dilution de ses effets. Le phénomène de dilution est d'autant plus important que la représentativité des espèces réservoirs faiblement compétentes est importante.
2. Dans des communautés plus pauvres en espèces réservoirs, où une ou quelques espèces très compétentes pour le virus ont profité des conditions environnementales pour se reproduire, la transmission de l'agent infectieux est plus facile et ses effets sont plus visibles. C'est une situation que l'on retrouve lorsque des oiseaux migrateurs, très compétents pour un virus, s'installent dans une communauté locale où le virus est absent.
3. Situation extrême où des individus d'une seule espèce d'oiseau, souvent très compétente à transmettre un virus ou à en subir les conséquences, sont concentrés en grand nombre comme dans les élevages.



■ L'EXEMPLE DE L'AGRICULTURE

L'agriculture est un autre exemple du rôle de la biodiversité dans le contrôle des épidémies. Depuis quelques années, le risque lié à la culture d'un nombre restreint de variétés et le bénéfice de la diversité génétique sont reconnus. En pathologie végétale, il existe de nombreux cas de développement de maladies consécutifs à la culture d'une variété particulière ou d'un groupe de variétés apparentées. Ce constat a conduit au concept de vulnérabilité génétique chez les plantes. La culture de variétés vulnérables est un facteur clé des épidémies. Elle perturbe l'équilibre entre le pathogène et ses hôtes et favorise sa propagation.

À l'inverse, les effets de la diversité intraspécifique peuvent être bénéfiques. Le développement puis le contrôle, en Ouganda dans les années 90, des épidémies de mosaïque du manioc, en est un exemple spectaculaire et dramatique.

Les premières observations de mosaïque du manioc remontent à 1894 en Tanzanie. Cette maladie d'origine virale est transmise par boutures et par insectes. Certaines variétés sont plus affectées que d'autres par la maladie. Les agriculteurs, en choisissant les variétés relativement peu atteintes, évitaient des pertes de récolte importantes. Ces constats anciens ont été corroborés depuis par des observations dans de nombreux pays africains, notamment au cours des épidémies en Ouganda dans les années 90, auxquelles se sont consacrés les chercheurs de l'IRD. Les régions les plus affectées du pays étaient celles où était cultivée presque exclusivement la variété locale Ebwanateraka. Seules les cultures comportant de nombreuses autres variétés ont été épargnées. Ebwanateraka avait été sélectionnée pour sa précocité et son

fort rendement, et cultivée par les agriculteurs quelques années auparavant, à une période où la mosaïque du manioc était peu importante. Ebwanateraka était cultivée dans de nombreuses régions d'Ouganda mais cette variété s'est avérée très sensible aux épidémies de mosaïque du manioc. Les pertes de récolte furent considérables. La croissance des plantes était tellement réduite qu'elles ne produisaient ni tubercules pour la consommation, ni boutures pour les plantations futures. Une vaste enquête réalisée entre 1990 et 2003 montre que des changements de cultivars ont été opérés. Près de vingt-cinq variétés sont maintenant cultivées dans des régions où Ebwanateraka prédominait. Certaines ont été sélectionnées pour leur résistance par les programmes d'amélioration du manioc. D'autres sont des variétés locales choisies par les agriculteurs en raison de leur résistance ou de leur tolérance. La production a ainsi été restaurée et la crise surmontée.

Dans de nombreuses régions à l'ouest ou au sud-ouest de l'Ouganda, la situation fut entièrement différente. De nombreuses variétés de manioc y sont cultivées et les agriculteurs en dépendent beaucoup moins. Lors de l'apparition des épidémies de mosaïque, les agriculteurs ont éliminé les variétés sérieusement atteintes tout en multipliant les moins affectées. Ils se sont ainsi rapidement adaptés à la maladie, sans aucune connaissance de la mosaïque et malgré l'absence d'appui technique. Cette épidémie est un des exemples les plus marquants des apports de la diversité génétique au contrôle d'une maladie végétale.



▲ Champ de manioc sain et feuille atteinte de la mosaïque du manioc.

▼ Champ ougandais détruit par la mosaïque du manioc.



ÉPIDÉMIE EN OUGANDA

Suite à l'épidémie de mosaïque du manioc en Ouganda dans les années 90, de nombreuses populations villageoises subirent des pertes totales de revenus. Des disettes apparurent et des décès, dus à la famine, furent signalés à des comités d'enquête gouvernementaux. Le manioc n'assurant plus son rôle de culture de soudure en cas de pénurie, la situation fut particulièrement difficile après la sécheresse de 1993-1994. En l'absence presque complète de manioc, les agriculteurs n'eurent pas d'autres possibilités que de se tourner vers d'autres cultures comme la patate douce. Les prix ont alors flambé. Devant la gravité de la situation, une aide alimentaire d'urgence fut mise en place et diverses organisations gouvernementales et non gouvernementales livrèrent des boutures de manioc résistant à la mosaïque.

■ LES PARASITES, DES ORGANISMES À NE PAS NÉGLIGER

Contrairement aux organismes libres, les parasites et les pathogènes ont rarement été considérés comme des acteurs du fonctionnement des écosystèmes. Pourtant, des études CNRS réalisées ces dernières années ont illustré un nombre insoupçonné de conséquences de leur influence sur l'écologie et l'évolution des populations-hôtes. Comme souvent en écologie, ces effets peuvent être dramatiquement amplifiés par des processus en cascades. Les parasites et les pathogènes peuvent ainsi totalement perturber les chaînes trophiques, les relations de compétition entre espèces ou encore le potentiel invasif de certaines d'entre elles. Le bouleversement de ces « équilibres » peut être favorable ou au contraire défavorable au maintien de la biodiversité.

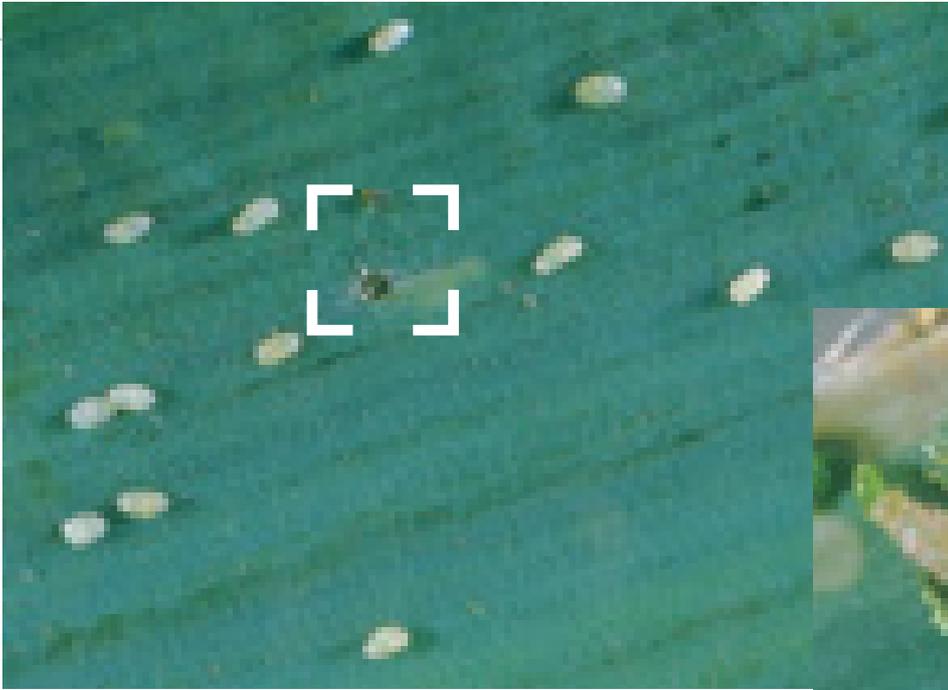
Les recherches scientifiques actuelles sur les conséquences du parasitisme dans les écosystèmes se déclinent le long d'un continuum allant de questions purement fondamentales sur les rôles du parasitisme dans l'écosystème à des thématiques plus appliquées visant par exemple à préciser l'influence des modes de gestion (usages agricoles, chasse, déforestation, réserves naturelles...) sur la dynamique des communautés parasitaires. Sachant que pratiquement tous les écosystèmes de la planète subissent à des degrés divers les conséquences d'activités humaines, il apparaît en effet crucial d'améliorer notre compréhension des interactions entre activités humaines, parasitisme et biodiversité. Ces recherches apportent donc à la fois des informations nouvelles pour une meilleure intégration de la composante parasitaire dans les programmes de conservation, ainsi que des bases fondatrices pour une discipline en plein essor, l'écologie de la santé.

Parmi les exemples de recherches fondamentales, l'identification des mécanismes par lesquels les parasites favorisent localement la biodiversité est une priorité du CNRS. Les processus impliqués sont aussi étonnants que diversifiés. Par exemple, en modifiant l'appétit de leurs herbivores hôtes, des nématodes du tube digestif peuvent indirectement affecter la structure des communautés végétales. Certains parasites des écosystèmes lagunaires empêchent les coquillages de s'enfouir sous le sédiment et contribuent ainsi à diversifier la nature des substrats possibles sur lesquels patelles, anémones, chitons et vers tubicoles se fixent. Cette diversification de l'habitat a pour conséquence de diminuer la compétition entre les invertébrés benthiques, ce qui en retour favorise leur coexistence.

► Cette coque, *Austrovenus stutchburyi* est parasitée par le trématode *Curtuteria australis* qui l'empêche de s'enfouir dans le sol. Cette modification de comportement permet à deux espèces d'invertébrés, la patelle *Notoacmea helmsi* et l'anémone *Anthopleura aureoradiata* de coexister dans ce milieu.

© CNRS Photothèque





◀ La teigne du poireau, *Acrolepiopsis assectella*, lépidoptère phytophage de la super-famille des *Yponomeutoidea*, s'attaque aux plantes du genre *Allium*, en particulier au poireau, *Allium porrum*. Répandue dans toute l'Europe, cette espèce provoque de gros dégâts dans les cultures. Au centre, on remarque un trou de pénétration de larve néonate avec le début d'une galerie.



© CNRS Photothèque / Laurence Médard

■ BIODIVERSITÉ, PARASITISME ET SANTÉ HUMAINE, UN ÉQUILIBRE FRAGILE

La prise en compte des parasites en biologie de la conservation prend actuellement une importance croissante, et ce au sein même des espaces bénéficiant de statuts de protection. Les parcs et les réserves constituent en effet des points chauds en termes de densité d'individus et de diversité d'espèces. Ces différences de concentrations d'animaux (donc d'hôtes) par rapport aux zones adjacentes ont des répercussions directes sur la dynamique des communautés de pathogènes et leur virulence, mais aussi indirectes sur les populations d'invertébrés proies. La quantification de ces phénomènes est importante à plusieurs titres. Par exemple, il est possible que les réserves naturelles soient, dans certains cas, des zones à hauts risques parasitaires pour les espèces qu'elles sont censées protéger, ou que les proies qu'elles offrent aux prédateurs soient moins profitables à cause du parasitisme. Il est par ailleurs envisageable que les concentrations animales dans ces zones puissent favoriser la transmission et la prolifération de pathogènes ayant un risque potentiel pour la santé humaine. Les passerelles entre biologie de la conservation et écologie de la santé sont alors évidentes.

Il est primordial, pour le CNRS, d'apporter dans les prochaines années des connaissances permettant de mettre en place une gestion des écosystèmes prenant en compte les risques de transmission de pathogènes aux populations humaines et animales. Cependant, afin que cette gestion soit également favorable au maintien de la biodiversité, il est essentiel que ces recherches soient menées en collaboration étroite entre biologistes, vétérinaires et gestionnaires de sites protégés. Malgré de nombreuses avancées théoriques dans le domaine, la mise en place d'études et de suivis à long terme sur les interactions entre activités humaines, gestion de la biodiversité et parasitisme sont plus que jamais de première importance pour comprendre et prévenir les problèmes en santé publique et vétérinaire.

▲ Larve de 5^e stade sur sa plante hôte. Il s'agit d'un mâle reconnaissable à ses testicules orange. Cette larve perce la feuille du poireau pour se nourrir et pour creuser une galerie dans laquelle elle se réfugiera.



© CNRS Photothèque / S. Merin, J.-P. Pailletier

▲ La mangrove dulçaquicole de Guadeloupe est depuis plus d'une vingtaine d'années le laboratoire naturel des équipes CNRS qui s'intéressent à l'écologie évolutive des systèmes hôtes-parasites. Dans cette forêt marécageuse en milieu insulaire, une conjonction de facteurs écologiques, comportementaux et démographiques a favorisé le passage d'un parasite humain (le schistosome) aux populations surabondantes de rats noirs (en haut). Bien que récent, ce phénomène a déjà conduit à des adaptations remarquables du parasite à ses nouveaux hôtes. L'analyse des co-structures génétiques des populations concernées (parasites, rongeurs, mollusques) permet également d'appréhender le fonctionnement dynamique de ces systèmes d'interactions complexes et d'envisager les méthodes de lutte les plus adaptées.

IMPACT SUR LA SANTÉ

Coordinateur : François Renaud
 unité « Génétique et évolution des maladies infectieuses », CNRS / Institut de recherche pour le développement (IRD)

Avec les contributions de :

- Benoît Cournoyer
 unité « Écologie microbienne », CNRS
- Jean-François Guégan et Benjamin Roche

unité « Génétique et évolution des maladies infectieuses », CNRS / IRD

■ Denis Fargette
 unité « Diversité et génomes des plantes cultivées », IRD

■ Frédéric Thomas et Camille Lebarbenchon
 unité « Génétique et évolution des maladies infectieuses » et Station biologique de la Tour du Valat, CNRS / IRD

LES HUMAINS SONT LA PRINCIPALE MENACE QUI PÈSE SUR LA BIODIVERSITÉ. ILS SONT PLUS DE DEUX FOIS PLUS NOMBREUX QU'IL Y A UN DEMI-SIÈCLE ET LEUR CONSOMMATION DE RESSOURCES NATURELLES EST SIX FOIS PLUS IMPORTANTE. CETTE ÉVOLUTION DES SOCIÉTÉS HUMAINES ENTRAÎNE UNE SUREXPLOITATION DES ESPÈCES ANIMALES ET VÉGÉTALES, DES POLLUTIONS ET UNE MODIFICATION DU CLIMAT. AU-DELÀ DES MODIFICATIONS QU'ILS INDUISENT PAR LEUR NOMBRE ET LEURS ACTIVITÉS, LES HUMAINS INTERVIENNENT AUSSI DIRECTEMENT SUR CERTAINS ÉCOSYSTÈMES AFIN DE RÉPONDRE À LEURS BESOINS. TOUS CES FACTEURS PÈSENT SUR LA BIODIVERSITÉ ET ENTRAÎNENT UNE EXTINCTION MASSIVE DES ESPÈCES.

■ LES INTERVENTIONS DES HUMAINS SUR LA BIODIVERSITÉ

La biodiversité est un élément essentiel de l'activité, de la nutrition et de la santé humaines. Les recherches appliquées qui traitent de la biodiversité peuvent avoir un impact majeur sur notre développement et sur sa durabilité. Leur intérêt à court terme n'est pas toujours évident et on peut leur préférer des recherches aboutissant à une amélioration rapide de notre production ou de notre santé. Cependant, du fait de l'importance de l'action humaine sur les espèces vivantes et des enjeux de durabilité de notre médecine et de notre agronomie, ces recherches sont porteuses, sur le moyen terme, de progrès d'une importance immense pour l'avenir de notre espèce.

■ L'IMPACT DE L'AGRICULTURE

Les agronomes ont toujours su que leur travail consistait à exploiter la biodiversité existante. Cependant, au cours du dernier siècle, nous avons assisté à l'éclosion d'une agronomie de moins en moins durable. Les recherches sur l'origine des plantes cultivées, base de toute l'alimentation humaine, ont montré qu'elles étaient issues d'un processus de domestication qui se faisait en interaction constante entre formes sauvages et cultivées. Les parents sauvages des variétés cultivées fournissent la diversité essentielle à l'adaptation des formes cultivées aux changements du milieu (et en particulier aux ravageurs et aux pathogènes). Il est clair que l'intensification de

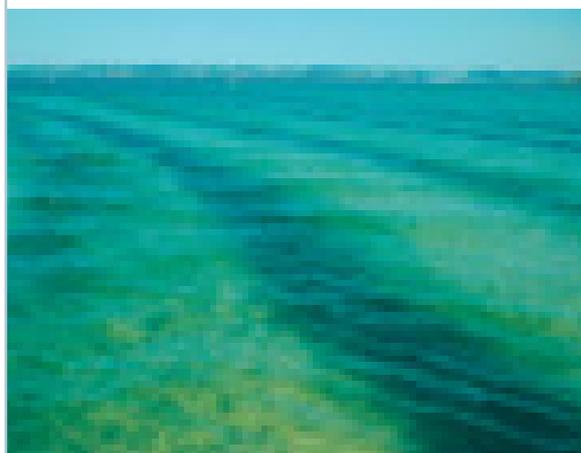
l'agriculture s'est faite au détriment de ces processus. Les généticiens des plantes continuent à aller puiser dans les formes sauvages les ressources génétiques qui permettent d'adapter les formes cultivées, mais l'entretien de cette diversité devient de plus en plus problématique. La seule solution actuellement mise en œuvre massivement consiste à congeler la diversité existante dans des banques de gènes. Des



© CNRS Photothèque / Yann Rannier

▲ Fonds marins au large du Frioul en 1970 (Baie de Marseille). Les océans et les mers servent de réceptacle pour les déchets des activités humaines.

► Marée verte dans la baie de Lannion. Chaque été, de nombreux estuaires et baies bretonnes sont envahis par l'algue *Ulva lactuca*. La prolifération de cette algue due à un enrichissement des eaux littorales en nitrates et phosphates est directement liée aux activités humaines (effluents d'élevage, lessivage des terres agricoles et eaux usées).



© CNRS Photothèque / Jean-Yves Pontailier

recherches pour une gestion dynamique de la diversité génétique, s'appuyant sur le milieu agricole lui-même et traitant l'agroécosystème dans son ensemble, sont en cours. Elles visent à remplacer une attitude d'exploitation non durable par une attitude de gestionnaire. Ces recherches, réalisées en partenariat entre le CNRS, l'Inra, l'IRD et le Cirad font apparaître, selon le mot d'un dirigeant de l'Inra, « l'agronomie comme une branche appliquée de l'écologie ».

BREVETER LE VIVANT

Les recherches ont montré que le pollen des plantes se disperse beaucoup plus loin que ce qu'on croyait. Bien sûr, si on se place à proximité d'un champ, on voit une rapide décroissance de la quantité de pollens provenant de ce champ dès qu'on s'en éloigne. Cependant, cette décroissance ne concerne que les pollens qui tombent rapidement.

D'autres, entraînés par les turbulences de l'atmosphère, se répartissent de façon quasi homogène sur l'ensemble de la couche turbulente – de 0 à 1 000 mètres d'altitude environ – et leur distance de migration ne dépend alors que de leur temps de survie. Outre les nombreuses conséquences agronomiques et économiques que ce phénomène entraîne, il est particulièrement important si on l'associe à la pratique des brevets pour les gènes des plantes, reconnue dans le monde entier sauf en Europe.

Récemment, un agriculteur canadien a été condamné parce qu'il semait des graines de colza, récoltées sur ses propres champs, qui contenaient des gènes brevetés par une firme agrochimique.

Ces gènes étaient arrivés sous forme de graines ou de pollen dans les champs de l'agriculteur. Il ne les avait pas volés, mais les gènes étaient brevetés. Il était ainsi interdit à l'agriculteur de continuer à utiliser ses propres semences. De procès en appel, la Cour suprême canadienne a finalement donné raison à la firme. On voit que la migration du pollen et des graines, alliée à la législation américaine sur les brevets, peut permettre aux entreprises de biotechnologies de s'approprier toutes les ressources génétiques de la planète. Il leur suffit de breveter des gènes, de cultiver des plantes qui les contiennent et de laisser le vent faire le reste. Une telle perspective ouvre la possibilité d'une perte massive de diversité génétique parmi les organismes qui sont les plus précieux pour les humains : les plantes à la base de leur alimentation.

◀ Ce grain de pollen de pin présente une morphologie propice à sa dispersion par le vent.



© Eye of Science/Cosmos

■ LES OGM, DES PRÉCAUTIONS À PRENDRE

Le besoin de diversité dans les formes cultivées a conduit à une solution technique audacieuse : aller chercher dans l'ensemble du monde vivant, et non plus dans les seules espèces proches, les gènes qui peuvent permettre d'améliorer une espèce domestique. La recherche dans le domaine de la transgénèse a été très active et a très rapidement conduit à la production d'OGM qui peuvent permettre certains progrès agricoles. Malheureusement, cette démarche n'a pas inclus de réflexion d'ensemble sur la diversité des plantes cultivées et de leurs apparentés sauvages. Ajouter un gène provenant d'une bactérie dans une plante pour tuer les insectes qui attaquent la plante peut certainement être utile à l'agriculture, et permettre de lutter contre les ravageurs en respectant les autres espèces. De même, rendre une espèce résistante à un herbicide peut permettre de désherber les cultures en utilisant des molécules toxiques avec parcimonie. Les recherches sur les impacts de ces pratiques, réalisées en commun entre le CNRS et l'Inra, ont montré cependant que certaines précautions



▲ Plan de tomate génétiquement modifié.

© CNRS Photothèque / Nathalie Mansion

devaient être prises. D'une part, il serait irresponsable de rendre toutes les espèces de plantes résistantes à tous les herbicides. Ceci créerait une situation inextricable du point de vue de la gestion des repousses d'une culture dans une autre. D'autre part, il faut éviter que les croisements entre plantes cultivées et sauvages n'aboutissent à produire des super-mauvaises herbes résistantes. Enfin, il semble déraisonnable d'introduire la même résistance aux insectes dans toutes les plantes. De même que les bactéries sont devenues résistantes aux antibiotiques, une telle démarche conduirait à coup sûr à une résistance généralisée des insectes.

■ LA CHIMIODIVERSITÉ, UN PUZZLE COMPLEXE

La pollution chimique contamine l'ensemble des chaînes trophiques. Plus de 100 000 substances différentes sont produites en Europe. On en connaît peu les effets individuels et encore moins les effets synergiques ou antagonistes. La plupart de ces substances ou leurs produits de dégradation se retrouvent dans l'environnement. Ce sont des milliers de molécules qu'il faudrait suivre et surveiller. Le développement de nouvelles méthodes d'analyse permet aujourd'hui de détecter des espèces chimiques à très faible concentration et d'identifier de nouvelles molécules susceptibles d'avoir des effets biologiques et pour lesquelles il n'existe pas encore de réglementation. Si les années 70 ont vu la prise de conscience de la

pollution industrielle, les années 80 la prise de conscience de la pollution agricole à travers l'utilisation à la fois des engrais et des produits phytosanitaires, les années 2000 ont vu l'émergence de l'intérêt pour de nouveaux produits dont la présence est essentiellement due à une utilisation individuelle. Ces « nouvelles classes » de produits chimiques comprennent des agents plastifiants, des détergents, des produits pharmaceutiques et de soin corporel, des composés estrogènes naturels ou synthétiques (pilules contraceptives) et des pesticides à formulation récente. Divers effets cancérigènes, mutagènes, immunosuppresseurs et neurotoxiques sont associés à ces composés chimiques.

Le règlement Reach est une avancée majeure en matière de sécurité et de sûreté chimique pour la santé et l'environnement. À l'avenir, les produits chimiques seront autorisés uniquement s'ils n'ont pas d'effet toxique, ou dans des conditions particulières s'ils sont dangereux mais indispensables. Les industriels devront fournir les preuves toxicologiques de l'innocuité de leurs produits. Plus de 30 000 substances produites ou importées dans l'Union européenne feront l'objet d'analyses et d'enregistrements sur une période de onze ans.

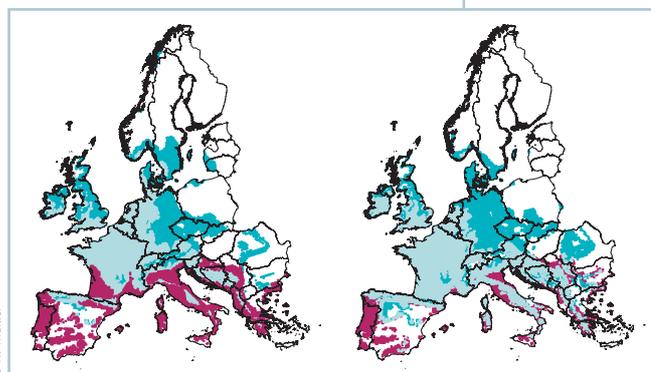
À terme, Reach a pour but d'encourager l'abandon des substances chimiques extrêmement préoccupantes et leur remplacement par des substances alternatives appropriées et plus sûres. Cette réglementation stimulera la compétitivité de l'industrie chimique européenne en encourageant l'innovation (chimie verte, tests toxicologiques) au lieu de la freiner comme dans les précédentes législations et en fixant des règles qui feront d'elle un exemple mondial d'une production chimique durable.

■ BIODIVERSITÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Outre les interventions directes des humains sur certains écosystèmes, la combustion des hydrocarbures et du charbon due à leurs activités a entraîné, depuis 1950, l'augmentation foudroyante de la concentration en gaz à effet de serre. Depuis, la température moyenne de la surface du globe a grimpé de 0,6 °C. Les modèles prévoient, pour la fin du XXI^e siècle et à l'échelle de la planète, des niveaux moyens de réchauffement de 1,5 °C à 5,8 °C.



▲ Dispositif d'ozonation catalytique pour la dégradation d'un polluant en solution aqueuse dans un réacteur de laboratoire. L'objectif de la recherche est l'étude des mécanismes réactionnels d'ozonation catalytique de molécules modèles et la mise au point de procédés de dépollution de l'eau.



▲ Prévisions pessimiste (gauche) et optimiste (droite) du déplacement de l'aire de distribution du châtaignier en 2080 (rouge : disparition ; bleu : colonisation).

► Plantes composant la restinga, formation végétale typique des dunes littorales brésiliennes (Ilha do Mel, Brésil). La baie de Paranaguá se situe à une limite biogéographique très marquée de l'Amérique du Sud (côte atlantique) puisqu'elle sépare le domaine tropical du domaine subtropical et qu'elle abrite des espèces et des formations végétales des deux domaines. Un éventuel changement climatique de grande ampleur se traduirait par l'extension ou la régression de la végétation appartenant à l'un des deux domaines.



© CNRS Photothèque / Jérôme Fournier

Ce réchauffement a un fort impact sur la biodiversité dont il entraîne une réorganisation. Par exemple, parmi les 95 espèces de passereaux les plus communes, les plus en déclin sont septentrionales. Cette tendance a été confirmée lors de la canicule de 2003. Les projections les plus pessimistes annoncent qu'en 2050, 35 % des espèces vivantes auront probablement disparu, le réchauffement se surajoutant aux trois autres grands facteurs d'extinction : la dégradation des milieux, les invasions biologiques et la surexploitation par les humains.

Réciproquement, la biodiversité contribue fortement à l'absorption des émissions anthropiques de carbone et ralentit ainsi les changements climatiques en cours. Plus la biodiversité est importante et plus la biomasse est importante. La biodiversité et le changement climatique sont donc liés. L'évolution de la biodiversité pourra entraîner une accélération ou un ralentissement des changements climatiques à venir.

■ DES DÉPLACEMENTS PAS TOUJOURS ÉVIDENTS

Au-delà de la réorganisation des communautés, l'impact du réchauffement sur la diversité des espèces pourrait être aggravé par la réduction de leurs aires de distribution. Le nombre d'espèces susceptibles de disparaître varie du simple au double si la migration des individus vers leurs nouvelles aires de distribution s'avère impossible. Les observatoires de biodiversité soulèvent l'existence de réelles difficultés de migration. Les espèces spécialistes – inféodées à un type particulier d'habitat – déclinent de manière plus marquée.



© CNRS Photothèque / Alain Pevé

▲ Vue d'un éboulement consécutif au ruissellement en Inde du sud. Les sols non protégés dénudés après la destruction du couvert forestier sont particulièrement sensibles à ce phénomène.



© CNRS Photothèque / Xavier Arnaud de Sartre

▲ Vue aérienne de la route transamazonienne. Parfaitement rectiligne, sauf à la traversée d'un ruisseau (milieu), cette route a été tracée dans les bureaux de l'administration militaire pour occuper de façon rationnelle l'Amazonie.

Elle n'est asphaltée que sur de petits tronçons. Parallèle à cette route, une ligne haute tension (visible par le déboisement sous la ligne) dessert les principales villes et exporte l'hydroélectricité produite dans la région.

Ces déplacements sont très perturbés par la gestion du territoire par les humains. La pression de l'homme fragmente les habitats naturels. Une espèce dont le potentiel démographique diminue en raison de la dégradation de son milieu par les activités humaines – expansion des villes, construction de routes ou d'autoroutes, mise en place de structures interdisant le passage des individus migrateurs... – s'éteindra d'autant plus facilement que les conditions climatiques ne seront plus propices à sa survie.

L'adaptation à de nouvelles conditions climatiques pourrait être une réponse alternative des espèces à cette réduction d'aire ou aux difficultés de migration. La diversité intraspécifique serait alors une composante majeure de la biodiversité car elle détermine la pérennité des processus adaptatifs dans un contexte de modifications climatiques rapides.

■ LA BIOLOGIE DE L'EXTINCTION, UN CERCLE VICIEUX

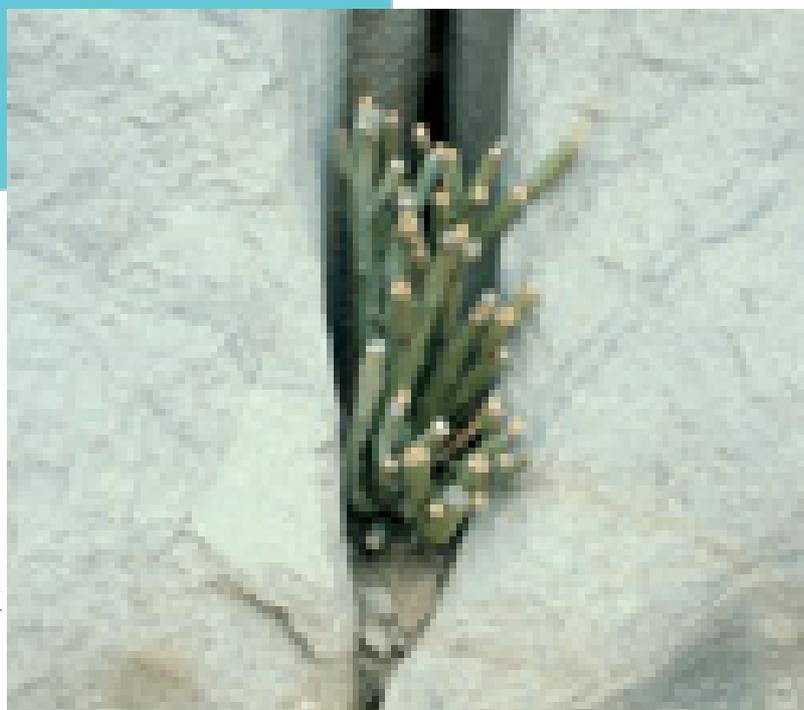
Les humains sont la principale menace qui pèse sur la biodiversité. La dégradation des habitats réduit l'aire de répartition possible des espèces qui, confinées en limite de leur aire, voient leurs effectifs diminuer. Dès lors, les espèces peuvent être prises dans une spirale qui mène vers leur extinction.

En plus des pressions extérieures, lorsque le déclin démographique d'une population est amorcé, des processus dus au hasard peuvent entrer en jeu et précipiter cette espèce vers l'extinction. Les plus petites populations de cette espèce sont touchées par des effets démographiques, génétiques et environnementaux. Le taux de survie d'une population est directement lié au nombre d'individus qui la composent. Les plus petites populations ont une probabilité beaucoup plus importante de disparaître. Intuitivement, on comprend qu'une population de deux individus a beaucoup plus de chances de disparaître qu'une population de cinquante individus. La probabilité que les deux individus de la petite population meurent est plus grande que la probabilité que les cinquante individus de la grande population disparaissent.

Plus encore qu'à cet effet démographique, une population de petite taille est confrontée à des effets génétiques néfastes pour sa survie. À l'échelle d'une population, le nombre de copies différentes d'un gène – le nombre d'allèles – diminue constamment à la mutation près. Certains allèles ne sont pas transmis aux descendants. Ce phénomène est appelé dérive génétique. Cette dérive génétique appauvrit le potentiel évolutif de la population mais, dans le cas où un allèle moins favorable à la survie ou à la fécondité de l'individu serait transmis, elle peut diminuer la valeur sélective moyenne de la population. Si cet allèle se fixe dans la population et que ses effets sont trop faibles pour que la sélection naturelle puisse l'éliminer rapidement, on assiste à une dépression de consanguinité.

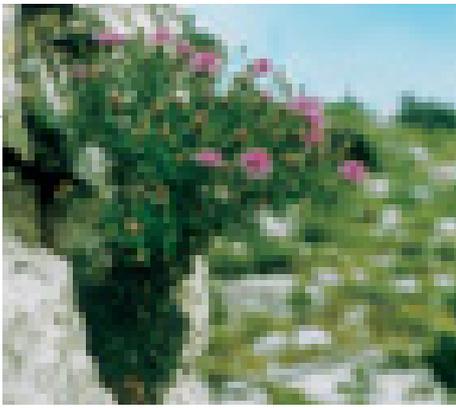
■ ÉVOLUER VERS L'EXTINCTION

La dégradation des habitats est responsable de l'extinction de nombreuses populations, mais une espèce peut s'adapter à son nouvel environnement même dégradé ou partiellement détruit si son potentiel évolutif est suffisant. Elle peut coloniser de nouveaux sites, acquérir une tolérance à une pollution, un nouveau



© CNRS Photothèque / Alain R. Deveze

▲ Désert du Namib. Cette succulente, l'euphorbe, pousse dans les fentes des rochers de Swartzbank. Cet inselberg granitique capte les brouillards provenant de l'océan (situé à vingt kilomètres) et alimente en eau cette végétation adaptée aux contraintes climatiques extrêmes.



© CNRS Photothèque / Bruno Colas

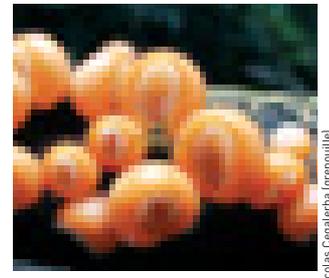
comportement... Il existe pourtant des cas où une espèce n'a pas une capacité suffisante à s'adapter. Elle peut par exemple être trop bien adaptée à son milieu. L'aire de répartition d'une espèce peut être limitée par l'absence de milieux favorables mais aussi par la faible capacité de dispersion de l'espèce. D'ailleurs, l'absence de milieu favorable

est elle-même liée aux exigences écologiques de l'espèce et donc à son degré de spécialisation. Lorsqu'il y a peu de milieux favorables, les gènes conférant une moins grande aptitude à la dispersion sont sélectionnés. Ce phénomène peut être illustré par la répartition de *Centaurea corymbosa*, une plante endémique du massif de la Clape (Hérault). Cette espèce est composée de six populations et son aire de répartition est limitée à dix kilomètres carrés.

◀ La Centaurée de la Clape (*Centaurea corymbosa*) est une plante monocarpique protégée présente uniquement dans le massif de la Clape (Aude).

■ L'AMAZONIE

La diversité biologique amazonienne est essentiellement menacée par l'action des humains pour toutes les raisons que nous venons d'évoquer et, en particulier, par la déforestation pour la recherche de nouvelles terres agricoles et d'élevage. Cette dynamique est mondiale et s'inscrit dans le long terme. En effet, la croissance démographique des populations humaines et donc l'augmentation des besoins alimentaires, ainsi que la nécessité de promouvoir des pratiques agricoles nouvelles, moins menaçantes pour l'environnement et la santé humaine, impliquent l'exploitation de nouveaux espaces. Dans cinquante ans, 30 à 50 % de la forêt amazonienne auront disparu ou seront fortement artificialisés. Nous savons déjà que cette transformation s'accompagnera inévitablement d'une diminution de la biodiversité.



© CNRS Photothèque / P. Charles-Dominique et Nicolas Cegalerba (grenouille)



© CNRS Photothèque / Hervé Thery

▲ Atelope de Guyane, *Atelopus franciscus*; champignons; chauve-souris frugivore *Artibeus gnomus*; boa arc-en-ciel. L'Amazonie et les autres forêts tapissent 7 % de l'épiderme terrestre et abriteraient plus de la moitié des espèces vivantes.

◀ Brûlis pour le nettoyage des pâturages près de Redenção au Brésil.

LA BIODIVERSITÉ EN DANGER

Coordinateur : Pierre-Henri Gouyon

Avec les contributions de :

- Denis Couvet
unité « Conservation des espèces, restauration et suivi des populations », CNRS / Muséum national d'histoire naturelle / université Paris 6
- Isabelle Olivieri

Institut des sciences de l'évolution, CNRS / université Montpellier 2

- Alain Pavé
unité « CNRS Guyane », CNRS
- Philippe Garrigues
Laboratoire de physico-toxicochimie des systèmes naturels (LPTC), CNRS / université Bordeaux 1

LES ÉTATS SIGNATAIRES DE LA CONVENTION DE RIO SUR LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE ONT DÉCIDÉ DE STOPPER L'ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ EN 2010. ON SAIT DÉJÀ QUE NOUS EN SERONS TRÈS LOIN ET IL RESTE BIEN DES PROGRÈS À ACCOMPLIR DANS LA GESTION DE LA BIODIVERSITÉ. GÉRER LA NATURE REVIENT À COMPRENDRE ET ORIENTER LES RELATIONS ENTRE HUMAINS À PROPOS DES NON HUMAINS, DOMESTIQUES ET SAUVAGES. IL FAUT DONC OBSERVER, MODÉLISER, DÉVELOPPER DES TECHNOLOGIES ET UNE INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET METTRE EN ŒUVRE DE MULTIPLES INSTRUMENTS, DE L'ÉCHELLE LOCALE À L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE.



© CNRS Photothèque

▲ et ► Selon les cultures, les humains ont des rapports très différents avec la nature. À gauche : le campus de Jussieu vu de la tour administrative, laissant apparaître un coin de nature, quelques talus couverts d'une végétation sauvage de composées. À droite : enfants Pygmées Aka faisant la lessive dans un marigot. République centrafricaine.

■ DES RELATIONS ENTRE LES HUMAINS À PROPOS DES NON HUMAINS

Un mot nouveau est baptisé à Rio de Janeiro en 1992, bien que né plus tôt, et dans le moindre village du bout du monde, les paysans sont priés de changer leur façon de voir le monde. Ils y sont invités par des agents de l'administration ou d'ONG qui eux-

mêmes ne comprennent pas bien de quoi il s'agit et développent un discours sur la préservation de la « nature ». Mais chaque société a sa nature, et celle des Pygmées n'est pas celle des Savoyards et encore moins celle des Parisiens. Pourtant, la préoccupation pour le maintien de la diversité du vivant se fait universelle et renvoie à l'idée qu'une vie étriquée dans ses formes ne serait plus vraiment la vie. Les perceptions sont au fondement de toute gestion de la biodiversité. La gestion de la biodiversité est

celle des relations entre humains à propos de la nature. Comment en coordonner les intérêts et les activités ? Il revient aux scientifiques d'éclairer les choix et les processus de décision.

Le seul inventaire des formes de vie suppose un effort considérable et de longue durée de l'ensemble des communautés taxonomiques du monde. Il est pourtant indispensable à la compréhension des interactions entre ces formes de vie dans l'espace et le temps. La tâche est immense et pose déjà des problèmes de gestion, d'analyse et de mise à disposition des données. Plusieurs programmes scientifiques internationaux s'en occupent : le GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*), le GTI (*Global Taxonomy Initiative*) et d'autres au niveau européen.

Des interactions entre organismes et milieux naissent les fonctions que remplissent les écosystèmes et dont les humains dépendent et tirent parti : recyclage de l'atmosphère, filtrage des eaux, fertilité, pollinisation... La gestion de la biodiversité est essentielle à la préservation de ces fonctions écosystémiques.

Le poids de ces fonctions dans la vie économique et sociale est mal connu et considérablement sous-estimé. La biodiversité, source de matières premières, de technologies, de produits, donc de profits, représente de 20 à 90 % du chiffre d'affaires des entreprises, selon les branches d'activité. Une « comptabilité vivante » est à concevoir, qui restituerait l'activité des entreprises dans ses relations à la dynamique



© CNRS Photothèque / Alain Epelboin



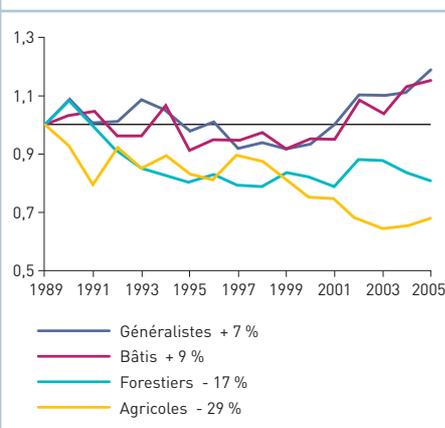
© CNRS Photothèque / Colin Fontaine

▲ *Bombus terrestris* sur *Mimulus guttatus*. La pollinisation des champs, essentielle à leur pérennité, est l'une des fonctions que remplissent les écosystèmes et dont les humains dépendent.

du monde vivant. Loin d'une telle comptabilité, certains scientifiques ont pensé que donner un prix à la nature mènerait à une meilleure gestion. La seule évaluation du coût de la substitution de ces fonctions naturelles par des solutions techniques suffit généralement à démontrer l'intérêt de les préserver. L'un des exemples souvent cité est celui de la fourniture d'eau potable à New York, qui a montré que l'épuration naturelle par les collines était plus efficace et bien moins coûteuse que par une usine de traitement des eaux.

La gestion de la biodiversité doit reposer sur des systèmes d'observation à long terme permettant de construire des indicateurs. Ces derniers sont les instruments du dialogue entre gestionnaires, société civile et scientifiques, pour décider des objectifs et des moyens de la gestion. Ainsi le suivi des populations d'oiseaux communs renseigne-t-il sur les changements d'usage des terres et les évolutions des habitats humains. La modélisation, en rapide développement, s'avère indispensable à la compréhension du monde vivant sur la base d'une information incomplète et à la mise en évidence des systèmes dynamiques d'interactions entre organismes et milieu, comme entre ceux-ci et les sociétés.

▼ Variations en France de l'abondance des oiseaux, selon leur habitat spécifique (statistiques établies à partir de l'observation de plus de 300 000 oiseaux). L'indicateur « oiseaux communs » suggère un déclin particulièrement important de la biodiversité dans les espaces agricoles.



OBSERVATOIRES ET INDICATEURS

Observatoires de biodiversité : logique et premiers résultats

On manque d'observatoires de la biodiversité qui recueilleraient sur l'ensemble de l'espace, à l'image de ce qui se fait en sciences de l'Univers, des informations quantifiées sur l'état général de la biodiversité.

L'expérience la plus aboutie concerne les observatoires des oiseaux communs, en place aux États-Unis depuis cinquante ans, et en France depuis quinze ans. Ils indiquent une réduction de l'ordre de 1 % d'oiseaux par an, soit une diminution de plus d'un million d'oiseaux par an en France. Ce déclin important, car généralisé sur l'ensemble des écosystèmes de l'hémisphère Nord, ne peut être démontré de manière irréfutable que par une multiplication des points d'observation (10 000 points par an en France), étant donné sa faible intensité annuelle.

Les observatoires des papillons, en place en Europe du Nord depuis vingt-cinq ans, constatent, au-delà d'un déclin sévère des effectifs, une réorganisation des communautés, au bénéfice des espèces généralistes et méridionales (ceci est aussi observé chez les oiseaux).

En ce qui concerne les plantes, un suivi sur soixante ans dans l'état du Wisconsin (États-Unis) révèle un déclin élevé de la diversité végétale dans les espaces protégés (-50 % en diversité spécifique contre -10 % dans les espaces ordinaires), qui serait dû à la prolifération des herbivores dans ces espaces.

Des observatoires aux indicateurs

Les résultats apportés par ces observatoires de biodiversité documentent des indicateurs, outils indispensables à la gestion de la biodiversité, en permettant le dialogue entre les gestionnaires au sens large, incluant les politiques, le grand public et, selon les sujets, agriculteurs, chasseurs, industriels...

En effet les indicateurs, au-delà de la description synthétique de l'état de la biodiversité, permettent de hiérarchiser les pressions qui s'exercent sur cette biodiversité et l'efficacité des mesures qui sont prises pour sa conservation.

■ QUELLE GOUVERNANCE ? QUELS OUTILS POUR LA GESTION ?

La loi et le règlement sont les outils qui, les premiers, viennent en tête. Ils sont d'importance, à condition de se rappeler qu'ils sont coûteux à mettre en œuvre et à contrôler. Pour la société, ils sont indispensables lorsque leur rôle est de définir des règles globales du jeu, beaucoup moins lorsqu'ils entrent en détail dans les modalités locales de gestion.

Les aires protégées jouent un rôle important dans la gestion de la biodiversité, en mettant des surfaces à l'abri des prélèvements. Elles représentent environ 10 % des terres et moins de 0,5 % des océans. Elles constituent l'un des outils de gestion de la

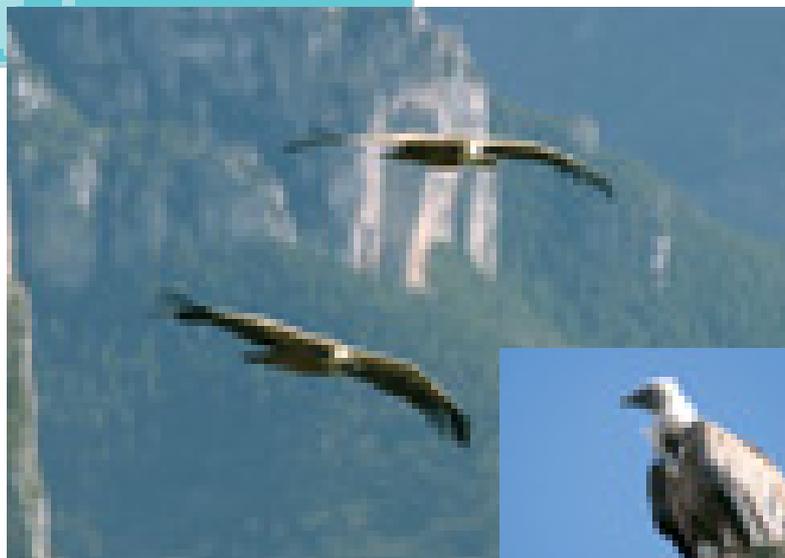
biodiversité, et sont elles-mêmes diverses, allant de la réserve intégrale à la réserve de biosphère, concept de l'Unesco destiné à promouvoir la conciliation entre conservation et développement. La récente Loi sur les parcs nationaux (14 avril 2006) est venue accorder la gestion des parcs avec l'état des connaissances sur la dynamique de la biodiversité. Elle prend notamment en compte l'adéquation des surfaces aux contraintes de conservation et la nécessité de corridors écologiques. Les Parcs naturels régionaux (PNR), gérés par les élus, se rapprochent du concept de réserve de biosphère de l'Unesco.

Les contrats sont très présents entre acteurs privés et collectifs, notamment dans le cas de la bioprospection. Ils sont supposés régler l'accès aux ressources et le partage des avantages. Assez rapidement, ces contrats butent sur l'absence de droits de propriété sur les ressources de la part des communautés humaines dont le territoire détient les ressources vivantes. Les économistes en viennent donc à préconiser l'établissement de droits de propriété clairement établis, qu'ils soient de type privé, collectif ou étatique. Ils suggèrent également de séparer clairement les droits d'accès et les droits d'usages, considérant que toute réglementation des usages est vaine en l'absence d'un contrôle de l'accès. La surexploitation des ressources halieutiques en est l'illustration : en dépit de réglementations multiples, l'absence de contrôle de l'accès aux ressources en est la cause.

La panoplie des outils est riche mais son efficacité dépend de la clarté des objectifs et des moyens déployés pour en contrôler la mise en œuvre. Avec un triste constat : on ne connaît pas une mesure de gestion qui n'ait pas été contournée par les usagers. La panoplie peut limiter les quantités prélevées (quotas), limiter le nombre des usagers (licences) ou mettre en marché des droits d'accès et d'usage (permis négociables ou marchés de droits).

La gestion de la biodiversité est une gestion de conflits d'intérêts ou de culture. Les avatars de la réintroduction des ours dans les Pyrénées l'illustrent. Les sciences sociales ont développé des méthodes de médiation permettant d'accompagner le dialogue entre parties en conflit et l'émergence d'objectifs communs à long terme. Certaines de ces approches reposent sur le recours à des jeux de rôle et à la modélisation.

Il s'agit, dans tous les cas, de permettre aux parties prenantes à la décision de se donner une représentation commune des écosystèmes à gérer, et de construire une expertise à la disposition des processus de décision.



© CNRS Photothèque / François Sarrazin



▲ Vautours fauves *Gyps fulvus*. Ces vautours ont été réintroduits dans la région des gorges du Tarn et de la Jonte, sur le Causse Méjean au début des années 80. Ce programme de conservation est géré et suivi localement par la Ligue pour la protection des oiseaux et le Parc national des Cévennes.

BIODIVERSITÉ ET CONTRATS

L'analyse des contrats de bioprospection, d'extraction de ressources naturelles non renouvelables et d'accès aux innovations biotechnologiques du Nord est au cœur des recherches sur la biodiversité en sciences sociales. Ces contrats doivent prendre en compte les interactions et les conflits entre acteurs divers. Pour limiter les conflits, les chercheurs proposent de définir et de mettre en œuvre des droits de propriété. Cette étape est cruciale car, quand les Anglo-Saxons préconisent la propriété privée comme modèle unique de gestion, les travaux développés en France cherchent des modèles alternatifs de propriété : propriété commune, distinction des droits d'accès et des droits d'usage, gestion collective de la propriété intellectuelle... Ces alternatives ont pour objectif d'améliorer l'efficacité économique, sociale et environnementale des contrats associés à des projets de développement et de faciliter l'accès tant aux ressources naturelles pour les firmes qu'aux innovations (pharmaceutiques et agricoles) pour les populations les plus pauvres.



▲ Repiquage de plantules germées en serre de *Senecio inaequidens*, sénéçon du Cap, dans une expérimentation menée à Montpellier. Cette plante est native d'Afrique du Sud et est parvenue en Europe à la fin du XIX^e siècle dans les soutes de bateaux chargés de laine de mouton. Une expérimentation menée à Montpellier a pour but de déterminer les conséquences évolutives de l'invasion en Europe de cette espèce envahissante.

■ LA GOUVERNANCE INTERNATIONALE

La gestion de la biodiversité est aussi un enjeu international, qui a donné lieu à la mise sur pied de conventions et de mécanismes internationaux d'expertise. La Convention internationale sur la diversité biologique (CDB) de 1992 a été ratifiée par 188 États. Elle a réussi, en quatorze ans, à mettre ces États d'accord sur une façon commune de poser les problèmes, ce qui est un résultat remarquable. Elle sert de référence à toute réflexion sur la gestion de la biodiversité. Parallèlement existent d'autres conventions spécialisées sur les zones humides (Ramsar), la désertification et la biosécurité.

Le rôle de la science dans l'établissement de cette gouvernance mondiale est considérable. Le programme mondial Diversitas exerce une grande influence sur les « organes subsidiaires scientifiques » des conventions. Les scientifiques apportent des résultats contre-intuitifs qui orientent et orienteront les débats internationaux. Ainsi en va-t-il de la gestion de l'un des problèmes les plus importants en biodiversité : les invasions biologiques. Les solutions sont à la fois nationales – meilleure planification de l'usage des terres, moindre fragmentation – et internationales. En effet les espèces envahissantes circulent généralement par le commerce international, comme les crepidules (*Crepidula fornicata*), venues par les ballasts des navires marchands et qui parasitent les huîtres, ou la chrysmèle du maïs venue par les aéroports. On estime que 10 % des introductions réussissent et que 10 % de ces succès deviennent des problèmes. Des recherches tentent de mettre au point des diagnostics de fragilité des écosystèmes et des méthodes de contrôle des invasions biologiques.

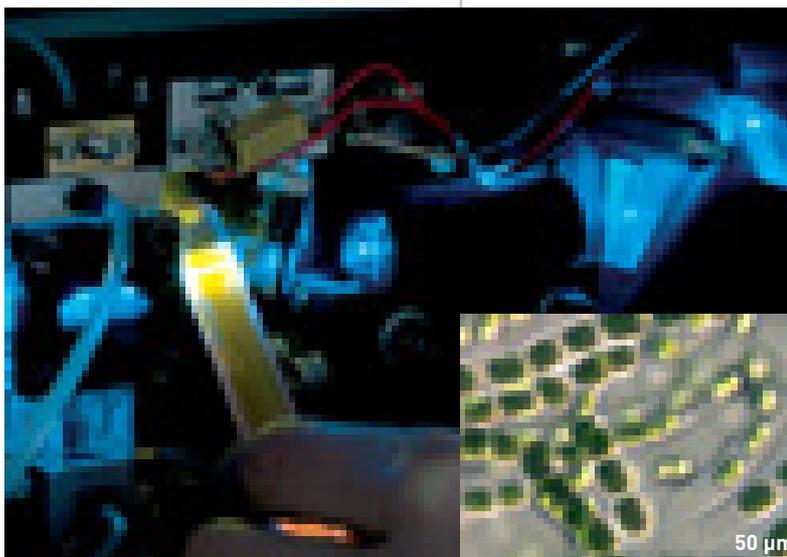
■ L'URGENCE D'UNE EXPERTISE RECONNUE

Les décideurs, politiques, administrateurs et industriels ont pris conscience de l'importance de l'enjeu « biodiversité », c'est-à-dire du maintien de la vie sur Terre. Ils souhaitent agir, mais ne savent comment, et sont en recherche d'une expertise établie, reconnue.

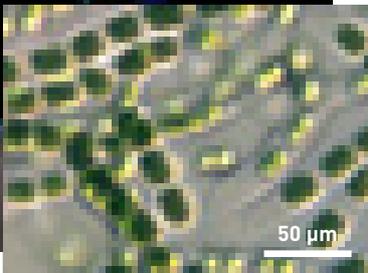
Pour une part, il s'agit de promouvoir l'émergence d'une ingénierie écologique professionnalisée. Basée sur les avancées en écologie fondamentale et théorique, celle-ci aura pour enjeu d'élaborer les outils nécessaires à la résolution de problèmes d'environnement et l'invention de systèmes adaptatifs et auto-entretenus. Il s'agit d'apprendre à orienter ou rétablir des fonctions d'écosystèmes, de savoir restaurer des écosystèmes dégradés, de construire des écosystèmes adaptés à la survie d'espèces menacées... Une telle ingénierie écologique devra s'appuyer sur des plateformes expérimentales en conditions contrôlées, sur des développements en modéli-

sation mais aussi mener des expériences sur des écosystèmes réels. Souvenons-nous que la gestion a des bases techniques, mais qu'elle revient à coordonner des actions humaines souvent conflictuelles. L'ingénierie écologique devra aussi s'appuyer sur les compétences des sciences sociales. Elle sera interdisciplinaire pour être crédible.

Au plan international, plusieurs mécanismes d'expertise sont en cours, dont le plus célèbre est le *Millenium Ecosystem Assessment*, disponible sur internet. Les résultats de ce travail de 1320 experts à travers le monde, dont une dizaine de Français, sont très étudiés par les instances publiques et privées de décision. Une consultation internationale est également en cours pour définir les contours d'un mécanisme international d'expertise au service de la décision publique et privée. Cette consultation est le résultat de la conférence « Biodiversité, science et gouvernance », qui a réuni 1500 participants à Paris en janvier 2005. Cette conférence a fait le point des connaissances et des ignorances et invité à un urgent raccourcissement des délais entre connaissance et décision.



▲ À gauche : cytométrie en flux. Cet appareil sert à déterminer l'abondance et les caractéristiques des cellules du phytoplancton grâce à leurs propriétés de fluorescence. Démonstration de la fluorescence à l'aide de solutions colorées. À droite : *Chroodactylon ramnosum*.

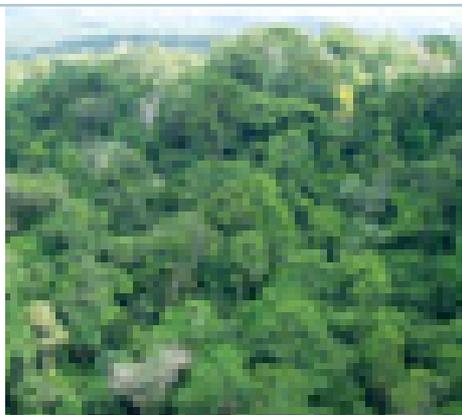
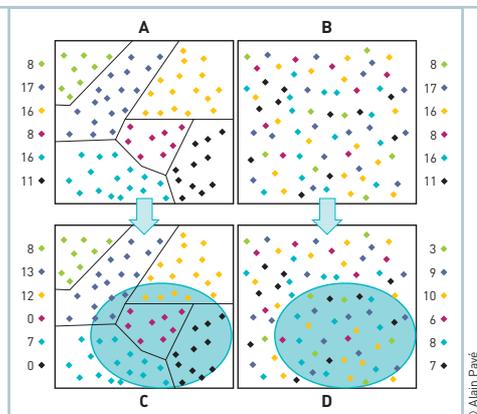


■ UN ENJEU DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

La gestion de la biodiversité a des implications lourdes sur le devenir des sociétés. La disparition de nombreuses espèces modifie le cadre de vie, le fragilise. Ainsi, la perte de diversité microbienne sélectionne des souches pathogènes très résistantes ; la diminution de la diversité rend les écosystèmes plus fragiles face aux invasions biologiques ; la déforestation, la concentration des propriétés, dans les pays tropicaux, rejettent les pauvres sur des terres marginales, avec des droits d'usage précaires. Pauvreté, biodiversité et développement durable sont en relation étroite. Gérer la biodiversité, conserver un potentiel évolutif, c'est aussi conserver les options ouvertes pour l'avenir de l'humanité.

■ L'EXEMPLE DE LA GESTION DE LA BIODIVERSITÉ AMAZONIENNE

L'Amazonie évoque la forêt, l'« enfer-vert » ou la « forêt d'émeraude » suivant les sensibilités. On mentionne aussi le fleuve, le plus grand réseau hydrographique, qu'on découple le plus souvent de la forêt. Certes, l'Amazonie est couverte en grande partie par une forêt, la plus grande du monde avec la forêt sibérienne. Mais l'Amazonie c'est aussi des villes et villages formant un habitat très dispersé sur une immense superficie, des sociétés humaines très nombreuses et diverses – rien qu'en Guyane une dizaine de langues sont parlées –, une grande biodiversité (non seulement terrestre mais aussi aquatique), source potentielle de richesses quelquefois surévaluées, une étroite interdépendance entre fleuves et forêts, des savanes, un littoral comportant de larges zones humides, un système insulaire fluvial, un socle parmi les plus anciens du monde (socle protérozoïque, voire archéen, du plateau des Guyanes), des ressources minérales, un climat intertropical humide, avec une forte influence maritime atlantique qui se fait sentir jusqu'au massif andin.



▲ Troupeaux de moutons et de chèvres menés à l'estive par des nomades du Rupshu, Est du Ladakh, Inde du Nord.

◀ Modèles de distribution des arbres en forêt tropicale et sensibilité à des perturbations environnementales. Les arbres sont repérés par des points de couleur. Chaque couleur correspond à une espèce. En pratique, on rencontre dans l'immense majorité des cas une distribution de type B (ou bien les individus se répartissent au hasard, ou bien ce sont des petits groupes, mais alors ces groupes, à plus grande échelle, sont aussi répartis de façon aléatoire). C'est du hasard, mais ce n'est pas par hasard. Cette distribution assure le maintien du maximum d'espèces et donc de la biodiversité, malgré une perturbation majeure (D).

Quelle est l'importance de ce système dans les grandes dynamiques planétaires ? Quel rôle joue la biodiversité ? Comment a-t-elle évolué ? Comment se maintient-elle spontanément ? Quelles sont les ressources qui lui sont liées ? Comment gérer et aménager cet immense territoire dans une optique de développement durable des sociétés qui y vivent et qui en vivent ? Quelles sont les technologies à adapter ou à développer pour assurer ce développement ? Comment concevoir ce développement, améliorer la santé des populations, tout en préservant et en valorisant les richesses de ce milieu et en minimisant l'impact sur biodiversité ?

La meilleure solution, et la plus économique, pour maintenir la diversité et la capacité à en engendrer d'un système vivant, est probablement de le laisser évoluer spontanément. Cela ne signifie pas que la surveillance doit être absente ou qu'il faille interdire les explorations et certaines exploitations, mais il est nécessaire de veiller à ne pas trop perturber les mécanismes de diversification, de maintenance et de diminution spontanés de la biodiversité.

LE PROGRAMME AMAZONIE

En 2004, le CNRS a créé le programme Amazonie. Interdisciplinaire, il a pour objectif d'assurer l'implantation permanente du CNRS en Guyane et de promouvoir des orientations scientifiques et des actions incitatives pour accompagner cette implantation. C'est le grand système amazonien, où il subsiste encore de vastes espaces peu perturbés, à grande diversité biologique, qui est au centre de la réflexion scientifique, et notamment les questions relatives à la biodiversité. Dans la tradition du CNRS, les actions sont menées en coopération avec ses partenaires, universitaires et des autres établissements de recherche.

Le programme Amazonie intervient à trois niveaux. Il assure l'implantation de dispositifs de recherche en Guyane (stations de terrain, laboratoires, accueil de chercheurs sur programmes scientifiques). Il joue un rôle d'incitation sur des orientations définies dans son programme scientifique. La question de la biodiversité est évidemment centrale dans plusieurs de ses thèmes : recherche de substances biologiquement actives et de technologies bio-inspirées, dynamique et gestion des territoires amazoniens, écologie de la santé (maladies infectieuses émergentes et réémergentes), biologie de la conservation, histoire et fonctionnement des écosystèmes amazoniens. Autre objectif du programme Amazonie, modéliser et simuler la dynamique de la biodiversité et des écosystèmes en s'appuyant sur une réflexion théorique sur les données obtenues.



© CNRS Photothèque / Nicolas Cegalerba



© CNRS Photothèque / P. Charles-Dominique

Une fois ce principe admis, il faut déterminer les espaces en question, leur taille et leur localisation et avoir de bonnes évaluations de la diversité biologique et de sa dynamique. Ces données sont loin d'être acquises, non seulement parce que les moyens n'ont pas été mis en œuvre, mais aussi parce que longtemps les recherches s'attachaient plus à trouver et à décrire de nouvelles espèces qu'à les quantifier.

Un aménagement, une gestion des territoires et de leur biodiversité nécessitent des données fiables, un suivi régulier des changements, une

définition, localisation et géométrie des espaces protégés et des zones exploitées et anthropisées, et l'établissement des connectivités. Il est aussi nécessaire de mettre en place des modes de gestion adaptatives permettant de revoir régulièrement et sans heurts les plans d'occupation des espaces. Ainsi, l'Amazonie sera valorisée et non dévastée.

■ GESTION DES TERRITOIRES, MAIS AUSSI DES RESSOURCES ET DES USAGES

La gestion de la biodiversité n'est pas réductible à celle de l'espace géographique ou au suivi des processus biologiques ou écologiques. On peut évoquer deux points sensibles, notamment en Amazonie : celui des savoirs traditionnels et celui de l'espoir omniprésent de tirer d'une ressource vivante un revenu économique.

Les AOC (appellations d'origine contrôlée) – qui labellisent à la fois l'origine géographique et variétale, la technique d'élaboration du produit et le lieu d'élaboration – et les IGP (indications géographiques protégées) – qui ne labellisent que l'origine géographique – sont bâties sur le principe du croisement de l'origine géographique et du savoir local. Pour les savoirs traditionnels, le support est efficace quand on s'intéresse aux ressources alimentaires, aux matériaux ou aux répulsifs. Les savoirs thérapeutiques sont plus délicats à utiliser et à valoriser : une substance thérapeutique peut n'être efficace que par un effet placebo, une substance antipyrétique peut être confondue avec une substance antibiotique et le savoir, source de pouvoir, n'est pas partagé dans ces sociétés.

◀ Prélèvement et identification de termites dans le laboratoire des Nouragues, station de recherche en écologie tropicale (Station des Nouragues, Guyane française).
Vue aérienne du camp (site Inselberg).



► Les peptides sécrétés par la peau de cette grenouille arboricole de Guyane *Phyllomedusa bicolor* ont permis de caractériser des molécules aux propriétés analgésiques et antibactériennes utilisables en pharmacologie.



© CNRS Photothèque / Richard Schartzmann



© CNRS Photothèque / P. Charlé-Dominique

▲ Vue de la forêt depuis le sommet de l'Inselberg des Nouragues.



© CNRS Photothèque / Nicolas Cegalierba

▲ Homoptère (*Membracidae*) adulte avec larves.

On a beaucoup fait espérer de revenus potentiels de la biodiversité, au point même que, effet boomerang, les chercheurs sont soupçonnés de « biopiraterie » dans certaines régions. Il est temps de construire un discours rationnel et raisonnable sur le sujet, notamment en répétant qu'il ne s'agit pas d'une ressource « minière », localisée dans l'espace, et que le plus souvent sa valorisation demande un investissement important.

■ VERS UN SAVOIR GLOBAL SUR LA BIODIVERSITÉ ?

Force est de constater que nous éprouvons quelques difficultés à construire un « savoir global » sur la biodiversité, dans un monde scientifique encore très sectorisé. Les chercheurs sont les seuls qui puissent produire l'interdisciplinarité nécessaire à l'élaboration de ce savoir sans lequel aucune avancée sérieuse n'est possible sur un sujet aussi complexe. D'ailleurs, ce qui distingue les « grandes questions » d'environnement actuelles des petites interrogations, c'est précisément ce que l'on pourrait appeler une double globalité : elles concernent la planète toute entière et elles impliquent de multiples disciplines scientifiques et technologiques, ainsi que divers aspects, politiques, économiques, sanitaires et sociaux, du fonctionnement de nos sociétés.

Cependant, la biodiversité concerne avant tout le monde vivant, et ce n'est aussi que grâce à une meilleure connaissance des processus biologiques et écologiques impliqués dans les trois mécanismes (diversification, maintien et disparition) spontanés ou provoqués que nous aurons les bases d'une meilleure gestion de ce patrimoine commun. Enfin, un effort important doit être fait sur l'acquisition de données fiables et leur organisation, sans oublier l'établissement de solides bases théoriques, aspect trop souvent négligé, pour la construction de modèles d'évolution de la biodiversité.

GESTION DURABLE

Coordinateur : Jacques Weber
Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) et Institut français de la biodiversité (IFB)
Avec les contributions de :

- Denis Couvet
unité « Conservation des espèces, restauration et suivi des populations », CNRS / Muséum national d'histoire naturelle / université Paris 6
- Alain Pavé
unité « CNRS Guyane », CNRS

- Franck Courchamp
unité « Écologie, systématique et évolution », CNRS / université Paris 11 / École nationale du génie rural des eaux et forêts
- André Micoud
Centre de recherches en sciences sociales (Cresal), CNRS / université Saint-Étienne / université Lyon 2
- Luc Abbadie
unité « Biogéochimie et écologie des milieux continentaux », CNRS / Inra / université Paris 6 / INA-PG / ENS Paris / ENSCP
- Michel Trometter, Inra Grenoble



LA BIODIVERSITÉ EN QUELQUES CHIFFRES

- 2 300 personnes travaillent sur la biodiversité dans les laboratoires du CNRS, dont 1 000 agents CNRS.
- 1,8 million d'espèces sont décrites.
- Entre 10 et 15 millions d'espèces animales et végétales vivent sur Terre selon les estimations.
- Environ 16 000 nouvelles espèces sont décrites par an, dont 600 en Europe.
- Les espèces s'éteignent de 100 à 1 000 fois plus vite qu'aux temps géologiques anciens.

À LIRE

Un éléphant dans un jeu de quilles : L'homme dans la biodiversité, Robert Barbault
Éd. Seuil, 2006

Biodiversité et savoirs naturalistes locaux en France, Collectif
Éd. Inra-Cirad-Iddri-IFB, 2005

La nature a-t-elle encore une place dans les milieux géographiques ?, Paul Arnould et Éric Glon (dir.)
Éd. Publications de la Sorbonne, 2005

Actes de la Conférence internationale Biodiversité, science et gouvernance – Paris, 24-28 janvier 2005,
Robert Barbault (dir.). Ouvrage coordonné par Jean-Patrick Le Duc.
Éd. MNHN

Biodiversité et changements globaux – Enjeux de société et défis pour la recherche
Sous la direction de Robert Barbault et Bernard Chevassus-au-Louis. Ouvrage coordonné par Anne Teyssède.
Éd. Adpf / Ministère des Affaires étrangères, 2004

Les biodiversités. Objets, théories, pratiques, coordonné par Pascal Marty, Franck-Dominique Vivien,
Jacques Lepart, Raphaël Larrère.
Éd. CNRS éditions, 2005

POUR EN SAVOIR PLUS

- www.biodiv.org – Site officiel de la Convention sur la biodiversité.
- www.comite21.org – Site français sur la mise en œuvre de l'Agenda 21.
- www.csf-desertification.org – Site du comité scientifique français pour la Convention sur la désertification.
- www.unfccc.int/ – Site officiel de la Convention des Nations unies sur le changement climatique (le texte complet de Kyoto peut être téléchargé, en français, en format pdf).
- www.agora21.org – Site francophone du développement durable, pour consulter l'Agenda 21.
- www.brg.prd.fr – Site du Bureau des ressources génétiques.
- www.millenniumassessment.org/en/index.aspx – Site du *Millennium Ecosystem Assessment*.
- www.fao.org – Site de la *Food and Agriculture Organization* des Nations unies.
- www.undp.org – Site du programme des Nations unies pour le développement. Un très bon site pour se faire une idée claire de l'évolution économique et sociale du monde.
- www.unesco.org/mab – Site du programme « L'homme et la biosphère » de l'Unesco. Il permet de prendre connaissance de la stratégie de Séville et du Réseau mondial des réserves de la biosphère.
- www.unep.org – Site du programme des Nations unies pour l'environnement.
- www.gbif.org – Site du groupement international GBIF qui a pour but de rendre accessibles les données disparates déjà accumulées sur la biodiversité.

Cette plaquette est éditée par la Direction de la communication du CNRS.

Responsable des publications institutionnelles : Stéphanie Lecocq (01 44 96 45 67)
Conception et coordination : Aude Philippe
Coordination scientifique : Luc Abbadie, René Bally, Robert Barbault,
Pierre-Henri Gouyon, François Renaud et Jacques Weber
Recherche iconographique : Aude Philippe
Conception graphique et réalisation : Sarah Landel

Impression : C.print
Mai 2006

FOCUS

MAI
2006

www.cnrs.fr



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
3, RUE MICHEL-ANGE 75794 PARIS CEDEX 16 • TÉL. 01 44 96 40 00 • TÉLÉCOPIE 01 44 96 53 90