



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

23 quai de Conti
Paris 6^e
<http://www.academie-sciences.fr>

Libres points de vue d'Académiciens sur la biodiversité

Directeurs de publication :

Jean-François Bach et Jean Dercourt

Rédacteur en chef : Dominique Meyer

Comité éditorial :

Christian Amatore

Bernard Castaing

Pascale Cossart

Pierre Encrenaz

Olivier Faugeras

Étienne Ghys

Henri Korn

7 juillet 2010

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

Introduction	Dominique Meyer	p 1
---------------------	-----------------------	-----

1. Qu'est-ce que la biodiversité ?

1.1. Qu'est-ce que la biodiversité ? Que recouvre ce mot ? Quelle est l'histoire de ce concept ?	Christian Dumas	p 3
	Jean-Dominique Lebreton	p 5
1.2. L'étude de la biodiversité ne concerne-t-elle que le recensement des espèces vivantes ? Quelle fraction du monde vivant a-t-elle été ainsi recensée, et quelles sont les difficultés d'un tel recensement ?	Jean-Dominique Lebreton	p 6
	Claude Lévi	p 8
	Paul Ozenda	p 10
	Henri Décamps	p 11
1.3. Quel est le lien entre biodiversité et évolution ?	Pierre Buser	p 13
	Michel Caboche	p 15
	Claude Combes	p 16
	Bernard Kloareg	p 18
1.4. L'homme fait-il partie de la biodiversité ?	Jean-François Bach	p 20
	Bernard Bourgeois	p 22
	(Académie des Sciences Morales et Politiques)	
	Edgardo D.Carosella	p 24
	Laurent Degos	p 26
1.5. Que peut-on dire de la diversité des langues et de leur risque d'extinction ?	Gilbert Lazard	p 27
	(Académie des Inscriptions et Belles-Lettres)	

2. Quelle est l'importance écologique de la biodiversité ?

2.1. Un niveau suffisant de biodiversité est-il nécessaire au fonctionnement du monde vivant actuel ?	Henri Décamps	p 29
2.2. Quels sont le rôle et l'importance de la diversité des microorganismes ?	Éric Karsenti	p 30
	Jean Weissenbach	p 32
2.3. Quelle est l'importance des interactions entre espèces ?	Christian Dumas	p 35
	Roland Douce	p 36

3. Quels sont les principaux bénéfices de la biodiversité pour les hommes et leurs sociétés ?

3.1. La biodiversité est-elle importante pour l'alimentation humaine (production agricole, ressources marines) ?	Patrick Lavelle p 39 Yvon Le Maho p 40 Georges Pelletier p 41
3.2. La biodiversité est-elle importante pour la santé ? Quel est le rôle de la diversité des agents pathogènes ?	Roland Douce p 43 Maxime Schwartz p 45 Philippe Sansonetti p 48
3.3. La biodiversité est-elle importante pour le climat et les ressources en eau ?	Henri Décamps p 51 Ghislain de Marsily p 53
3.4. A-t-on pu quantifier certains des bénéfices de la biodiversité et certains des préjudices dus à une érosion de la biodiversité ?	Claude Combes p 55 Jean-Dominique Lebreton p 56
3.5. Pourquoi attribuer une valeur monétaire à la biodiversité ?	Christian Dumas et Henri Décamps p 58
3.6. Dans quelle mesure les immenses progrès dans les sciences du vivant permettent-ils de mieux connaître la biodiversité, son rôle dans la nature, et de comprendre ce qui la modifie ?	Michel Delseny p 60 François Gros p 62 Bernard Kloareg p 63

4. Quels sont les faits nouveaux qui suscitent des inquiétudes chez les scientifiques ?

4.1. Quelles sont les principales causes de changement de la biodiversité ? Y a-t-il un lien entre la rapidité et l'ampleur du changement climatique et celles de la variation de la biodiversité ?	Henri Décamps p 66
4.2. Les variations de la démographie, l'urbanisation, le développement économique et industriel ont-ils un impact sur la biodiversité ?	Henri Leridon et Ghislain de Marsily p 67 Henri Décamps p 69
4.3. En estimant le rythme de disparition actuel des espèces et en le comparant aux périodes d'extinction du passé, peut-on parler de crise de la biodiversité ?	Jean-Dominique Lebreton p 71 Philippe Taquet p 72
4.4. L'état des ressources marines est-il particulièrement préoccupant ?	Claude Combes p 74 Yvon Le Maho p 75
4.5. Les invasions biologiques sont-elles un phénomène répandu, et quel impact ont-elles sur la biodiversité ?	Christian Dumas p 77

- 4.6. Quels sont les lieux où la biodiversité est la plus fragile et la plus menacée ? [Christian Dumas](#) p 79
- 4.7. Quel est l'état de la biodiversité dans le monde et principalement en Europe ? [Jean-Dominique Lebreton](#) p 81
- 4.8. Est-il possible de prédire l'évolution de la perte de la biodiversité et les conséquences pour les sociétés humaines dans les décennies à venir ? Y a-t-il déjà des effets irréversibles ? [Henri Décamps](#) p 83

5. L'homme et la biodiversité

- 5.1. L'homme crée-t-il de la biodiversité ? [Michel Delseny](#) p 85
[Pascal Ribéreau-Gayon](#) p 88
- 5.2. Les OGM menacent-ils la biodiversité ? [Christian Dumas](#) p 90
[Georges Pelletier](#) p 93
[Bertrand Saint-Sernin](#) p 95
(Académie des Sciences Morales et Politiques)

6. Qu'en est-il pour la France ?

- 6.1. Quels sont les impacts des divers aspects de l'activité humaine (démographie, urbanisation, transports, agriculture, industrie, etc.) sur la biodiversité en France ? [Henri Décamps](#) p 97
[Jean-Dominique Lebreton](#) p 100
- 6.2. Que pouvons-nous faire en France ? Dans quelles régions commencer ? Avec quels objectifs, quels programmes, quels calendriers ? [Jean-Dominique Lebreton](#) p 101
- 6.3. Par quels indicateurs peut-on suivre la dynamique de la biodiversité et les effets des mesures prises pour la protéger en France ? [Henri Décamps](#) p 103
- 6.4. Quel est le rôle des espaces protégés (parcs nationaux, conservatoires botaniques, jardins zoologiques et botaniques, aires marines) dans la conservation de la biodiversité en France ? [Christian Dumas](#) p 106
- 6.5. Les problèmes se posent-ils avec la même acuité en France métropolitaine et outre-mer ? [Jean-Dominique Lebreton](#) p 108
- 6.6. Qu'est-ce que la trame verte et la trame bleue ? [Henri Décamps](#) p 109

AVANT PROPOS

Afin de répondre à des questions, souvent posées, concernant des sujets de science et de société, l'Académie des sciences a récemment développé sur son site une rubrique destinée au public, intitulée "Libres points de vue d'Académiciens". Le premier sujet abordé, mis en ligne en novembre 2009, concernait l'environnement et le développement durable.

En cette année internationale de la biodiversité et à l'approche des conférences mondiales organisées par les Nations Unies à l'automne 2010, montrant l'importance croissante de ce sujet pour nos sociétés, l'Académie des sciences présente une série de "Libres points de vue d'Académiciens sur la biodiversité". Elle a ainsi proposé à différents membres, spécialistes des domaines en jeu, d'exprimer leurs points de vue sur de nombreuses questions dont l'importance écologique de la biodiversité, ses liens avec l'évolution, sa singularité pour l'Homme, ses avantages pour la société, etc., avec le désir de répondre aux préoccupations concernant son érosion.

Ces textes expriment, dans l'indépendance de chacun, les points de vue d'Académiciens, et apportent, par leur richesse et leur pluralité, un éclairage scientifique actuel sur la biodiversité.

Nous souhaitons exprimer nos remerciements à nos confrères qui ont accepté de participer à ce projet ainsi qu'à notre consœur Dominique Meyer qui l'a conçu et coordonné.

Jean-François Bach et Jean Dercourt
Secrétaires perpétuels de l'Académie des sciences

INTRODUCTION

Si le terme “biodiversité” a été proposé dans les années 1980 par les biologistes américains Walter G. Rosen et Edward O. Wilson, c’est principalement depuis le Sommet de la Terre de Rio, en 1992, qu’il est devenu familier. Le concept de biodiversité englobe la diversité au sein des espèces (diversité génétique), entre les espèces (diversité des espèces), et entre les écosystèmes (diversité des écosystèmes). En somme, c’est la diversité de la vie sur la Terre.

Près de deux millions d’espèces animales et végétales ont été décrites, mais leur nombre réel pourrait être supérieur à dix millions. De plus, le monde des micro-organismes, qui commence à être bien connu, pourrait comprendre à lui seul des dizaines de millions d’espèces. Cette diversité biologique est nécessaire au bon fonctionnement des systèmes écologiques, jouant un rôle dans la régulation des grands cycles biogéochimiques (comme celui de l’azote) et du cycle de l’eau, mais aussi dans l’agriculture, la santé, etc.

La diversité biologique est issue de l’évolution. Aujourd’hui comme depuis le début de l’histoire de la Terre, des espèces et des écosystèmes disparaissent ou sont menacés d’extinction. Mais le rythme de disparition semble s’être considérablement accéléré et six facteurs au moins peuvent expliquer cette érosion de la biodiversité : l’expansion démographique, la destruction des habitats naturels, la surexploitation des ressources naturelles, les pollutions, les espèces invasives, le changement climatique.

Selon le dernier rapport de l’ONU sur les “*Perspectives mondiales de la biodiversité*” publié en mai 2010, l’objectif fixé par la Conférence des Parties de la Convention sur la diversité biologique (CDB) des Nations Unies, en 2002, de réduire de façon significative la perte de la biodiversité d’ici à 2010, *Année internationale de la biodiversité*, n’a pas été atteint d’après les indicateurs mis en place. Ces

“*Perspectives*” confirment que la perte massive de biodiversité (forêts, lacs, récifs coralliens, etc.) a déjà commencé et entraînera une forte réduction du nombre des services essentiels fournis aux sociétés humaines par les écosystèmes.

Des actions urgentes et d'une ampleur sans précédent sont donc impératives et doivent être associées à d'autres objectifs prioritaires comme la réduction de la pauvreté et de la faim dans le monde, ainsi que l'amélioration de la santé. C'est tout l'enjeu du développement durable dont la gestion de la biodiversité est une des composantes. La création le 11 juin 2010 de la plate-forme inter-gouvernementale d'interface science-politique sur la biodiversité et les services rendus par les écosystèmes (IPBES) va dans le bon sens. Espérons que lors du prochain Sommet de la biodiversité organisé par les Nations Unies à l'automne 2010, après l'ensemble des événements qui ont alerté les gouvernements et les opinions publiques de tous les pays, de nouveaux objectifs mondiaux seront fixés pour enrayer la perte de la biodiversité.

En cette *Année internationale de la biodiversité* et avant le Sommet de l'ONU, ce sont toutes les découvertes scientifiques récentes sur le sujet, toutes les inquiétudes, mais aussi les espoirs, qui sont abordés dans ces “Libres points de vue d'Académiciens sur la biodiversité”.

Je voudrais dire à tous les auteurs, mes confrères, combien leur contribution m'a été précieuse et les remercier d'avoir su construire, à partir de disciplines parfois éloignées, un ensemble harmonieux. Ma reconnaissance s'adresse également à Anne Bernard et à toute l'équipe de la Délégation à l'information scientifique et à la communication de l'Académie.

Dominique Meyer
Membre de l'Académie des sciences
Rédacteur en chef

Libres points de vue d'Académiciens sur la biodiversité

1. Qu'est-ce que la biodiversité ?

1.1. Qu'est-ce que la biodiversité ? Que recouvre ce mot ? Quelle est l'histoire de ce concept ?

Christian Dumas (Membre de l'Académie des sciences)

Le mot de biodiversité (issu de l'anglais biodiversity) a été popularisé par Walter G. Rosen, en 1985, pour un forum national sur la diversité biologique. Il associe deux mots (bios : mot grec signifiant la vie et diversité) et a été repris à la fois par les scientifiques, les médias et les politiques. Ces derniers, pour la biodiversité comme pour le développement durable, mettent aujourd'hui souvent ces termes dans leurs discours pour les rendre "plus tendance", sans pour autant toujours utiliser les concepts sous-jacents dans le sens originel où ils ont été définis.

Après le Sommet de la Terre (Rio de Janeiro, 1992) qui a établi une Convention sur la diversité biologique ratifiée à ce jour par environ 190 pays, l'Organisation des Nations Unies (ONU) a proclamé 2010 : Année internationale de la biodiversité. Son but est de sensibiliser l'opinion publique à son état dans le monde et d'inciter les populations humaines à préserver et à sauvegarder ce patrimoine, grâce à toute une série de mesures à imaginer à l'échelle de chaque État. La France a répondu à cet appel en déclarant la biodiversité, cause nationale majeure pour 2010 !

L'utilisation du terme biodiversité coïncide avec une prise de conscience de l'extinction rapide d'espèces ou des menaces qui pèsent sur un certain nombre d'entre elles à la suite de modifications des milieux dans lesquelles elles vivent. Ces modifications sont très souvent liées directement à l'action de l'homme (urbanisations massives, développement d'industries polluantes, agriculture intensive, surpêche de certaines espèces, déforestation massive, production de déchets, pollution des eaux douces et des océans, introduction d'espèces invasives, etc.).

Suivant l'article 2 de la Convention sur la diversité biologique établie à Rio de Janeiro, la définition de la biodiversité est :

"La variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes

écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre les espèces ainsi que celle des écosystèmes ."

Il y a trois niveaux distincts pour appréhender la biodiversité :

- a) La très grande variabilité des organismes vivants recouvre un premier niveau : celui du nombre, de la nature et de l'abondance des différentes espèces. Ainsi, on compte, par exemple, deux espèces d'éléphants suivant leur origine géographique, Asie ou Afrique ; quelques 300.000 espèces de plantes à fleurs ; des millions d'insectes connus (beaucoup sont à découvrir) ; des milliards de microbes dont la plupart restent à identifier. On voit bien également que le terme d'abondance doit être pris en compte : un éléphant ou un baobab impressionnent par leur taille, leur volume individuel mais ce n'est rien comparé au nombre de fourmis dans une fourmilière ou de graminées au sein d'une prairie.

Il y a donc deux types de biodiversité : celle qui est visible comme la plupart des espèces de plantes ou d'animaux et celle qui n'est pas perceptible à l'œil nu comme le monde des microbes, des virus ou encore de tout ce qui vit dans les sols, les eaux douces ou marines ou encore dans notre flore intestinale (riche en microbes) ; sa visualisation nécessite souvent une instrumentation particulière comme l'utilisation du microscope et/ou la mise au point de milieux de culture appropriés.

- b) Cette variabilité entre individus d'espèces différentes existe également à un deuxième niveau, le moléculaire : celui des gènes qui renferment les caractères héréditaires d'une espèce. La diversité génétique peut s'évaluer à l'échelle d'un individu. Prenons l'exemple d'un chien de race labrador, issu d'un processus de domestication, ou celui de la violette odorante, espèce sauvage (c'est-à-dire non domestiquée). Elle peut aussi s'apprécier à l'échelle d'une population d'individus de la même race (l'ensemble des labradors) ou de la même espèce (l'ensemble des violettes odorantes). Mais cette évaluation peut aussi se faire à l'échelle de populations de races différentes de chiens (labrador, caniche, berger allemand, etc., toutes vraisemblablement issues d'une espèce sauvage : le loup gris) ou d'espèces sauvages de violettes (violette odorante, violette des Pyrénées, violette hérissée, etc.). Ces différents chiens ou violettes sont issus d'ancêtres communs qui se sont diversifiés au cours des mécanismes de l'évolution par le jeu de mutations génétiques et d'autres processus de sélection (incluant la domestication pour le chien) ou de spéciation. Cette diversité génétique est donc à la source de la diversité biologique en général et permet aux différentes espèces, races ou variétés, de s'adapter aux évolutions de leur environnement.

- c) Un troisième niveau correspond à celui des milieux ou écosystèmes dans lesquels tous ces individus vivent. Alors qu'il est assez facile d'isoler les individus d'une même espèce ou encore les gènes d'un même génome, il est souvent très difficile de délimiter un écosystème. Sa définition précise est mal aisée à faire tant elle prend en compte de paramètres à la fois biotiques (espèces vivantes animales, végétales ou microbiennes) et abiotiques (le type de sol, la topographie d'un terrain, le climat...).

La France, avec ses territoires outre-mer (Guyane, Guadeloupe, Martinique, Réunion, Nouvelle-Calédonie, ...) très riches en espèces différentes, représente environ 20 pour cent de la biodiversité mondiale estimée car ces territoires possèdent un très important domaine maritime associé.

Cette année internationale de la biodiversité doit être l'occasion d'une réflexion et de mesures appropriées pour préserver ce patrimoine de l'humanité. La réelle méconnaissance de l'importance de la biodiversité doit être prise en compte très tôt au niveau éducatif : aujourd'hui où nos sociétés sont très largement coupées de leurs origines campagnardes, les sensibilisations se font surtout par le petit écran ou les parcs zoologiques ou botaniques naturalisés. Par ailleurs, des interactions complexes et extrêmement fines existent entre tous les êtres vivants au sein de leurs écosystèmes ; celles-ci sont encore relativement méconnues car difficiles à appréhender. Néanmoins, plusieurs initiatives ont été développées comme l'*Évaluation des écosystèmes pour le millénaire* afin de tenter de déterminer la valeur inestimable (l'ampleur ?) des services rendus par la biodiversité (pollinisation des cultures, épuration des eaux ; plantes, animaux, microbes et nouveaux médicaments, etc.).

Pour reprendre les termes de Robert Barbault, scientifique du Muséum National d'Histoire Naturelle très impliqué dans l'écologie et les problèmes de biodiversité :

"La biodiversité, c'est le passage du concept de l'homme et la nature à celui de l'homme dans la nature à tous égards, pour le meilleur et pour le pire."

1.1. Qu'est-ce que la biodiversité ? Que recouvre ce mot ? Quelle est l'histoire de ce concept ? (suite)

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

"Biodiversité" est un néologisme, issu de l'anglais "biodiversity", contraction de "biological diversity" proposée au milieu des années 80 et popularisée notamment par le biologiste américain Edward O. Wilson qui en a fait le titre d'un ouvrage paru en 1988. La biodiversité est donc la diversité du monde vivant. En parlant de la "forte biodiversité des forêts intertropicales", ou de "l'érosion de la biodiversité", on indique implicitement que la biodiversité se mesure, ou tout au moins se compare, par exemple entre régions. Mais pas plus que la diversité culturelle d'un pays ne se mesure par un seul nombre, ni même plusieurs (nombre de films produits par an, nombre de groupes musicaux, nombre de langues parlées...), la biodiversité ne peut se réduire à une affaire de nombres.

Le grand nombre de formes vivantes, et leur variété, de la bactérie unicellulaire à la baleine bleue, du criquet aux séquoias, ont de tous temps étonné les hommes - comme en témoigne déjà le texte biblique de l'Arche de Noé - au point qu'ils en ont longtemps attribué l'origine à une création par un être supérieur.

La notion d'espèce, ensemble conceptuel d'individus susceptibles de se reproduire entre eux, est présente de longue date dans les savoirs populaires ("le merle", "la grive", "la violette", "la pensée"). Elle a été systématisée par Linné au XVIII^{ème} siècle pour décrire le monde vivant. A sa découverte chaque espèce reçoit depuis lors une description et un "nom scientifique" formé de deux noms latins : le nom de genre, commun à des espèces proches, et le nom d'espèce. Cette nomenclature binominale reproduit avec génie la structure "nom – prénom" utilisée par une large part des populations humaines, avec la même fonction de clarification et d'accent sur les parentés. Faute de grives draines *Turdus viscivorus*, on mangera des merles noirs

Turdus merula, membres du même genre *Turdus*, et à ce titre plus proches entre eux que de l'étourneau *Sturnus vulgaris*. De même le botaniste ne distinguera que modérément les violettes et les pensées, toutes membres du genre *Viola*.

De cet accent sur les ressemblances à l'idée de réelles parentés, et donc de transformation des espèces à partir d'ancêtres communs, il n'y avait qu'un pas, longtemps ignoré malgré son évidence, et franchi notamment par le transformisme de Lamarck.

Darwin, avec la sélection naturelle, a donné une explication scientifique encore valide de nos jours, à des nuances et des approfondissements près, de la diversité du vivant. L'hérédité nécessaire à l'action de la sélection naturelle telle que proposée par Darwin a trouvé son explication avec la découverte des gènes et des mécanismes de transmission génétique dans la première moitié du XX^{ème} siècle.

Le décryptage de la structure de l'ADN par Watson et Crick et la compréhension de son rôle universel dans le code génétique ont parachevé la compréhension de la biodiversité, en démontrant l'unité totale du vivant, et sa diversification à partir d'un événement probablement unique d'apparition.

Cette diversification a pour résultat un immense "arbre de la vie" aux multiples branches. Cet arbre résulte d'incessantes contingences historiques, parmi lesquelles l'isolement des populations joue un rôle majeur en leur permettant une différenciation autonome. Le même type de mécanismes produit la diversité culturelle, par exemple celle des langues. Chaque espèce, ou chaque population partiellement isolée au sein d'une espèce présente ainsi une diversité génétique interne qui lui est propre. Les êtres vivants ont développé aussi des interactions de toutes sortes, à la fois résultats et moteurs d'une diversification fascinante des fonctions et adaptations. Le lion mange des antilopes, qui ne mangent que de l'herbe : on parle de prédateurs et de consommateurs. Des milliers de bactéries vivent dans nos intestins et sont nécessaires à la digestion de nos aliments...

La biodiversité est donc l'ensemble de la diversité du vivant, structurée à grands traits en diversité génétique, diversité des espèces, diversité des formes, des fonctions et des interactions. Cette définition met l'accent sur la fragilité du monde vivant, résultat d'une trajectoire unique de l'évolution dans un monde qui a vécu de multiples changements, voire des crises, comme l'extinction des dinosaures, et qui connaît actuellement un changement rapide sous l'effet des actions de l'homme.

1.2. L'étude de la biodiversité ne concerne-t-elle que le recensement des espèces vivantes ? Quelle fraction du monde vivant a-t-elle été ainsi recensée, et quelles sont les difficultés d'un tel recensement ?

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

La multiplicité des espèces a été de tous temps une source d'étonnement pour l'homme. En témoigne le ravissement des enfants devant les animaux des champs, des zoos ou des aquariums. Mais un simple inventaire des espèces vivantes ne donnerait qu'une compréhension bien partielle de la diversité du fonctionnement des organismes vivants. Chaque individu interagit avec les membres de sa propre

espèce au sein d'une population, chaque espèce avec d'autres espèces ; toutes ces espèces utilisent des ressources et recyclent matière et énergie au sein de systèmes écologiques plus larges, les écosystèmes.

Ce point de vue fonctionnel ne relève pas exclusivement de la recherche fondamentale. Par exemple la diversité en nombre et fonctions des microbes du sol est essentielle pour le fonctionnement des "agrosystèmes" : un champ cultivé reste un écosystème soumis aux mécanismes écologiques, quel que soit le niveau d'intensification de l'agriculture. Cette diversité microbienne influe-t-elle le fonctionnement de cet écosystème, par exemple le cycle du carbone ou de l'azote ? Son appauvrissement par une conduite technique inappropriée obère-t-il le fonctionnement à long terme, et donc le maintien dans la durée de rendements économiquement rentables ?

Pourtant, même en négligeant les aspects fonctionnels, un simple regard sur l'inventaire des espèces vivantes est fascinant. Il y a plus de 100 espèces d'orchidées en France, environ 1 500 espèces de charançons, mais aussi 4 500 espèces de plantes dont environ la moitié est présente dans le département des Hautes-Alpes. Sous les tropiques, les chiffres donnent le vertige : dans le haut-bassin amazonien, on trouve 550 espèces d'oiseaux par km², autant que dans toute l'Europe ; au Brésil, plus de 4 000 espèces d'orchidées, famille de plantes la plus riche au monde avec près de 15 000 espèces.

L'inventaire numérique de la biodiversité est pourtant loin d'être complet, que ce soit à l'échelle globale (où en sommes-nous de la liste de toutes les espèces de la planète ?) ou au niveau local (combien d'espèces y a-t-il dans tel site ?).

Au niveau mondial, près de 2 millions d'espèces vivantes ont été recensées, dont plus de 700 000 espèces d'insectes : à un journaliste, qui ignorait qu'il était athée et communiste et l'interrogeait sur l'idée la plus marquante qu'avait eue Dieu en créant le monde, l'évolutionniste J.B.S Haldane avait répondu "un goût immodéré pour les coléoptères".

Pour les vertébrés, avec environ 45 000 espèces décrites, l'inventaire est très avancé. On décrit encore régulièrement de nouvelles espèces, mais de plus en plus souvent à l'aide d'analyses génétiques mettant en évidence l'absence d'échange de gènes et donc de reproduction entre populations d'aspect identique.

Pour les organismes de petite taille, la situation est radicalement différente. Dans les forêts intertropicales, des dispositifs d'accès à la canopée permettent régulièrement de découvrir de nouvelles espèces d'insectes. On a montré que plusieurs centaines d'espèces sont strictement inféodées à chaque espèce d'arbre. Les centaines d'espèces d'arbres de la forêt amazonienne recèlent ainsi des dizaines de milliers d'espèces d'insectes pour la plupart encore inconnues de la science. Haldane avait donc bien raison !

L'inventaire est encore plus fragmentaire pour les champignons, les multiples organismes parasites, et les bactéries. Les difficultés pratiques et les questions sur la notion d'espèce font que le nombre d'espèces réellement présentes sur terre varie de 10 à 40 millions selon les opinions. Il n'existe d'ailleurs pas de base de données synthétique de l'ensemble des espèces connues.

Les inventaires régionaux restent eux aussi largement incomplets, sauf pour les vertébrés et, sous climat tempéré, les plantes. Environ 3 000 espèces d'insectes ont

été recensées en Camargue, certaines par des spécialistes de tel ou tel groupe comme par exemple les carabes, d'autres par des entomologistes généralistes. Si tous les groupes avaient été étudiés par des spécialistes, on évalue à 12 000 le nombre d'espèces qui auraient été détectées, bien sûr pas forcément nouvelles pour la science. On comprend l'intérêt des tentatives de recensement exhaustif, comme celle en cours dans le Parc National du Mercantour, pour aider à saisir l'incroyable diversité du vivant.

Des pages seraient nécessaires pour présenter la diversité des formes et des interactions, elle aussi incomplètement inventoriée et marquée de temps à autre par de spectaculaires découvertes, comme celle des bactéries vivant dans les sources hydrothermales au fond des océans.

1.2. L'étude de la biodiversité ne concerne-t-elle que le recensement des espèces vivantes ? Quelle fraction du monde vivant a-t-elle été ainsi recensée, et quelles sont les difficultés d'un tel recensement ? (suite)

Claude Lévi (Correspondant de l'Académie des sciences)

Le monde vivant, dans toute sa diversité, occupe une très fine pellicule superficielle de la Terre, la biosphère, essentiellement aux interfaces terre-eau, terre-air, eau-air. Archées, bactéries, eucaryotes végétaux et animaux s'y sont différenciés en espèces ; l'espèce étant considérée comme la catégorie élémentaire, apte à être recensée, du monde vivant.

L'espèce et son nom. Depuis les temps les plus anciens, l'homme a pris conscience de la diversité des formes vivantes. Les animaux et les végétaux les plus communs ont reçu un nom, transmis oralement dans la langue de chacun des groupes humains. Ces noms expriment en raccourci une liste de particularités, de "caractères", partagés par des individus semblables. Dès l'Antiquité, on a commencé à décrire et à représenter les morphologies, parfois très détaillées, indispensables à l'identification des espèces. Les noms ainsi donnés aux espèces diffèrent entre régions, et sont dits "vernaculaires".

Depuis Linné (1758), chaque espèce de plante et d'animal est définie à l'aide d'un langage commun, qui se veut universel : le latin, par deux noms : un nom de genre (catégorie supérieure) et un nom d'espèce (catégorie de base), par exemple : *Homo sapiens*.

La désignation (la diagnose) de l'espèce repose sur la présence ou l'absence de nombreux caractères qualitatifs de formes, de structure. L'évolution des progrès scientifiques et des technologies a permis d'ajouter des caractères très variés, écologiques, comportementaux, physiologiques, biochimiques, génétiques. L'accumulation de caractères nouveaux, certes utiles, complique sans cesse l'identification des espèces et nécessite un traitement statistique des données quantitatives.

Acquérir et conserver des données (exemple du monde vivant marin).

Chaque espèce occupe un espace, continu ou dispersé, et un type particulier d'habitat (niche écologique). Il faut donc explorer systématiquement tous les milieux

marins, du haut des plages jusqu'aux fonds abyssaux et aux fosses océaniques. Cette exploration n'a jamais cessé depuis l'Antiquité, débutant en Méditerranée. Les espèces littorales, surtout comestibles ou commerciales, ont été les premières à être décrites.

Zoologistes et botanistes ont participé aux expéditions maritimes. Marins, médecins, voyageurs naturalistes, riches amateurs de curiosités naturelles ont rapporté, surtout en Europe, des collections de toutes origines géographiques dans lesquelles la proportion d'espèces nouvelles était toujours considérable. Ces collections sont conservées, à sec ou en liquide, dans les musées d'histoire naturelle, depuis trois siècles. Elles ont été étudiées par des hommes de science de plus en plus spécialisés. Chaque nouvelle espèce est décrite d'après un individu "type". Ces types de références sont dispersés à travers le monde et leur consultation est très difficile. Les descriptions, écrites dans toutes langues, ont été publiées dans d'innombrables revues et ouvrages, constituant parfois des documents rares et précieux. Or, reconnaître une espèce comme nouvelle exige de comparer ses caractères avec ceux de toutes les espèces déjà décrites.

Grâce aux progrès de l'informatique et de la photographie numérique, les bases de données taxonomiques et les inventaires de tous les types spécifiques conservés dans les musées sont mis à disposition des utilisateurs du monde entier. C'est un énorme progrès.

Les recherches océanographiques, les études du monde vivant, en profondeur ou en surface, ont débuté grâce au voyage du "Challenger" (1873-76), explorant tous les océans de la planète. Les espèces rapportées étaient encore inconnues. Il a fallu des dizaines d'années aux meilleurs spécialistes internationaux de l'époque pour en faire la description presque complète.

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, les explorations et les récoltes ont été multipliées. Chaque nouvelle région parcourue, chaque îlot isolé, chaque mont sous-marin examiné révèle un contingent d'espèces encore inconnues. Chaque type d'engin de récolte remonte à la surface des espèces différentes, mobiles dans les masses d'eau, ou sédentaires et fixées sur les fonds stables ou instables.

Les pêches de plancton à la surface des mers ont révélé un monde vivant très différent du monde du fond des mers ou monde benthique : espèces pélagiques vivant à des profondeurs variées, stades larvaires d'espèces benthiques, espèces unicellulaires.

Recensement des espèces. On dispose de toutes sortes de listes d'espèces, classées par groupe animal ou végétal, ou par origine géographique et par type d'écosystème.

Ces listes ont été établies soit par des spécialistes, soit par des utilisateurs qui compilent une littérature variée, sans connaissance personnelle et sans capacité critique. Pour les animaux, une entreprise exceptionnelle, commencée en 1864, le "Zoological Record", fournit la liste presque complète des espèces vivantes, dont les descriptions continuent à être publiées sous la forme d'une base de données. Ces listes s'allongent et se modifient au fil des années en fonction du nombre et de la culture de taxonomistes internationaux ainsi que de l'intérêt des organismes étudiés.

Recensement et concept d'espèce. L'espèce a reçu, depuis Linné, des définitions très différentes.

A l'espèce "ensemble d'individus ayant une grande similitude de caractères visibles", s'ajoute aujourd'hui l'espèce "biologique", ensemble de populations, dont les individus interféconds se croisent dans la nature et produisent des descendants fertiles. Plus récemment encore l'espèce "phylogénétique" est considérée comme un segment d'une lignée évolutive.

Un recensement total des espèces vivantes est utopique et irréalisable avec les moyens dont on dispose actuellement. Est-il possible de calculer la fraction des espèces recensées, dans l'ignorance du dénominateur de la fraction : 2 millions, 15 millions, 50 millions ?

En revanche, des recensements périodiques partiels des espèces occupant la même niche écologique, ou la même région, ont été déjà faits. Ils ont apporté des informations très importantes sur l'effet des activités humaines par altérations, transformations réversibles ou non des habitats, transferts volontaires ou involontaires d'espèces.

L'augmentation brutale et considérable de l'effectif des populations d'*Homo sapiens*, depuis un siècle, a des conséquences imprévisibles sur la survie de nombreuses espèces de la biosphère ; elle risque d'avoir des conséquences sur sa propre survie.

1.2. L'étude de la biodiversité ne concerne-t-elle que le recensement des espèces vivantes ? Quelle fraction du monde vivant a-t-elle été ainsi recensée, et quelles sont les difficultés d'un tel recensement ? (suite)

Paul Ozenda (Membre de l'Académie des sciences)

La biodiversité recouvre de nombreuses facettes. Elle n'est pas une propriété intrinsèque de tel milieu vivant, comme le seraient des constantes physiques par exemple. C'est au contraire une perception subjective, qui peut avoir autant d'expressions que de points de vue de l'observateur.

Outre la richesse spécifique de la biodiversité, il faut aussi prendre en compte :

- la diversité taxonomique : répartition des grands groupes, notamment des familles ;
- la diversité écologique : modes de croissance, adaptations ;
- la diversité biogéographique, par exemple les différences dues à la continentalité ;
- la diversité biocénétique : nombre et nature des groupements occupant un territoire ;
- la diversité génétique surtout, principalement à l'intérieur de l'espèce.

En ce qui concerne le recensement des espèces, il n'a de valeur que s'il est conduit suivant des règles méthodiques. Il faut préciser :

- ce que l'on évalue, et l'unité de référence utilisée (espèce linnéenne ou ses subdivisions) ;
- si l'on prend seulement en compte les espèces spontanées ou également les espèces introduites et les espèces cultivées ;

- l'importance relative des espèces dans le cas décrit : formatrices ("key species"), dominantes, rares, endémiques.
- par rapport à quoi on évalue : surface du territoire inventorié (divisions administratives, ou bien étendue standard, par exemple 100 km²), intervalle écologique (température moyenne, degré de latitude, tranche d'altitude), temps (date et périodicité des inventaires, surtout dans les régions où la biodiversité décroît).

1.2. L'étude de la biodiversité ne concerne-t-elle que le recensement des espèces vivantes ? Quelle fraction du monde vivant a-t-elle été ainsi recensée, et quelles sont les difficultés d'un tel recensement ? (suite)

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

L'étude de la biodiversité ne saurait se limiter au recensement des espèces vivantes. Elle concerne en effet "la variabilité des organismes vivants de toute origine" et comprend "la diversité au sein des espèces et entre les espèces ainsi que celle des écosystèmes". En conséquence, l'étude de la biodiversité doit d'abord permettre de comprendre les processus évolutifs qui conduisent les espèces vivantes à apparaître, à s'assembler, à se transformer, à disparaître... elle doit aussi permettre de préciser le rôle de la biodiversité dans le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes, par exemple vis-à-vis de leur productivité et de leur stabilité face à des perturbations plus ou moins fortes. De plus, ces dernières années voient se recentrer les recherches sur l'influence de la biodiversité dans l'approvisionnement des services rendus par les écosystèmes – denrées alimentaires, eau douce, bois, régulation du climat, protection contre les risques naturels, contrôle de l'érosion, ingrédients pharmaceutiques et loisirs – en même temps que se multiplient les efforts pour déterminer la valeur de la biodiversité dans le cadre de réflexions largement interdisciplinaires, des sciences de la nature à celles de l'Homme et de la société.

Néanmoins, l'étude de la biodiversité ne saurait se développer sans un recensement qui, il faut le reconnaître, n'est encore que partiel. A l'échelle de la planète, les estimations couramment avancées font état de 1,8 à 1,9 million d'espèces eucaryotes connues – un nombre probablement à ramener à 1,6 million compte tenu des synonymies. En fait, si les estimations sont globalement satisfaisantes pour les oiseaux, les mammifères et 90% des plantes, de nombreuses espèces sont encore à décrire, notamment parmi les invertébrés. Certains spécialistes évaluent les espèces existant sur terre à un nombre compris entre 5 et 10 millions¹.

En 2007, un rapport de l'OPECST, l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, soulignait combien la description de la biodiversité de la planète est loin d'être terminée, contrairement à ce qu'on pouvait croire il y a encore quelques décennies. D'abord, les techniques de la biologie moléculaire permettent de caractériser les espèces par leur capital génétique, bouleversant nos recensements, par exemple des bactéries des mers et des sols. Ensuite, des milieux jadis inexplorés se sont révélés exceptionnellement diversifiés, comme la canopée des forêts tropicales et les fonds océaniques (ces derniers abritent, selon une

¹ May R.M., Harvey P.H. (2009). Species Uncertainties. *Science* **323**: 687.

hypothèse basse, 100 000 à 1 000 000 espèces, bactéries non comprises, évoluant dans une grande diversité d'habitats). En 1992, pour l'ensemble de la planète, on estimait à huit millions le nombre d'insectes encore à identifier (pour un million décrit) et à environ un million et demi le nombre d'espèces de champignons (pour moins de 100 000 décrit)²... et dans les années 2002-2003, on découvrait encore 1 635 espèces marines par an, nombre probablement situé entre 1 300 à 1 500 espèces compte tenu, ici aussi, des synonymies possibles³.

Or, le rythme actuel de ces découvertes est extrêmement lent au regard de ce qui reste à découvrir : il a fallu 150 ans pour décrire 50 000 nématodes sur environ 800 000 estimé, et 40 ans pour explorer 80 km² de fonds océaniques sur plus de 300 millions. Le rapport de l'OPECST déjà cité identifie clairement le problème majeur du recensement des espèces de notre planète : "on mettra plus d'un millénaire à identifier une toute petite majorité d'espèces, alors que cette identification sous forme taxonomique classique n'aura probablement plus aucune signification scientifique d'ici plusieurs centaines d'années". Les auteurs de ce rapport rappellent ainsi que 7 300 espèces de bactéries étaient identifiées en 2007, l'année de parution de leur rapport, sur un nombre estimé compris entre 600 000 et 6 milliards, et qu'un prélèvement de 30 g. de sol contient 2 000 types de communautés bactériennes et 50 000 génomes différents. Quant aux écosystèmes, il en existe des milliers, distribués dans les grands biomes qui se partagent la planète – savanes, forêts tropicales, tundra, etc. A ces difficultés s'ajoutent celles dues aux différentes perceptions de la biodiversité, aux organismes considérés, aux différentes échelles d'espace et de temps adoptées.

Sur le long terme, il s'avère essentiel de coordonner l'acquisition des connaissances en matière de biodiversité à ces différentes échelles, du local au global. Essentiel aussi de poursuivre l'exploration naturaliste de la biodiversité : par la structuration des réseaux d'observation bénévoles, par le renouvellement de la taxonomie traditionnelle et par la formation de nouveaux chercheurs en taxonomie – une discipline délaissée alors qu'elle s'ouvre à de nouveaux concepts de classification basés sur les relations phylogénétiques, fonctionnelles et écologiques. On retiendra à cet égard les efforts du *Group on Earth Observations* (GEO) pour développer un *Biodiversity Observation Network* (BON)⁴ afin de suivre les changements de la biodiversité aux niveaux des écosystèmes, des espèces et des gènes, ainsi que celle des services écosystémiques. Souci majeur de ce "GEO BON" : coordonner et intégrer des données récoltées de multiples manières en de multiples lieux sur terre et dans les mers – un souci partagé par l'ensemble de la communauté scientifique.

² WCMC (1992). *Global Biodiversity: Status of Earth's Living Resources*. Chapman et Hall, 585 p.

³ Bouchet Ph (2006). The magnitude of marine biodiversity pp. 31-62, in Duarte C.M. (Ed): *The Exploration of Marine Biodiversity*. Bilbao, Fondation BBVA.

⁴ <http://www.earthobservations.org/geobon.shtml>

1.3. Quel est le lien entre biodiversité et évolution ?

Pierre Buser (Membre de l'Académie des sciences)

Aujourd'hui, à écouter les spécialistes du problème, le monde serait confronté à une véritable chute de la biodiversité à la fois des écosystèmes et des espèces. La disparition des espèces est préoccupante et la question peut se poser : en fut-il toujours ainsi au cours des âges ? Autrement dit, ou bien la responsabilité de l'homme est un facteur majeur, ou bien cette fluctuation de la biodiversité est liée aux lois mêmes de l'évolution. Telle sont les questions que l'on ne peut se dispenser d'évoquer.

De manière générale, on se doit de reconnaître que le maintien de la biodiversité implique la préservation des grands équilibres écologiques, à quelque échelle que ce soit : habitat, forêt, région, monde. Si pendant ces dernières décennies, une considérable érosion de la biodiversité a été observée presque partout, avec des pertes énormes du nombre d'individus de certaines espèces et *in fine*, du nombre d'espèces vivantes, c'est que plus de la moitié de la surface habitable de la planète a été modifiée de façon significative, avec la fragmentation des habitats, la pollution et la destruction de certains écosystèmes. Notre responsabilité doit être mise en cause à des degrés divers, selon les cas et selon les opinions des spécialistes.

Cela dit, la biodiversité actuelle est un moment particulier de la très longue histoire du monde vivant : les espèces vivantes aujourd'hui ne représentent qu'une infime partie du total des espèces ayant existé depuis les débuts de la vie sur Terre. Elle s'est modifiée au cours du temps sous l'effet de nombreux facteurs liés à la nature, ceci bien avant que n'apparaisse l'activité humaine. La variation de la biodiversité mérite donc d'être discutée et examinée à la lumière des données que nous enseigne la paléontologie, ceci bien sûr dans la perspective des vues actuelles sur l'évolution des espèces et ses théories.

Et voici d'abord des faits dont même le non spécialiste peut avoir entendu parler. Il est établi qu'au cours des temps géologiques, se sont produites des disparitions brutales d'espèces, comme celle des dinosaures, il y a 65 millions d'années. Et que dire aussi des innombrables fossiles qui témoignent de la présence de groupes entiers, animaux ou végétaux qui sont apparus au cours des temps géologiques, se sont largement épanouis, puis ont disparu, sans qu'une explication aussi drastique que pour les dinosaures ait été toujours proposée. On nous enseigne ainsi que la biodiversité s'est tissée au cours de milliards d'années, au gré des événements géologiques, des aléas climatiques, des interactions entre les espèces, du jeu des pressions évolutives et de l'adaptation. Et l'on pourrait énumérer d'innombrables exemples. Nous n'en citerons qu'un, celui raconté par Charles Darwin, le théoricien de l'évolution le plus reconnu et accepté. Ainsi nous apprend-il comment il a cherché à comprendre l'évolution des abeilles, comment elles sont passées d'un régime carnivore à une alimentation basée sur le pollen et le nectar, et d'une vie solitaire à une sociabilité complexe.

Au-delà de tels exemples, on ne connaît bien sûr que très mal les mécanismes de l'évolution, qui pourraient nous aider à comprendre comment au cours des temps

géologiques, bien avant l'apparition du genre humain, les espèces ont de la sorte modifié sans cesse la biodiversité du moment. Quand a commencé l'intervention de ce dernier ? Difficile à préciser mais on peut se permettre une remarque : si, dans l'évolution récente, les hommes ont eu aussi largement leur part depuis le néolithique, ils ont malheureusement participé à l'extinction de nombre d'espèces, mais ils ont aussi contribué à la diversification, en sélectionnant ou en privilégiant celles qui leur étaient utiles !

Et très vite on en vient aux tentatives actuelles d'expliquer l'évolution, de comprendre comment s'est installée puis s'est sans cesse modifiée la diversité des espèces vivantes au cours des temps. Pour se résumer, il est bien clair qu'aucune explication de l'évolution n'est actuellement entièrement satisfaisante, à en juger par les discussions autour de la théorie fondamentale que bâtirent jadis Darwin et ses successeurs. Autour d'eux ont été énoncés les deux principes classiques de l'évolution et de la diversification des espèces : i) les "adaptations" à l'environnement ne sont pas héréditaires mais ce sont des variations spontanées et aléatoires du phénotype de l'individu, dites mutations, qui interviennent au cours des temps, et dont nous savons maintenant qu'elles résultent de modifications du génome qui sont conservées dans sa descendance ii) le processus qui détermine la survie d'une espèce par rapport à une autre est la sélection naturelle, œuvrant dans le sens que la population, voire l'espèce la plus adaptée au milieu survie tandis que la moins adaptée disparaisse. Cette sélection naturelle serait de la sorte un des générateurs essentiels de la biodiversité. Les temps modernes ont accepté ces interprétations, et les ont enrichies par les apports de la génétique, conduisant au "néodarwinisme". Il n'avait pas échappé que les théories classiques de l'évolution expliquaient mal la remarquable diversité d'adaptation des espèces et l'acquisition d'appareils extrêmement complexes tels l'œil ou d'autres organes. Avec l'accent désormais mis sur la génétique moléculaire, en déterminant comment des régions de l'ADN, support de l'hérédité, jouent un rôle majeur en transformant considérablement l'expression phénotypique, on en arrive à une combinaison de la génétique et de l'évolution (théories dites évo-dévo). Ainsi a-t-on découvert des gènes homéotiques, ces gènes que partagent plantes et animaux, qui président à l'élaboration du plan de base d'organisation d'un être vivant, c'est-à-dire de la place des organes les uns par rapport aux autres. Avec un petit nombre de gènes suffisant par exemple pour déterminer la fabrication d'un organe aussi complexe que l'œil chez des espèces aussi différentes que la souris, la drosophile ou le calmar, on comprend mieux comment certaines transformations rapides et sans intermédiaires ont pu se produire. Cette vision du "développement documentant l'évolution" permet aussi de concevoir comment a pu s'installer en relativement peu de temps une si grande diversité des espèces.

Pour conclure : les variations de la biodiversité ne datent pas de l'homme. Les temps géologiques nous en montrent assez d'exemples, sans que pour autant nous comprenions tous les mécanismes de l'apparition, de la diversification et de la disparition des espèces. Si les préoccupations actuelles sur la baisse de la biodiversité se justifient, sans doute est-ce parce que nous saisissons, non sans raison, que ce processus, qui a certainement toujours existé, s'est soudain accéléré sous l'action destructrice de l'humain moderne, action que nous pouvons hélas maintenant saisir sur le vif, dans le concret, dans l'espace de temps de notre histoire récente et même dans l'espace de temps d'une vie humaine.

1.3. Quel est le lien entre biodiversité et évolution ? (suite)

Michel Caboche (Membre de l'Académie des sciences)

La théorie de l'évolution a été bâtie par Darwin au 19^{ème} siècle précisément pour apporter une réponse à la question centrale "d'où vient la multitude des espèces qui peuplent la terre ? Sont-elles créées *ex nihilo* "selon leur espèce" comme le suggérait le récit de la Genèse ou issues d'un processus d'adaptation ? La constatation faite par les naturalistes qu'il existe des barrières "naturelles" de reproduction entre les espèces était en faveur du caractère immuable de ces espèces et d'une vision créationniste du règne vivant. La domestication des espèces par l'homme révélait au contraire leur grande plasticité, illustrée par exemple par la très grande diversité morphologique des races de chiens domestiquées à partir du loup.

La théorie de l'évolution apporte une réponse globale à ces questions : c'est par un processus de variations spontanées apparaissant à chaque génération, associé à la sélection naturelle des organismes les mieux adaptés que les espèces se sont diversifiées au cours des millénaires. La sélection naturelle des variations favorables est donc le moteur qui génère la biodiversité. Confrontées à des environnements diversifiés, les différentes populations d'une espèce divergent insensiblement au fur et à mesure de leur adaptation nouvelle, et deviennent incapables d'hybridation entre elles, donnant lieu à de nouvelles espèces apparentées. Les pinsons des îles Galápagos étudiés par Darwin ont développé des becs adaptés à une alimentation insulaire spécialisée, différente selon les îles où se sont multipliés ces pinsons.

Cette théorie de l'évolution postule que tous les êtres vivants sont apparentés les uns aux autres et dérivent donc d'ancêtres communs. Les travaux de paléontologie, de génétique et de biologie moléculaire ont validé ce postulat. Les paléontologues ont découvert les fossiles des espèces éteintes dont sont issues les actuelles. L'archéoptéryx, et plus récemment *Limusaurus inextricabilis*, découverts dans les roches du Jurassique, sont des ancêtres probables des oiseaux actuels qui sont donc des cousins des dinosaures thérapodes. La découverte de l'ADN, support de l'hérédité chez tous les êtres vivants, et la mise en évidence du code génétique, règle de fabrication des protéines lui aussi commun à tous les êtres vivants, étayent aussi l'idée d'un monde vivant issu d'une cellule primitive. Les variations spontanées de la séquence de l'ADN, appelées mutations, sont conservées et transmises en descendance si elles sont favorables à la survie de l'espèce. L'accumulation de ces mutations aboutit au cours des millénaires à l'émergence de fonctions nouvelles dont certaines sont d'une sophistication prodigieuse (flagelle des bactéries, œil des animaux, photosynthèse des plantes). Bien que l'accumulation de mutations soit un processus lent (chez une plante cette accumulation se fait au rythme d'une à cent mutations par génome, selon la taille de celui-ci, et par génération), la diversité des mutations qui distinguent les ADN génomiques de deux membres d'une même espèce peut être énorme (10 à 20 % de divergence des séquences). Cette diversité génétique est à la base de la diversité dite phénotypique des formes observables de l'espèce. Plus elle est importante, plus elle peut contribuer à l'évolution de cette espèce et à la création de biodiversité. Sur cette biodiversité intra-spécifique se bâtit la biodiversité des espèces, dite inter-spécifique, par des événements répétés de spéciation.

Le moteur de l'évolution apparaît puissant, mais ce qui fait sa force (la durée) est aussi son talon d'Achille car s'il faut des millénaires pour qu'apparaisse une espèce, il suffit de quelques années pour détruire l'environnement propice à son apparition et sa survie. Cette fragilité est renforcée par le fait que chaque espèce interagit avec les autres espèces qui l'environnent. La présence d'une ressource nutritionnelle peut conditionner complètement la survie de l'espèce qui exploite cette ressource. La biodiversité n'est pas une aventure individuelle mais une aventure collective où la spécialisation peut se révéler être un atout pour coloniser un biotope, mais aussi un piège évolutif.

L'homme peut détruire la biodiversité, et il le fait d'ailleurs depuis le néolithique à un rythme sans cesse accéléré comme le montre de manière spectaculaire la chute globale des réserves halieutiques des océans. Ce n'est que récemment qu'il en a pris conscience. La domestication de certaines espèces pour son alimentation, commencée il y a plus de 10 000 ans, montre aussi qu'il peut exploiter à son profit le processus de sélection naturelle, et accélérer la vitesse d'évolution de certaines espèces pour les cultiver dans des conditions climatiques complètement différentes des lieux de vie des espèces sauvages dont elles dérivent. Ainsi la biodiversité du maïs cultivé est au moins aussi importante que celle de la téosinte dont il est issu au cours de sa domestication. A défaut de pouvoir se retirer physiquement de la planète, l'homme doit y vivre en bonne entente, autant que faire se peut, avec les autres êtres vivants. Et il doit s'employer à réduire son pouvoir de détruire la biodiversité mais aussi à développer sa capacité de créer de la biodiversité sur des bases rationnelles. La présence continue de pandémies (des cent millions d'humains qui chaque année contractent le paludisme, plus d'un million en meurent) nous rappelle aussi que la sélection naturelle, moteur de l'évolution, n'est pas non plus l'alliée inconditionnelle de l'homme selon une vision "rousseauiste" de la nature.

1.3. Quel est le lien entre biodiversité et évolution ? (suite)

Claude Combes (Membre de l'Académie des sciences)

Le jeu de l'astéroïde. Au niveau des gènes comme à celui des individus, au niveau des espèces comme à celui des écosystèmes, le renouvellement est la règle implacable de l'évolution. La biodiversité se modifie avec le temps et c'est là une des caractéristiques de la biosphère, peut-être la plus riche de conséquences. La vie est donc un bouillonnement continu de changement (seul le code génétique demeure immuable ou quasi-immuable, dénominateur commun des innombrables facettes du vivant). C'est parce que des millions d'espèces se sont éteintes que de nouvelles espèces ont trouvé espace et ressources sur notre planète. La lignée humaine n'avait pas encore sa place dans les écosystèmes de Burgess ou de Chengjian, il y a 530 millions d'années, pas plus que dans les écosystèmes où vivaient les dinosaures... Le renouvellement a pu être progressif, résultant d'une sélection naturelle dans l'acceptation darwinienne orthodoxe. Il a pu être brutal, conséquence d'événements dits "extrêmes", soit climatiques (refroidissements ou réchauffements rapides), soit cosmiques (chutes d'astéroïdes), soit encore telluriques (éruptions volcaniques).

Lorsque l'acteur central est la vie elle-même et non telle ou telle espèce vivante, lorsque l'unité de compte du temps est le million, voire le milliard d'années, les bouleversements de la biodiversité ne revêtent pas un habit négatif, mais apparaissent au contraire comme des "nécessités" de l'évolution, c'est à dire comme des pas en avant, jamais comme des retours en arrière. Comme le répétait volontiers Stephen Jay Gould, si l'astéroïde qui a laissé son empreinte à Chicxulub (Mexique) n'avait pas croisé l'orbite de la Terre il y a 65 millions d'années, la face de l'évolution en eut été changée, y compris et surtout pour ce qui est des mammifères, des primates et des hominidés. Notons au passage que l'astéroïde pourrait bien avoir été aidé par de puissantes éruptions volcaniques en Inde. L'évolution est un processus historique et non un scénario écrit d'avance.

Pourquoi donc nous alarmer de ce qu'*Homo sapiens* provoque aujourd'hui, par l'occupation ou la transformation des milieux et par l'exploitation des espèces, des modifications globales, profondes, rapides et irréversibles ? Ne donne-t-il pas un coup de pouce bénéfique à l'évolution ?

Tout le problème réside en ce que l'acteur central et l'unité de compte du temps ne sont pas les mêmes.

L'acteur central, pour la première fois depuis que la vie est apparue, est l'une des espèces qui composent la biodiversité. Jusqu'à aujourd'hui, chaque espèce a joué un rôle dans l'évolution de la biodiversité, soit parce qu'elle faisait la conquête d'un nouvel environnement, soit parce qu'elle disputait les ressources à une autre espèce, soit parce qu'elle donnait naissance, par sélection ou dérive, à de nouvelles espèces. Mais aucune espèce n'a jamais provoqué de changement "global, profond, rapide et irréversible". En d'autres termes, l'homme est, dans l'histoire de la vie, la première espèce qui joue à l'astéroïde.

L'unité de compte du temps est également différente, et même d'une échelle *totalemment* différente. Lorsque nous regardons vers l'arrière, par exemple vers ce que l'on nomme les cinq grandes extinctions, nous manions le million d'années avec désinvolture. Cela ne nous concerne pas plus que les invasions des Huns ou les ravages du Palatinat. C'est lorsque l'échelle de temps se rapproche de la durée d'une vie humaine que nous commençons à nous sentir concernés : le sac du Palais d'Été et la bataille de la Marne ouvrent, dans nos consciences, le placard des pourquoi.

On peut faire raisonnablement l'hypothèse qu'aussi longtemps que les conditions générales de la Terre (par exemple la température) seront compatibles avec la vie, l'évolution se relèvera de n'importe quelle phase de dégradation et de pollution, aussi catastrophique soit-elle. Peut-être même, après quelques dizaines de millions d'années, la Terre aura-t-elle ressuscité la pensée, l'art, la culture et la technologie. Cependant, ce n'est pas à cette échelle que se situent les débats sur la biodiversité : l'échelle est celle d'une durée de deux ou trois vies humaines au maximum pour arrêter la mise à sac de notre milieu de vie.

1-3 Quel est le lien entre biodiversité et évolution ?

Bernard Kloareg, Correspondant de l'Académie des sciences, avec Mirjam Czjzek et Gurvan Michel (Station biologique, CNRS, Roscoff)

Les interactions entre les espèces sont une force puissante de l'évolution, sans doute même la principale force à l'origine de la biodiversité. Dans la théorie de la Reine Rouge, en référence aux propos de ce personnage de « Alice au Pays des merveilles » (« il faut courir de toutes vos forces pour rester à la même place »), Van Valen (1973)⁵ compare les interactions biotiques à une sorte de course aux armements. Cette vision est très bien illustrée par l'étude des relations hôte-pathogène. Il apparaît que, pour chaque réponse de défense mise en place par l'hôte, le pathogène finit par disposer d'une arme appropriée pour pouvoir la contourner. Le résultat final de l'interaction (l'hôte est résistant ou, au contraire, il est sensible à la maladie) dépend de la dynamique respective du déploiement des réponses de défense de l'hôte face à l'arsenal dont dispose son agresseur. Cet équilibre permanent entre résistance et virulence est à la base de la co-évolution hôtes - pathogènes et, plus généralement, des relations hôtes - symbiotes.

Cette vision peut également être étendue au cas des relations trophiques dont, par exemple, la co-évolution entre les bactéries associées à la biodégradation de la biomasse végétale et celle de leurs substrats végétaux. Les macromolécules les plus abondantes synthétisées par les végétaux sont des assemblages d'oses, les polysaccharides. Ces derniers diffèrent par la nature de leurs monomères constitutifs, le type des liaisons glycosidiques qui composent la chaîne carbonée et la nature des modifications sur ces chaînes (ramifications, substitutions...). Au total, la diversité chimique de ces molécules est très élevée chez les végétaux (et plus encore dans le monde bactérien, où elle trouve son origine première). Pour dégrader cette biomasse carbonée en oses simples, qui peuvent être ensuite réutilisés comme source de nourriture, les bactéries disposent d'une très grande variété d'enzymes, essentiellement hydrolytiques, les glycoside-hydrolases. On compte aujourd'hui plus d'une centaine de familles de glycoside-hydrolases, classifiées en fonction des similitudes de leurs séquences et de leurs structures (<http://www.cazy.org/>).

L'analyse des relations entre la structure de ces protéines et leur spécificité de substrat montre que, à mesure que les végétaux ont inventé de nouveaux polysaccharides, les bactéries ont adapté leur arsenal enzymatique pour tirer profit de cette biomasse carbonée. La famille structurale n°16 est l'un des exemples les mieux documentés de la coévolution entre les glycoside-hydrolases et leurs substrats. Cette famille structurale regroupe, en effet, un grand nombre de polysaccharidases, qui dépolymérisent une grande variété de substrats. Ainsi, ces enzymes coupent les liaisons β -(1,3) dans la laminarine, un β -(1,3) glucane, et les liaisons β -(1,4) dans le lichénane, un β -(1,3-1,4) glucane, ainsi que dans les hémicelluloses, un β -(1,4) xylo-glucane, les agars et les k-carraghénanes, des β -(1,4)- α -(1,3) galactanes. Ces derniers sont des polysaccharides gélifiants produits en abondance par les algues rouges à partir desquelles ils sont manufacturés en vue d'utilisations très diverses, en particulier dans les industries agro-alimentaires. Les

⁵ Van Valen, *Evolutionary Theory*, 1, 1-30, 1973

agars et les k-carraghénanes sont des polysaccharides homologues, qui ne diffèrent essentiellement que par l'isomérisation D/L des unités galactose liées en α dans leur chaîne carbonée.

La laminarine est un polysaccharide très ancien, présent dans la plupart des lignées végétales (Michel et coll., 2010)⁶. En nous appuyant sur le fait que les laminarinases sont présentes dans de très nombreuses lignées procaryotes ou eucaryotes, nous pensons que ces enzymes sont également très anciennes (Barbeyron et coll., 1998)⁷. Il est probable donc que la protéine ancestrale à l'origine de la famille 16 avait, originellement, une activité laminarinase. Par ailleurs les agarases et les k-carraghénases sont très proches phylogénétiquement. Or, nous savons que les algues rouges qui produisent l'agar (agarophytes) ont donné naissance à celles qui produisent les carraghénanes (carraghénophytes) et pas l'inverse. Il résulte de tout cela que les agarases sont issues d'une activité laminarinase et qu'elles ont à leur tour donné naissance aux k-carraghénases, lorsque les k-carraghénanes sont apparus au cours de l'évolution des algues rouges (Barbeyron et coll., 1998).

Les glycoside-hydrolases sont très souvent munies de modules qui leur permettent de s'attacher à leur substrat cible, augmentant par là l'efficacité de la dégradation de la chaîne carbonée. Ces modules non catalytiques, initialement découverts chez les cellulases, sont dénommés CBM (« carbohydrate binding modules », modules de liaison aux glucides). Ces CBM sont regroupés en 53 familles différentes. Ceux que l'on trouve dans la famille 16 des glycoside-hydrolases appartiennent majoritairement à la famille 6 des CBM. L'analyse phylogénétique de ces CBM6 montre qu'ils ont divergé en différents clades, qui coïncident exactement avec leur spécificité enzymatique. Cette remarquable congruence entre les deux phylogénies, celle des domaines catalytiques et celle des modules non catalytiques, montre que les glycoside-hydrolases et les CBM qui leur sont associés ont co-évolué strictement pour acquérir la même spécificité de substrat (Michel et coll. 2009)⁸.

La famille GH16 est également au cœur d'une découverte récente, qui montre que l'espèce humaine elle-même recèle une diversité inter-populationnelle dans sa capacité à dégrader, à partir de sa flore microbienne intestinale, les polysaccharides présents dans sa nourriture. Certaines des enzymes de la famille GH16 sont de fonction inconnue, en ce sens que leur spécificité enzymatique fine est incertaine. Nous nous sommes ainsi intéressés à deux GH16 du système agarolytique de la flavobactérie marine *Zobellia galactanivorans*. Les analyses biochimiques et structurales ont montré que ces enzymes sont des agarases d'un genre particulier, qui dégradent les porphyranes. Ces polysaccharides sont des agars sulfatés, très répandus chez les algues rouges et initialement décrits chez les espèces du genre *Porphyra*. Ces algues marines, en particulier *P. tenera* et *P. yezoensis*, sont très cultivées au Japon, où elles entrent, sous le nom de « nori », dans de nombreuses préparations alimentaires, tels que les « sushi ».

La recherche de séquences apparentées aux porphyranases dans les banques de données indique ensuite que ces enzymes sont présentes dans de nombreuses bactéries marines. De façon très surprenante, elles sont aussi présentes dans la

⁶ Michel et coll., *New Phytol.*, sous presse, 2010

⁷ Barbeyron et coll., *Mol. Biol. Evol.*, **15**, 528-537, 1998

⁸ Michel et coll., *Glycobiology*, **19**, 615-623, 2009

bactérie intestinale de l'homme, *Bacteroides plebeius*. Toutefois, cette bactérie ne se trouve que dans la microflore intestinale des Japonais, pas dans celle des Européens ou des Américains, dont les *Bacteroides* ne renferment pas de porphyranases. Il s'agit donc vraisemblablement, chez *Bacteroides plebeius*, d'un transfert latéral de gènes à partir des bactéries marines associées au nori. Cette observation souligne l'influence du régime alimentaire sur l'évolution du microbiome intestinal chez l'Homme (Hehemann et coll., 2010)⁹.

En conclusion, l'exemple des diverses polysaccharidases qui composent la famille 16 des glycoside-hydrolases montre que la biodiversité des microorganismes qui dégradent la biomasse végétale est calquée sur celle des végétaux. Au cours de l'évolution des végétaux et de l'apparition d'une diversité de plus en plus grande de macromolécules glucidiques, les microorganismes se sont adaptés à la disponibilité de nouveaux substrats carbonés par une spéciation fine de leur arsenal enzymatique, permettant ainsi l'utilisation de ces nouveaux substrats.

Les services écosystémiques rendus par ces bactéries vont jusqu'à inclure l'écosystème très particulier qu'est la flore intestinale de l'homme, où elles dégradent des polysaccharides que l'homme ne peut digérer par lui-même. Les Japonais consomment des algues rouges depuis 2000 ans au moins. Le transfert de gènes d'une bactérie marine à la bactérie entérique *Bacteroides plebeius* est néanmoins un événement récent à l'échelle de l'évolution. C'est pour cette raison que ce transfert horizontal est encore très visible dans le génome de *B. plebeius*. Même s'ils ne sont plus aussi apparents aujourd'hui que dans ce cas très particulier, il est probable que de tels transferts ont eu lieu à maintes reprises au cours de l'évolution des Primates, de leur régime alimentaire et de la microflore intestinale qui leur était associée.

1.4. L'homme fait-il partie de la biodiversité ?

Jean-François Bach (Membre de l'Académie des sciences)

L'importance cruciale de la biodiversité chez l'homme. La diversité des êtres humains est considérable, il n'existe pas deux individus identiques parmi les 6 milliards d'habitants de la planète. Même les vrais jumeaux, qui partagent pourtant le même ADN, ne sont pas identiques tant, bien sûr, pour ce qui concerne la pensée ou le comportement que pour des paramètres objectifs tels que des constantes biologiques ou même les empreintes digitales. Deux vrais jumeaux se ressemblent plus que deux frères ou sœurs ordinaires et encore plus que deux individus non apparentés. Les nombreuses différences qui sont cependant observées peuvent être dues à l'interaction avec l'environnement ou à des modifications biochimiques de l'expression des gènes, ce qu'on appelle aujourd'hui l'épigénétique. L'environnement peut prendre des formes très diverses. Il peut s'agir de l'environnement physique, chimique ou alimentaire au sens où l'entendent les écologistes. Il peut aussi s'agir, de façon plus large, des comportements ou des pratiques telles que les addictions (tabac ou alcool). Il peut enfin s'agir de l'influence de l'éducation, des conditions

⁹ Hehemann et coll. *Nature*, **464**, 908-912, 2010

socio-économiques ou du milieu culturel. L'épigénétique recouvre un ensemble de processus biochimiques variés incluant en particulier la méthylation de l'ADN, l'acétylation et l'ubiquitination des histones. Ces réactions chimiques ne modifient pas la séquence primaire des gènes mais altèrent, de façon positive ou plus souvent négative, leur niveau d'expression. Les facteurs contrôlant les modifications épigénétiques sont encore mal connus mais semblent pouvoir faire intervenir l'environnement comme l'indiquent les différences observées dans les marques épigénétiques chez deux vrais jumeaux et cela d'autant plus qu'ils ont été élevés séparément.

Fait important, la diversité des êtres humains est, pour une grande part, secondaire à des migrations géographiques, illustrée bien sûr par les différences morphologiques entre les ethnies, mais retrouvée dans de nombreux marqueurs génétiques tels que les antigènes HLA décrits par Jean Dausset (Membre de l'Académie des sciences, Prix Nobel de Médecine, 1916-2009). En fait, il existe pour la plupart des protéines humaines des variants allotypiques que l'on retrouve sous différentes formes chez chaque individu, qui correspondent à des polymorphismes du gène codant pour la protéine en question. Ces polymorphismes peuvent être à l'origine, dans certains cas mais cela n'est pas la règle, de variations dans les propriétés fonctionnelles de la protéine. Ainsi, tant au niveau des gènes qu'à celui des protéines, il apparaît que chaque être humain est unique, défini par la multitude de ses polymorphismes.

Il est important d'évoquer les mécanismes par lesquels la biodiversité est engendrée au sein d'une même famille dont tous les frères et sœurs ont un patrimoine génétique issu de deux parents qui leur ont chacun transmis la moitié de leur génome. Le rôle du hasard est important à travers la méiose (formation des ovules et des spermatozoïdes) et des recombinaisons chromosomiques (crossing-over). S'y ajoute le rôle mentionné plus haut de l'environnement, conçu au sens large, et de l'épigénétique.

La biodiversité des hommes, fondée sur la diversité des individus biologiques qui s'intègre étroitement avec la diversité culturelle, représente un moteur essentiel de l'évolution des espèces et des civilisations. C'est la diversité génétique qui a permis l'évolution des espèces par laquelle les individus les moins aptes à survivre, en particulier à résister aux maladies infectieuses ou à la faim, ont été éliminés par sélection naturelle au cours des millions d'années qui nous ont précédées, mais aussi la richesse de la diversité culturelle et, de façon plus inattendue, la protection contre certaines maladies.

La réduction de la diversité génétique, conséquence des mariages entre cousins germains, longtemps largement pratiqués dans certains pays méditerranéens, est à l'origine d'une augmentation importante de la fréquence des maladies génétiques récessives. Des souris de laboratoire de souche pure qui présentent une beaucoup plus faible diversité génétique que les souris "sauvages" ont une santé souvent déficiente.

En bref, la biodiversité est un élément intégral de l'espèce humaine, une véritable nécessité pour le maintien et le développement harmonieux de l'espèce.

1.4. L'homme fait-il partie de la biodiversité ? (suite)

Bernard Bourgeois (Membre de l'Académie des Sciences Morales et Politiques)

Le moment humain de la biodiversité. L'affirmation de la biodiversité n'en fait un objectif que parce qu'elle n'est pas ou plus réalisée comme elle devrait l'être, par la faute de l'homme, dès lors capable de restaurer ce qu'il a lui-même détruit. Cela, dans une nature qui, délivrée depuis longtemps des gigantesques catastrophes bouleversant sa diversité finalement rétablie en un équilibre apaisé, constituait, pour l'humanité également, un habitat fécond. Dans la biodiversité naturelle, c'est donc bien lui aussi que l'homme peut détruire, puisqu'il fait partie d'elle, d'abord comme l'une des espèces naturelles.

L'espèce humaine avait, même en sa spécification non naturelle mais proprement humaine, noué, avec les autres espèces, végétales et animales, des relations vivantes et vivifiantes, en reconnaissant, accroissant et promouvant leur diversification et distinction. Un brin d'éthologisme exotique me fait ainsi évoquer tel éleveur bressan de volailles qui, encore aujourd'hui, parle à celles-ci le matin en les visitant et tient qu'elles s'en trouvent mieux, ou les paysans de mon enfance qui conversaient entre eux en patois, mais s'adressaient toujours en français à leur cheval, le noble animal. Cependant, le moment humain de la diversité biologique, qui cultivait ainsi traditionnellement celle-ci, est aussi celui qui, dans la modernité, en sacrifie la riche variété à travers la surexploitation technique abstraitement homogénéisante et appauvrissante du milieu naturel.

L'homme oublie alors que c'est pourtant bien encore ce milieu, comme ancrage fortifiant de l'esprit – pourtant en soi infiniment élevé, même en sa finitude, au-dessus de toute nature, même la plus harmonieuse et belle –, qui conditionne son élévation effective réussie. Il oublie en particulier que l'unification de l'existence qu'est l'esprit est d'autant plus réelle et intense qu'elle est stimulée, irritée, par une diversité provocatrice dont la source première est la luxuriance spatio-temporelle sensible de la nature.

Diversement attaquée par les hommes absorbés en leur intérêt local, la biodiversité presque partout dégradée n'est restaurable – et comme condition même de leur humanisation universelle – qu'à leur initiative universelle et par un traitement universel d'elle-même. L'affirmation pratique de cette biodiversité est bien, de nos jours, un acte programmé total de l'humanité en ses instances mondiales. Mais cet agir total de l'humanité totale, sollicitant totalement son esprit, sur le tout de son milieu naturel qui les conditionne en leur existence comme des moments de lui-même, ne peut réussir que si une telle humanité sait faire, par son art, se mobiliser la nature elle-même contre son altération humaine, en sa puissance de diversification équilibrée ; l'esprit ne commande bien à la nature qu'en lui obéissant. En se faisant ainsi l'incitatrice, la médiatrice, de l'auto-réparation de la biodiversité naturelle, l'humanité se constitue donc, en un nouveau sens, comme moment ou "partie" de cette biodiversité reconstructrice de soi, bien loin de prétendre vainement se poser en maîtresse abstraite, ici positive, de la puissance de la nature.

Mais l'art humain ne peut s'insérer efficacement dans la vie de la nature, totalisation, due à l'unité de la Terre sphérique, de sa diversité par là assurée en elle-même, qu'en développant une action restauratrice de cette diversité terrestre qui soit à la

fois universelle (projet global) et singularisée suivant les éléments d'une telle diversité (application spécifiée et locale du projet). Or, l'établissement et la réalisation d'une entreprise aussi totalisante, à la fois identifiante et différenciée, est d'une extrême difficulté. Car la puissance de la nature est incommensurable relativement à l'art humain, même le plus savant et le plus performant. Sans compter que cet art doit être animé par un volontarisme présent universellement dans l'humanité, ce qui n'est encore guère le cas dans la mondialisation souvent conduite par les égoïsmes. Mais ici, dans son rapport à elle-même qui conditionne ainsi son rapport à son milieu naturel, l'humanité se montre, en tout sens, excéder la biodiversité affirmée par elle.

En effet, si l'homme est une espèce naturelle et si, à l'intérieur de celle-ci, il existe des races et, comme diversité ultime et radicale, des individus, une telle diversité biologique *conditionne* bien, mais ne *détermine* pas l'existence supra-naturelle, culturelle et personnelle proprement humaine. L'éducation suppose et renforce bien la liberté à l'égard de la nature travaillée par l'esprit. L'homme maîtrise et possède, *a* – au lieu d'être rivé à elle et de l'être – sa nature, et la diversité liée à celle-ci ; on peut dès lors dire que la diversité est en lui plutôt qu'il n'est en elle. Il en dispose ainsi, peut la limiter ou la nier, et, s'il l'affirme, son naturalisme ne procède pas de la nature, mais de son libre vouloir. Si, de la sorte, la thèse naturaliste nie l'esprit par son contenu, elle nie la simple nature par son existence même. La reconnaissance comme un fait de la diversité biologique humaine ne saurait donc signifier l'adhésion à un quelconque différentialisme naturaliste, raciste ou eugéniste, qui relève de la libre absolutisation de cette diversité comme valeur suprême.

Cette mise au point anti-naturaliste étant faite, l'attribution d'une valeur à la *diversité* naturelle, aussi dans l'environnement bio-physique de l'homme, condition de toute son existence, également spirituelle, peut inciter à apprécier positivement, comme son achèvement et dépassement humain, la diversité *culturelle* des communautés. Il ne s'agit aucunement, ici, de compromettre l'objectif suprême d'une universalisation réconciliante de l'humanité avec elle-même, mais, tout au contraire, d'assurer sa réalisation concrète. Au plus loin de tout universalisme abstrait incapable de mobiliser les hommes, toujours engagés dans des cultures particulières, l'affirmation réelle de l'humanité une doit s'assumer de l'intérieur dynamisant de celles-ci. Se mettant alors à distance réfléchie, voire critique, d'elles-mêmes, chacune selon son style propre, elles promeuvent de façon concertante leur revendication commune et originale d'une seule et même humanité. C'est bien l'unité spirituelle réalisée comme telle de l'humanité – aussi à venir – qui est la fin ou le principe de l'agir, mais une telle unité n'est effective qu'en se faisant affirmer par les différences culturelles se différenciant d'elles-mêmes sous l'injonction de la raison humaine une et unique.

Or, l'homme sait que tout ce qu'il est, même esprit, n'est qu'autant que cela s'inscrit dans une nature. Si le naturalisme nie l'esprit, l'esprit n'est qu'en se naturalisant : la négation même de la nature n'est réelle, et pas seulement prétendue, qu'en tant que naturée. Puisque la nature est expansion différenciante, l'esprit, qui universalise, réconcilie l'existence, ne peut le faire qu'en assumant l'exigence d'une telle différenciation ou diversification dans sa création d'unité. Mais alors, la prise en charge universalisante par lui de sa diversité culturelle implique la sauvegarde *elle-même diverse* – même à l'intérieur d'un indispensable projet mondial – de la biodiversité naturelle qui conditionne – même à travers la négation opérée d'elle – la seconde nature qu'est cette diversité culturelle. Car l'uniformisation elle-même mondialisée du traitement, alors menacé d'abstraction, de la diversité biologique, par des groupes humains négligeant l'ancrage culturel original, seule garantie

d'efficience, de leur responsabilité écologique locale, ne peut que nuire à la défense optimale, en chaque endroit de la planète, du milieu naturel un de l'humanité une.

Une philosophie de la naturalisation, naturation ou incarnation de l'esprit comme pouvoir d'unification de la vie humaine, reconnaîtra que la biodiversité naturelle doit être restaurée, aussi naturellement que possible, comme le lieu de vie ordonné à l'esprit réconciliateur des hommes. L'homme ne se fait un moment d'une telle biodiversité qu'autant qu'il fait de celle-ci un moment de son humanité qui s'accomplit.

1.4. L'homme fait-il partie de la biodiversité ? (suite)

Edgardo D. Carosella (Correspondant de l'Académie des sciences)

La biodiversité est présente dans l'ensemble du monde vivant et définit la diversité naturelle des organismes et la dynamique des interactions dans et entre les différentes espèces. L'homme fait partie de cette biodiversité et, parmi les espèces vivantes, il est celui qui a la plus grande diversité, d'où son unicité. Ainsi, on peut identifier chez l'homme trois niveaux différents de diversité : génétique, phénotypique et ontogénique.

D'abord, génétiquement, l'homme est unique et ceci est valable pour tous les êtres vivants à reproduction sexuée qui, par définition, donnent naissance à un descendant par union des gènes de ses parents. Néanmoins, au moment de la méiose, processus qui donne naissance aux gamètes, chaque ovule, chaque spermatozoïde contient, parmi de très nombreuses combinaisons possibles une combinaison des gènes du parent, ce que l'on appelle le brassage "inter-chromosomique" ; en outre s'y ajoutent, pendant la méiose (*crossing over*), des échanges de fragments de gènes entre chromosomes, ce que l'on appelle le brassage "intra-chromosomique". Au total, ces processus sont à la source de l'immense diversité des combinaisons pour donner naissance à un nouvel individu. Cependant, un certain nombre des gènes ne sont pas exprimés (transcrits en protéines) ou encore leur expression a subi des mutations préalables. C'est pour cela que nous devons atteindre le deuxième niveau qui concerne les phénotypes.

Ce deuxième niveau s'adresse aux caractéristiques physiques de l'individu. Ceci paraît évident pour notre apparence, mais l'est encore davantage du point de vue moléculaire. L'une des plus importantes manifestations phénotypiques de la biodiversité humaine, qui régit les lois de la transplantation d'organes, est le système HLA (*Human Leukocyte Antigen*). En effet, le nombre de combinaisons rendues possibles par le nombre de molécules HLA existantes est 2,8 fois supérieur au nombre d'êtres humains sur la terre. La possibilité de trouver deux individus identiques est donc quasiment impossible, à l'exception des vrais jumeaux (jumeaux monozygotes). Le système HLA constitue donc une vraie carte d'identité biologique de l'individu dans la biodiversité de l'espèce humaine. Néanmoins si nous considérons seulement la biodiversité des points de vue génétique et phénotypique, nous ne pouvons pas expliquer pourquoi de vrais jumeaux (génétiquement et phénotypiquement identiques) peuvent être différents.

C'est ainsi que nous devons passer au troisième niveau, l'ontogenèse, pour trouver l'unicité de l'individu à l'intérieur de cette grande diversité de l'espèce humaine. L'ontogenèse désigne habituellement le développement progressif d'un organisme ; cependant nous emploierons ici ce terme pour désigner le processus par lequel l'organisme se construit dans le temps. Ceci concerne, d'une part, le système immunitaire qui, en fonction des antigènes qu'il rencontre, va se construire et se différencier. C'est la rencontre de l'individu avec la diversité antigénique qui induira la production d'anticorps très divers et de cellules mémoires. La constitution du système immunitaire dépendra de l'environnement dans lequel il évoluera au cours du temps. Il donnera lieu à un profil immunologique, caractéristique pour chaque individu, et qu'il gardera en mémoire. Chacun aura son propre profil ; même de vrais jumeaux, génétiquement et phénotypiquement identiques, ne seront pas immunologiquement semblables.

L'ontogenèse concerne également le système nerveux car nos connections neuronales, déjà très nombreuses et très complexes à la naissance, se construisent tout au long de notre vie et sont étroitement dépendantes de notre environnement, autrement dit, des stimulations que nous recevons. Comme le système immunitaire, le système nerveux est le produit d'une construction individuelle à travers le temps et chaque individu reste unique par les connections neuronales élaborées au cours de sa vie.

Malgré cette très grande biodiversité des individus, nous savons pourtant que deux êtres humains sont à 99,9% génétiquement semblables, c'est-à-dire que sur les 3 milliards d'unités de base qui composent l'ADN, 3 millions seulement diffèrent d'un individu à l'autre.

Certes, nous sommes uniques, comme nous venons de le montrer, et cette unicité constitue la base de notre polymorphisme qui donne toute sa force à l'espèce humaine, mais dans cette diversité, nous sommes aussi tous semblables. La question que l'on peut se poser est de savoir si c'est la différence ou la ressemblance qui prédomine. Si c'est la ressemblance, alors le risque serait que notre identité manque de relief dans toutes ses manifestations culturelles, artistiques et sociales, l'individu étant fondu dans la masse. Si, au contraire, l'individualité domine en nous, si nous privilégions la différence, le risque serait que nous puissions être amenés à un désintérêt envers l'autre et à un repliement sur soi. Dans cette contradiction de la biologie contemporaine, l'erreur est justement de considérer que notre diversité est seulement biologique car elle se trouve aussi dans notre être, dans notre liberté et dans l'universalité de notre raison.

1.4. L'homme fait-il partie de la biodiversité ? (suite)

Laurent Degos (Correspondant de l'Académie des sciences)

Pourquoi l'Homme échapperait-il à la loi générale de la Nature qui a toujours fait évoluer les éléments vivants vers plus de diversité ? Il est vrai qu'Emmanuel Kant avait décelé ce dilemme de la double position de l'Homme, à la fois dans la Nature, répondant aux lois naturelles, et hors de la Nature, n'étant pas rejeté lorsqu'il est inutile mais toujours respecté quel que soit son état.

Les hommes sont tous différents hormis les vrais jumeaux et cela est évident. Cette diversité d'apparence est soutenue par une diversité des caractères de nos cellules. Jean Dausset, Prix Nobel 1980, a découvert une "empreinte digitale" sur la surface de nos cellules, le système HLA, dont la diversité encore appelée polymorphisme, est un obstacle à toute greffe d'organes ou de tissus. Cette diversité est apparue comme encore plus étonnante lorsque le génome a été séquencé ; de ce fait la police se sert de cet outil pour instruire des enquêtes. Mais tout cela est commun à tout être vivant. L'homme est dans la Nature et fait partie de la biodiversité.

Un pas de plus est franchi entre l'organisation du cerveau humain et la pensée. Entre le substrat anatomique et fonctionnel du cerveau, et la pensée qui distingue l'homme des autres éléments de la Nature, se situe le passage entre "dans la Nature" et "hors de la Nature". Cela va-t-il à l'encontre de la biodiversité ? Non, cela en est très probablement un élément supplémentaire. Ce n'est donc pas dans cette direction que se situe la discussion.

La Nature nous révèle la capacité d'évolution et d'adaptation du monde vivant, tout en respectant un ordre préservant les espèces et les membres de l'espèce. Le moteur de la diversité est la flexibilité du génome lors de chaque naissance ; la sélection naturelle exerce un contrôle et élimine les éléments défavorables. Cependant la génétique des populations nous enseigne que la sélection naturelle n'a que deux emprises pour faire évoluer l'espèce. La première est la mortalité avant l'âge de procréation ; or, depuis deux générations il n'y a presque plus de mortalité avant 40 ans dans les trois quarts de la population mondiale. La deuxième est la variabilité de la taille des familles et là encore ces mêmes populations ont entre 1 et 3 enfant(s) par famille. La sélection naturelle ne s'exerce plus sur la plupart des populations.

Le mouvement écologiste apparaît à ce moment et dans les populations qui ne connaissent plus de sélection naturelle, et prend une place prépondérante dans les esprits de chacun. La Nature n'est plus consubstantielle de l'Homme puisque l'Homme ne suit plus ses lois, elle est à côté comme une tierce personne qu'on aime et qu'on respecte. D'une union Homme Nature nous allons vers une relation Homme Nature. D'une absence de préoccupation puisque nous étions dans la Nature soumis à ses lois, nous avançons dans la précaution vis-à-vis de la Nature, devenant indépendants de ses lois. La recherche d'une adaptation artificielle à tous les écarts, présents et surtout futurs, entre l'Homme et son environnement, est une autre conséquence de cette modification. L'Homme qui s'est détaché de la sélection naturelle, garde tout élément constitutionnel nouveau de son espèce, et accroît sa diversité par l'incorporation des défauts qui auraient dus être éliminés, ce qui l'éloigne d'autant de la Nature. Ces mutations qui peuvent à un moment être considérées comme défauts, sont potentiellement utiles dans le futur. La diversité accrue devrait protéger l'espèce humaine face aux cataclysmes.

En accord avec les préceptes d'Emmanuel Kant, l'Homme refuse les lois naturelles d'élimination de groupes ou d'individus inadaptés. Libéré de la sélection naturelle et de la pression utilitaire, il est doublement hors de la Nature et laisse évoluer sans bride sa diversité. L'Homme doit alors relever un défi : face à cette diversité accrue et non contrôlée, il est dans l'obligation de s'adapter à son environnement par son intelligence et de réparer les défauts émergents de sa constitution par la médecine. Est-ce aussi pour cela qu'il cherche à figer l'environnement, défendant le principe de précaution ?

1.5. Que peut-on dire de la diversité des langues et de leur risque d'extinction ?

Gilbert Lazard (Membre de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres)

La diversité des langues est l'effet de leur évolution naturelle. Toutes les langues sont en perpétuelle évolution, sous l'effet d'une multitude de facteurs internes et externes.. Lorsque des parties d'une population parlant la même langue perdent le contact, par émigration ou autrement, elles en arrivent, au bout d'un certain temps, à parler des langues différentes. C'est ainsi, par exemple, que les diverses langues romanes, "viennent", comme on dit, du latin. En vérité, elles n'en viennent pas : le français, l'italien, l'espagnol, le portugais, le roumain *sont* le latin tel qu'il est devenu au cours des siècles en évoluant diversement en Italie, en Gaule, dans la péninsule ibérique et dans les Balkans. Lorsque, lors de la dissolution de l'empire romain, les relations entre ces différentes régions se sont détendues, puis anéanties, la langue latine, qui devait être à l'origine à peu près la même partout, a pris progressivement des formes différentes.

Ce phénomène est universel. Les linguistes ont ainsi identifié dans le monde des dizaines de "familles de langues", une famille étant constituée de langues dont on démontre qu'elles dérivent d'un même idiome originel. La plus connue et la plus étudiée est celle des langues dites indo-européennes, qui comprend de nombreux rameaux, roman, germanique, slave, hellénique, indo-iranien, etc. On a pu, par la comparaison, reconstituer certaines caractéristiques de la langue originelle, qu'il faut situer peut-être environ six mille ans avant notre époque. La famille chamito-sémitique est d'ancienneté au moins égale. Au delà, l'origine des langues et de leur diversité se perd dans la nuit des temps.

Le phénomène antagoniste de la diversification est la force de cohésion au sein d'une communauté linguistique. Elle prend sa source dans les nécessités de la communication entre ses membres. Le besoin de compréhension mutuelle limite les innovations et canalise l'évolution. La langue change constamment, et les changements peuvent être sensibles dans le temps d'une vie d'homme, mais ils ne sont jamais, au sein d'une même communauté, ni assez rapides ni assez massifs pour empêcher l'intercompréhension.

Cela dit, la situation varie beaucoup selon la dimension de la communauté. Dans les régions du monde où les hommes vivent dans des conditions relativement archaïques, par exemple en Amérique du Sud ou en Afrique subsaharienne, il existe de très nombreuses langues, usitées chacune par un petit nombre d'individus. Ailleurs, et aussi là même à l'époque moderne, se sont constituées de "grandes" langues, langues véhiculaires, langues nationales, langues internationales, langues de culture. Leur unité est relative, car elles sont diversifiées en variétés dialectales, niveaux d'usage, idiomes spécialisés, etc. Mais elle est préservée par l'abondance des relations et entretenue notamment par l'usage de l'écriture et des autres moyens de communication.

On évalue le nombre des langues du monde à quelque cinq ou six mille, évaluation très approximative, car la distinction entre langue et dialecte est très relative. Mais beaucoup de langues sont aujourd'hui en voie d'extinction. Car les langues peuvent mourir. Une langue meurt lorsque le dernier locuteur s'éteint : c'est ainsi que la langue oubykh étudiée par Georges Dumézil, qui fut parlée dans le Caucase

occidental, est morte le 7 octobre 1992 avec le dernier vieillard qui la savait. La disparition d'une langue se mesure sur trois générations : la première la parle couramment, la deuxième la comprend, mais n'en use pas, la troisième l'ignore.

Cette disparition s'opère soit par suite de celle de la population des locuteurs, soit, plus souvent peut-être, sous la pression d'une langue dominante, qu'ils adoptent. La plupart des langues des aborigènes australiens sont en grand danger d'être éliminées par la concurrence de l'anglais. Diverses langues amérindiennes mentionnées par les voyageurs des siècles passés sont aujourd'hui disparues, ceux qui les parlaient ayant été massacrés et/ou leurs descendants étant passés à l'anglais ou à l'espagnol. Beaucoup d'autres "petites" langues, un peu partout dans le monde, y compris en Europe, semblent vouées à disparaître dans un avenir proche.

Faut-il le regretter? Les linguistes le regrettent, parce qu'ils y perdent une utile documentation. La diversité est pour eux une richesse, car c'est par la comparaison de langues aussi différentes que possible qu'ils peuvent découvrir des lois de la constitution des langues. La mort d'une langue originale et sans parenté est pour eux une perte irréparable. Des organisations spécialisées s'emploient à favoriser la description des langues moribondes.

Plus important sans doute : la mort d'une langue est aussi celle d'une culture. Les rapports entre langue et culture sont complexes et discutés. Mais toute langue est assurément porteuse d'une part de la culture du peuple qui la parle. S'il est vrai *grosso modo* que toute chose peut se dire en toute langue, on ne pense pas exactement de la même façon dans une langue et dans une autre : les écrivains bilingues le savent bien. Si le contact des cultures et des langues est en principe bénéfique, la substitution d'une langue à une autre est toujours un appauvrissement.

La multiplication actuelle des relations à l'échelle du monde suscite la diffusion rapide de quelques grandes langues, surtout l'anglais. Même d'autres grandes langues, comme le français, sont menacées, non de disparaître, mais de s'appauvrir. C'est un danger dont il faut prendre conscience pour s'en défendre. De même que l'internationalisme n'exclut pas l'attachement à la patrie, de même la mondialisation n'implique pas nécessairement l'étiollement des langues et des cultures locales.

2. Quelle est l'importance écologique de la biodiversité ?

2.1. Un niveau suffisant de biodiversité est-il nécessaire au fonctionnement du monde vivant actuel ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

Sous son apparente simplicité, cette question se révèle, à l'examen, extrêmement complexe. Sans doute est-il possible de distinguer des espèces dont la disparition conduit à des effondrements plus ou moins rapides de systèmes écologiques plus ou moins vastes : "espèces ingénieur" comme les vers de terre, "espèces clés de voûte" comme certains grands prédateurs, "espèces parapluie" aux larges besoins d'espace. Que dire cependant des autres espèces – moins remarquables mais infiniment plus nombreuses ? Certaines peuvent-elles disparaître sans dommage ?

Peut-on imaginer des écosystèmes ramenés à quelques espèces indispensables mais suffisamment fonctionnels pour, par exemple, lancer des voyages interplanétaires au long cours ou fonder des colonies extraterrestres ? Combien d'espèces faudrait-il retenir dans ces arches de Noé modernes ?

La question d'un niveau de biodiversité nécessaire au fonctionnement du monde vivant actuel, appelle plusieurs remarques. D'abord, la réponse n'est pas la même selon que la biodiversité est conçue comme un simple indice de richesse spécifique, c'est-à-dire du nombre d'espèces présentes dans un espace géographique donné, ou conçue comme un indice complexe de la manière dont ces espèces sont plus ou moins également représentées – c'est-à-dire un indice des proportions relatives atteintes dans les assemblages d'espèces. La réponse sera encore différente s'il s'agit de diversité génétique ou spécifique, ou s'il s'agit de la diversité de la mosaïque des milieux naturels au sein d'un paysage.

L'échelle envisagée est elle-même cruciale, comme toujours en écologie : le monde vivant concerné peut être celui d'un champ de blé, d'une commune rurale, d'une région, d'un continent ou de la planète Terre. Un hydrobiologiste pourra par exemple considérer le monde vivant d'un banc de galets, d'un secteur de rivière, d'un bassin versant ou de l'ensemble d'un réseau hydrographique ; un forestier, celui d'un arbre mort, d'une clairière, d'une parcelle ou d'une forêt entière.

D'une manière générale toutefois, l'idée paraît bien établie d'une relation positive entre richesse spécifique et fonctionnement des écosystèmes. Ainsi une augmentation du nombre d'espèces présentes correspond-elle à une productivité plus élevée en prairie, à une décomposition plus rapide de matière organique en forêt ou en rivière, à une moindre perte d'éléments nutritifs dans les sols. Ce constat amène à l'idée d'une complémentarité entre les espèces, ce qui leur permettrait d'utiliser une plus large part des ressources disponibles, élevant en conséquence les taux de productivité (ou de décomposition, ou de recyclage des éléments nutritifs). Il amène aussi à l'idée que, par leur présence, certaines espèces peuvent faciliter le rôle joué par d'autres espèces dans l'écosystème, certaines plantes aquatiques favorisant par exemple le développement d'algues microscopiques en leur offrant leurs surfaces foliaires comme substrat, élevant par la suite les taux de productivité ou de décomposition.

On notera encore que cette relation positive entre richesse spécifique et fonctionnement écologique peut résulter d'un biais d'échantillonnage : plus les espèces d'un assemblage sont nombreuses, et plus ce dernier a de chances de comprendre une espèce hautement productive. Et les communautés riches en espèces peuvent en moyenne être plus productives simplement parce qu'elles ont plus de chances de comprendre une espèce hautement productive : une monoculture de cette dernière espèce ne serait pas moins productive qu'une culture plurispécifique comprenant cette espèce.

Ces diverses explications ne s'excluent pas. Elles soulignent simplement la complexité des rapports entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes et la difficulté de toute prévision à leur égard. Car la biodiversité actuelle résulte d'une très longue histoire, celle de l'évolution d'un monde vivant qui se modifie sans cesse de génération en génération, au fil du temps. Dans cette perspective, la question "un niveau suffisant de biodiversité est-il nécessaire au fonctionnement du monde vivant actuel" n'a de sens que si elle prend en compte les possibilités d'évolution face aux

transformations à venir de notre environnement. Ces transformations sont imprévisibles dans l'espace et dans le temps. Face à cette imprévisibilité, le monde vivant est un monde en évolution et sa biodiversité est la seule force capable de libérer ses facultés d'invention face à un environnement incertain. En ce sens, toute espèce vivante peut se révéler un jour essentielle, et sa disparition une perte irréparable, aux différents niveaux des gènes, des espèces et des écosystèmes.

2.2. Quels sont le rôle et l'importance de la diversité des microorganismes ?

Eric Karsenti (Correspondant de l'Académie des sciences)

Qu'entend on par microorganismes? Ce sont des organismes ayant une taille comprise entre quelques microns et au maximum 1 millimètre. Cela représente des milliers sinon des millions d'organismes et d'espèces différentes. Des virus aux bactéries en passant par les protistes (des organismes unicellulaires assez complexes) et certains organismes multicellulaires de très petite taille.

Ces organismes existent sur terre, dans les rivières et les lacs mais aussi en grande quantité dans les océans. Certains vivent en symbiose avec les animaux et les plantes. Par exemple nous digérons nos aliments grâce à la "flore intestinale" qui est largement composée de bactéries. Les ruminants aussi digèrent l'herbe qu'ils mangent grâce à des bactéries spécifiques. Les polypes qui construisent les récifs coralliens ont besoin d'une algue unicellulaire photosynthétique (la zooxanthelle) qui vit à l'intérieur de leur cytoplasme et leur fournit des nutriments en utilisant la lumière solaire.

Les bactéries et les algues unicellulaires jouent un rôle particulièrement important dans l'économie générale de notre planète en formant la base des chaînes alimentaires mais aussi en recyclant pratiquement toute la matière organique de la planète.

Par exemple, les bactéries photosynthétiques et les algues unicellulaires présentes dans les océans produisent près de 50 % de l'oxygène de notre atmosphère et sont à la base de la chaîne alimentaire marine qui est organisée en écosystèmes complexes composés de virus, de bactéries, de protistes et d'une myriade de petits organismes multicellulaires comme les copépodes, des petites méduses et des micro crustacés. Ceux-ci servent de nourriture au krill, aux poissons et baleines. Evidemment, chaque organisme se nourrit d'autres organismes au sein de ces chaînes, formant des réseaux d'interaction extrêmement complexes. Lorsque les organismes de grande taille meurent, leur matière est dégradée et recyclée en molécules carbonées par les microorganismes, qui là encore, s'organisent localement en écosystèmes. L'exemple des baleines mortes qui tombent au fond des océans est particulièrement frappant de ce point de vue : tout un écosystème très complexe d'organismes se développe autour de la dépouille jusqu'à ce qu'elle soit complètement dégradée.

Pourquoi la biodiversité de ces microorganismes est-elle si importante ? La réponse est à la fois simple et compliquée. Elle est simple parce que cette biodiversité provient de l'histoire du vivant sur terre. Elle est compliquée parce qu'on ne sait pas trop comment la vie a commencé et donc comment la diversité initiale s'est produite.

Mais il est clair que toute la diversité que nous observons aujourd'hui est basée sur une seule forme de chimie du vivant qui s'est maintenue et propagée depuis son apparition il y a environ 4 milliards d'années. Cette vie est basée sur ce qu'on appelle le "code génétique", une série de lettres représentées par des molécules complexes et riches en énergie qui forment un polymère : la fameuse molécule d'ADN organisée en double hélice. Chaque molécule d'ADN a la propriété de pouvoir se modifier en accumulant des mutations ou en se mélangeant avec d'autres molécules d'ADN. Comme c'est l'enchaînement des lettres dans l'ADN qui détermine largement la nature d'un organisme vivant, ces processus ont conduit au cours des 4 milliards d'années qui ont précédé notre ère actuelle à la formation d'un nombre d'organismes différents absolument hallucinant. C'est ce qu'on appelle l'évolution. La diversité du vivant que l'on constate aujourd'hui et qui fonctionne remarquablement bien provient non seulement des modifications des molécules d'ADN, mais aussi d'une sélection progressive des organismes qui contiennent cet ADN. Ce processus de sélection est complexe : ce ne sont pas seulement les organismes les mieux adaptés à un moment donné de l'évolution qui survivent. L'évolution ne se fait pas au niveau des individus mais au niveau des écosystèmes : En effet, pour qu'un organisme survive, il faut qu'il puisse se nourrir de l'environnement soit en utilisant des processus chimiques et/ou la lumière, soit en mangeant d'autres organismes. Celui qui est mangé peut être considéré comme le plus faible. Il faut néanmoins qu'il continue à exister dans le système pour que son prédateur survive. Par ailleurs, si une variante de la proie existe mais n'est pas la proie préférée du prédateur, cette variante pourra s'accumuler jusqu'à ce qu'elle devienne une proie de prédilection pour un autre prédateur un peu différent du précédent. La biodiversité est donc importante en général pour la prolifération et la diversification de la vie sur terre. Ce principe est le même pour les organismes qui se nourrissent de l'environnement et doivent s'adapter à ses changements. Admettons qu'il n'existe qu'une seule espèce d'algue microscopique parfaitement adaptée à un environnement qui prévaut au temps T_0 à un endroit donné. Par exemple une algue microscopique A, qui a besoin d'une certaine quantité de lumière à une température précise de 20°C . Soudain la lumière décroît et la température monte. L'algue A meurt... Et plus rien n'existe. Maintenant, imaginons qu'une autre algue B, très semblable à l'algue A, coexiste avec elle, bien qu'elle ne fonctionne pas de façon optimale dans les conditions que préfère A. Si B est capable de survivre parfaitement dans les nouvelles conditions qui sont défavorables à A, ce type d'algue prendra le relais. Bien sûr c'est extrêmement schématique mais c'est ainsi que les écosystèmes fonctionnent, que la biodiversité a augmenté au cours des 4 milliards d'années qui se sont écoulées et c'est ce qui donne à la vie sa robustesse incroyable face aux changements environnementaux.

La biodiversité, c'est l'histoire de la vie sur terre. Sans cette énorme biodiversité qui s'est accumulée sur des milliards d'années et qui porte l'empreinte, en quelque sorte, de tout ce qui s'est passé sur notre planète, la vie serait beaucoup moins robuste. Lorsqu'un prédateur comme l'homme commence à réduire la biodiversité de façon drastique, le système peut évoluer de façon imprévisible. Il est clair que l'espèce humaine, avec bientôt 9 milliards d'individus, et son énorme activité de transformation chimique de la planète, a maintenant un effet important sur l'évolution des écosystèmes composés de micro-organismes (entre autres !) et qui recyclent l'énergie et la matière organique sur terre. Il faut donc bien connaître cette biodiversité au niveau planétaire pour pouvoir suivre son évolution et ses tendances. C'est la raison pour laquelle des expéditions comme TARA OCEANS sont si importantes à l'heure actuelle. Le but de cette expédition est en effet de caractériser

les écosystèmes planctoniques des océans des virus aux larves de poissons en passant par les protistes. Dans ce but, le navire TARA accomplit actuellement un tour du monde qui passe par les océans tropicaux et australs. Les chercheurs à son bord et à terre caractérisent les organismes prélevés tous les 200 miles marins (360 kms environ) et mettent en relation la complexité de ces écosystèmes avec les paramètres environnementaux dans lesquels ils sont découverts. En utilisant l'analyse des séquences de leurs génomes et des méthodes quantitatives d'imagerie, les chercheurs pourront déterminer la composition en organismes des écosystèmes présents dans des océans ayant des caractéristiques très différentes. En plus de l'obtention d'une carte initiale, actuelle, de la composition des écosystèmes planctoniques marins, ces analyses permettront, d'une part, de construire des modèles dynamiques de la distribution de ces organismes dans les océans de notre planète et, d'autre part, de mieux comprendre leur évolution, et... la nôtre par voie de conséquence puisque la vie a très probablement commencé dans les océans.

2.2. Quels sont le rôle et l'importance de la diversité des microorganismes ? (suite)

Jean Weissenbach (Membre de l'Académie des sciences)

La biodiversité invisible : rôle et importance de la biodiversité des bactéries. La diversité des bactéries se manifeste en premier lieu par la remarquable variété des milieux naturels qu'elles ont colonisés. Ces milieux se distinguent par leur propriétés physico-chimiques et peuvent aller vers des extrêmes : milieux très chauds (plus de 100°C), très froids, très acides, très salins, avec ou sans oxygène, avec ou sans lumière etc. Cette étonnante diversité des propriétés physiologiques nécessaires à la vie dans ces milieux illustre l'extraordinaire capacité d'adaptation, fruit de l'évolution des bactéries depuis leur apparition sur terre il y a près de 4 milliards d'années.

L'estimation de la biodiversité des bactéries a longtemps été limitée, par les techniques de culture, aux observations microscopiques, biochimiques et immunologiques. Mais depuis une vingtaine d'années, l'utilisation de méthodes moléculaires consistant à analyser la séquence d'ADN d'un gène particulier (gène de l'ARN ribosomique 16S), présent chez tous les organismes, a permis d'évaluer l'étendue de cette diversité. Ce gène universellement répandu présente, d'une espèce à l'autre, de petites variations qui sont caractéristiques de chaque espèce. L'inventaire des formes variantes du gène permet donc d'avoir une mesure de la diversité d'un échantillon donné de l'environnement (sol, eaux marines etc..). On s'est ainsi rendu compte que cette diversité est beaucoup plus importante qu'on ne l'avait imaginé et que le nombre d'espèces observées dans les milieux naturels dépasse largement (plus de 100 ou 1000 fois) le nombre d'espèces qu'on sait cultiver.

L'emploi du terme et du concept d'espèces pour des bactéries pose problème. Font partie d'une même espèce des individus dont les croisements donnent naissance à d'autres individus, eux mêmes capables de se reproduire entre eux par voie sexuée. Il y a donc une barrière expérimentalement établie pour définir chaque espèce. Chez les bactéries, la reproduction se fait par simple division cellulaire, mais des noms d'espèces ont été attribués en appliquant la nomenclature du système linnéen, alors

qu'on ignorait leur mode de reproduction. Cette pratique n'a pas été reconsidérée une fois ce mode connu. Il semblait en effet évident que chez des organismes se reproduisant par mode exclusivement clonal, tous les descendants d'une bactérie ancestrale fassent partie d'une même espèce. Ceci est admissible pour des périodes de temps durant lesquelles les modifications au niveau d'un génome restent limitées en nombre et dans leurs effets. Mais au bout d'un grand nombre de générations, l'accumulation de mutations et donc de diversité dans les caractères héréditaires aboutit à des cellules aux propriétés biologiques sensiblement différentes entre elles. Même si toutes les bactéries ont un ancêtre commun (que nous partageons d'ailleurs avec elles) il paraît inconcevable de les inclure dans une seule espèce. L'introduction des méthodes moléculaires pour distinguer les bactéries entre elles, pour évaluer leur diversité et établir leur filiation évolutive, permet d'une certaine manière de surmonter la difficulté de la définition d'espèce bactérienne. Il a simplement été décidé de considérer que deux souches bactériennes font partie de la même espèce si la séquence d'ADN du gène universel d'ARN 16S mentionné ci-dessus présente une identité de séquence supérieure au seuil de 97%. Ceci signifie que, de manière arbitraire on considèrera que deux bactéries sont d'espèces distinctes si les séquences du gène de l'ARN ribosomique 16S diffèrent par plus de 3% de leurs nucléotides. Cette mesure arbitraire a fatalement des conséquences fâcheuses. Il peut notamment arriver que deux représentants d'une même espèce aient des contenus en gènes beaucoup plus dissemblables que des représentants de deux espèces différentes.

Comme pour le reste du vivant, cette diversité, qui s'est mise en place et accumulée depuis l'apparition des premières bactéries, découle des modifications de la séquence de leur génome, responsables de leur évolution. Du fait de la rapidité de multiplication des bactéries, une cellule bactérienne donne naissance, dans un intervalle de temps allant du jour au mois, à des milliards de cellules filles. Même si la très grande majorité des modifications génomiques sont sans effet ou ont un effet négatif sur la croissance et la multiplication des bactéries, les nombres de descendants sont tels que des mutations à effet favorable, associées à un changement observable, ont de grandes chances d'apparaître.

En outre, l'ADN peut être transféré assez facilement entre bactéries d'espèces différentes (parfois très éloignées du point de vue évolutif) conférant là encore des propriétés physiologiques nouvelles à l'espèce réceptrice. Etant donné le nombre gigantesque de bactéries à la surface du globe, les nombreux réarrangements d'ADN à l'œuvre, ainsi que les autres modifications, permettent en permanence aux bactéries d'explorer de nouvelles possibilités physiologiques, notamment de nouveaux enzymes, de nouvelles voies métaboliques, de nouveaux mécanismes de régulation etc. Le monde microbien est un monde en évolution constante dont la biodiversité foisonnante permet de trouver très rapidement des solutions bien adaptées à des changements de conditions du milieu.

Une des manifestations les plus spectaculaires de la biodiversité bactérienne est celle de l'apparition très rapide de la capacité de dégradation des xénobiotiques. Les xénobiotiques sont des composés chimiques (surtout de nouvelles molécules de synthèse organique) produits par l'activité humaine. Il est donc admis qu'ils n'ont pas existé dans la nature auparavant. N'ayant aucunement été en contact avec de telles molécules, les bactéries sont souvent incapables de les transformer chimiquement et, notamment, de les utiliser comme nutriments. Pourtant, assez rapidement (en l'espace de quelques années), apparaissent au sein des flores bactériennes en

contact avec un xénobiotique, des bactéries capables de convertir cette molécule, de la dégrader et finalement de la recycler dans la biosphère. Une analyse biochimique montre que certaines bactéries des flores en question ont acquis des enzymes capables de catalyser des réactions de transformation chimique (en général dégradation) du xénobiotique. On voit donc que la biodiversité bactérienne concerne plus la diversification des fonctions que celles des espèces.

Il existe aussi des aspects plus préoccupants de la diversification comme celui de l'acquisition de résistance aux antibiotiques. Il est très souvent le résultat de la propagation de petites molécules d'ADN portant plusieurs groupes de gènes, où chaque groupe confère une résistance à un antibiotique particulier. Ces molécules d'ADN portant les gènes de résistance aux antibiotiques se propagent rapidement dans des populations de bactéries. Ces mécanismes, qui confèrent un caractère invasif aux caractères de diversité qu'ils véhiculent, ont possiblement opéré dès les balbutiements des formes de vie prébiotiques telles qu'on les imagine à présent. Avec cet ensemble de mécanismes de modification et de propagation de l'information génétique hautement efficaces, chez des organismes dont les temps de génération sont très courts et donc capables d'expérimenter très fréquemment de nouvelles variétés et assemblages de gènes, les possibilités d'arriver à de nouvelles combinaisons mieux adaptées, et donc à une plus grande biodiversité sont démultipliées. Les bactéries ont une remarquable capacité à faire des OGM "naturels". Ceci reflète probablement une nécessité pour affronter des conditions de vie sans cesse changeantes. Si ces mécanismes, générateurs permanents de biodiversité, n'existaient pas, la vie aurait eu peu de chances de s'imposer et de coloniser la planète jusque dans ses réduits les plus inhospitaliers à nos yeux.

2.3. Quelle est l'importance des interactions entre espèces ?

Christian Dumas (Membre de l'Académie des sciences)

La biodiversité est la résultante de toute une série d'interactions entre les différentes espèces vivantes constitutives d'un milieu donné, ou écosystème, et les conditions physiques de ce même milieu (lumière, température, pluviométrie, nature des sols, etc.). Les écosystèmes sont très variés et ont tous en commun leur très grande complexité. Aussi est-il difficile d'appréhender les relations précises entre les organismes qui y vivent, notamment sur la base d'expériences bien conduites et reproductibles.

On peut, par exemple, construire un aquarium et y placer un certain nombre d'espèces : plantes, poissons, crustacés, etc. Même si cet aquarium est bien conçu, il ne mime ni un étang naturel, ni évidemment un quelconque milieu marin. On peut raisonner de la même manière avec les essais sur les plantes conduits en serre ou en laboratoire, sur de petites surfaces; là encore, les conditions sont particulières et on ne peut pas extrapoler les résultats obtenus artificiellement à ce qui se passe dans un écosystème naturel. Cela montre l'importance des essais en champ ; c'est une nécessité régie par des textes réglementaires avant toute autorisation de mise en culture de nouvelles variétés; essais régis par un cahier des charges et un organisme agréé. Les anti-OGM ou les écologistes politiques méconnaissent, ou ne

veulent malheureusement pas prendre en compte ce genre de problématique et refusent à priori tout essai en champ pour les plantes obtenues par transgénèse.

Les grands types d'interactions se retrouvent dans les productions trophiques primaires comme la biomasse produite par les végétaux chlorophylliens ; ces derniers servent de nourriture aux animaux herbivores, eux-mêmes constituant l'essentiel de l'alimentation des carnivores. La dégradation des végétaux et des animaux se réalise ensuite grâce à des organismes du sol ou de l'eau, les détritivores, à l'origine de leur décomposition; il en est ainsi de la fabrication de l'humus dans laquelle bactéries et champignons interviennent.

Pour autant, avons-nous une idée précise des interactions entre organismes vivants au sein des écosystèmes ? Quelques exemples vont illustrer ce propos.

Si l'on déterre un pied de luzerne ou de trèfle (plantes légumineuses), l'examen des racines permet d'observer de petites nodosités. Celles-ci renferment des bactéries particulières, des *Rhizobiums*, responsables de leur formation. Attirées par une sécrétion racinaire contenant des molécules phénoliques, ces bactéries colonisent des cellules de poils racinaires et élaborent des facteurs de nodulation (facteur Nod). De nombreux chercheurs, en particulier en France, se sont penchés sur cette interaction légumineuse-*Rhizobium* et après plusieurs décennies, ils ont montré qu'elle est spécifique: une espèce donnée de légumineuse interagit avec un type précis de *Rhizobium*. Le mécanisme est contrôlé par les facteurs Nod, molécules composées d'un squelette commun à tous les *Rhizobiums* avec des "décorations chimiques" à l'origine de la spécificité d'hôte (trèfle, luzerne, etc). La résultante de cette interaction est la possibilité qu'ont les légumineuses de fixer, par leurs nodosités, l'azote atmosphérique de l'air, grâce à un ensemble de réactions chimiques précises. Les nodosités sont le siège d'une activité dans laquelle la plante fournit les sucres et l'énergie issus de la photosynthèse; elle bénéficie en retour des acides aminés qui y sont produits. Il s'agit donc d'une interaction à bénéfice réciproque nommée symbiose. Cette activité peut produire jusqu'à 300 kg d'azote, fertilisant naturel, à l'hectare qui se retrouvent dans les récoltes et en partie dans le sol, utilisable alors par les cultures suivantes. Ceci explique la pratique ancestrale de l'assolement triennal: une année culture de céréales, une année celle de légumineuses et une année mise en jachère (c'est-à-dire sans culture ni ajout d'engrais). Au niveau mondial, on estime à 100 millions de tonnes par an la quantité d'azote fixée dans le sol par les nodosités racinaires, soit l'ordre de grandeur de la production d'azote de toute l'industrie chimique.

D'autres interactions ont été élucidées comme celles liées à certaines maladies dues à des agents pathogènes : virus, bactéries, champignons, vers nématodes, etc., chez leurs hôtes : l'animal (y compris l'homme) ou le végétal. La Nature n'est pas aussi idyllique que celle magnifiée par Jean-Jacques Rousseau : les virus du Sida ou de la fièvre Ebola font aussi partie de la biodiversité.

- Un dernier exemple pris chez le maïs montre toute la complexité et la finesse des relations existant entre les organismes. Un papillon pond ses œufs sur les feuilles; leur éclosion libère des chenilles herbivores qui les broutent. Sous l'action mécanique de ce broutage, des substances chimiques odorantes, essentiellement des terpènes, sont alors émises. On trouve des terpènes, par exemple, dans les huiles essentielles extraites de la lavande. Dans ce bouquet odorant libéré par les feuilles de maïs, certains composés spécifiques attirent une guêpe particulière qui

vient pondre dans les chenilles ; les œufs donnant alors naissance à des larves qui vont tuer les chenilles. Le plus étonnant dans cette trilogie maïs, papillon, guêpe est le déterminant chimique à l'origine de la libération de ce bouquet de molécules. Il s'agit d'une "molécule hybride" issue, en partie, des lipides de la membrane cellulaire végétale et, en partie, d'un acide organique de l'insecte ; ces deux composés étant raboutés par une enzyme salivaire de la chenille qui génère le mécanisme qui va finalement la tuer ! Il y a eu plusieurs évolutions en parallèle entre la plante et l'insecte herbivore qui lui est inféodé, évolutions qui ont conduit à la fabrication de cette "molécule hybride" animal-végétal. Dans un tel cas de figure, on parle de co-évolution. On comprend aussi, à partir de cet exemple, toute la difficulté à élaborer ce que l'on nomme "lutte biologique", sans connaître précisément l'ensemble des interactions chimiques sous-jacentes.

2.3. Quelle est l'importance des interactions entre espèces ? (suite)

Roland Douce (Membre de l'Académie des sciences)

Les produits du métabolisme secondaire jouent un rôle déterminant dans l'interaction entre les plantes et les autres espèces^{10 11}. Les plantes sont passées maîtres dans l'art de fabriquer une multitude de molécules complexes qui dérivent du métabolisme secondaire. Ces molécules qui s'accumulent parfois en très grosses quantités dans certains organes sont pour la plupart étroitement impliquées dans les interactions entre la plante et son environnement biotique (défense, symbioses, signalisation, phéromones, etc.). La nature des produits synthétisés au cours du métabolisme secondaire est éminemment variable d'une plante à l'autre. Une telle hétérogénéité, qui conduit à la notion de "biodiversité moléculaire", contraste avec la très grande uniformité des produits issus du métabolisme primaire tels que les intermédiaires de la glycolyse, du cycle de Krebs et du cycle de Benson-Calvin.

Les plantes, qui ne peuvent pas se déplacer, doivent se prémunir en permanence des attaques perpétrées par de très nombreux herbivores (mammifères et insectes). Par exemple, plus de 400 000 espèces d'insectes phytophages (*monophages*, *oligophages*, *polyphages*) vivent sur environ 300 000 espèces de plantes vasculaires. C'est pourquoi de nombreuses molécules synthétisées par les plantes, et qui dérivent du métabolisme secondaire, sont présentes d'une façon constitutive et se comportent comme des poisons efficaces contre les herbivores. Par exemple, l'atractyloside est un diterpène qui s'accumule dans les feuilles d'un chardon, *Atractylis gumifera*. Ce poison interagit avec une très forte affinité avec le transporteur de nucléotides des mitochondries, privant ainsi les cellules de sa source primaire d'énergie. La roténone, flavonoïde extrait du *Derris elliptica*, se comporte comme un inhibiteur puissant de la respiration cellulaire en se fixant sur l'une des sous-unités du complexe I de la chaîne respiratoire. Ce composé est utilisé dans l'agriculture biologique notamment pour se prémunir contre l'attaque des pucerons.

¹⁰ Haslam E. (2002) Plant secondary metabolism: Encyclopedia of life sciences.

¹¹ Douce, R. (2000) "Le monde végétal. Du génome à la plante entière" Académie des Sciences (RST N°10), Tec & Doc.

Par ailleurs, la synthèse de composés toxiques dérivant du métabolisme secondaire est souvent déclenchée par des agents phytopathogènes (virus, champignons, bactéries) ou par des blessures. L'arsenal chimique ainsi mis en place peut différer considérablement d'une plante à l'autre. Tel est le cas du psoralène que l'on rencontre dans la famille des Ombellifères et notamment le céleri. Le psoralène (furanocoumarine) n'est pas ordinairement présent dans le Céleri. En revanche, la plante attaquée par un champignon (*Sclerotinia sclerotiorum*) se défend en produisant du psoralène. Sous l'action des UV, ce toxique donne naissance à une molécule qui, en réagissant avec les bases pyrimidiques des acides nucléiques, bloque la transcription et toute possibilité de réparation de l'ADN.

De nombreuses plantes émettent de l'acide cyanhydrique lorsqu'elles sont blessées. L'amygdaline (*glycoside cyanogénique*), qui dérive de la L-phénylalanine, est présente de façon constitutive dans les racines et les amandes des pêchers, amandiers, cerisiers. Ce composé est localisé dans la vacuole des cellules. En revanche, l'enzyme (*glycosidase*), capable d'hydrolyser ce glycoside et de libérer le cyanure, est localisée dans la paroi des cellules. A la suite d'une agression par un animal, des cellules se déchirent, ce qui entraîne l'accès de la glycosidase à son substrat, et, par conséquent, la libération du cyanure éminemment toxique.

Lorsque les plantes sont attaquées par des insectes et animaux herbivores, elles émettent très souvent des messagers volatils (*monoterpenes, sesquiterpènes, aldéhydes, indole, éthylène, etc.*) qui vont jouer indirectement un rôle déterminant dans les défenses de la plante. Par exemple, lorsque les chenilles du *Manduca sexta* (lépidoptère) tolérantes à la nicotine broutent les feuilles de tabac normalement riches en nicotine, il se produit un dialogue chimique d'une très grande complexité entre la chenille du *Manduca* et la plante. Le contact de la salive de l'insecte avec la plante mâchouillée induit la synthèse d'un "éliciteur" (volicitin) qui résulte de la condensation de l'acide linoléique, provenant de la plante, avec l'acide glutamique provenant de l'insecte. Cet "éliciteur" va déclencher la riposte de la plante, entraînant la production passagère de deux hormones, l'acide jasmonique et l'éthylène. L'acide jasmonique déclenche la synthèse de petites molécules volatiles (linalool) qui vont attirer une guêpe *Ichneumon*. Cette dernière déposera un œuf unique dans le corps de la chenille. L'éthylène, en revanche, induit l'arrêt chez la plante de la synthèse de la nicotine, insecticide puissant. Dans ces conditions, la chenille du *Manduca* débarrassée de nicotine pourra être dévorée par la larve de la guêpe sans risque d'intoxication par cet alcaloïde. Ainsi, dans ce cas particulier, la plante supprime la synthèse de son arme chimique pour mieux frapper son adversaire. Plusieurs voies de signalisation collaborent ou se neutralisent au cours de toutes ces cascades d'évènements.

Certains de ces composés, qui dérivent du métabolisme secondaire, sont directement impliqués dans l'établissement de nombreuses symbioses (plantes/bactéries, plantes/champignons) qui ont joué un rôle capital dans l'évolution des espèces. Par exemple, les *Rhizobium* ordinairement présents dans le sol induisent sur les racines des légumineuses la formation de nodosités à l'intérieur desquelles les bactéries fixent l'azote moléculaire. L'ammoniac ainsi produit sera en partie utilisé par la plante. En retour cette dernière apportera à la bactérie la fourniture énergétique. Cette association à bénéfice mutuel est déclenchée à la suite d'un échange de signaux chimiques entre les deux partenaires [flavonoïdes sécrétés par les racines de la plante ; facteurs de nodulation (Nod) sécrétés par le *Rhizobium*]. Ce dialogue moléculaire conduit à l'installation de la symbiose.

Les fleurs émettent des terpènes volatils ou de simples composés aromatiques pour attirer les insectes pollinisateurs et ainsi assurer leur fécondation. Par ailleurs, d'autres produits du métabolisme secondaire se comportent comme des stimuli visuels pour ces derniers. Ainsi la couleur des fleurs, qui attire de nombreux insectes, est liée le plus souvent à la présence de pigments comme les anthocyanines, les flavonols, et divers caroténoïdes. En revanche, la couleur prononcée des fleurs appartenant à l'ordre des *Centrospermae* est liée à la présence de betacyanines et de betaxanthines.

La diversité chimique de ces substances naturelles (biodiversité moléculaire), ainsi que la multiplicité de leurs fonctions (prémunition contre les agents biotiques, signalisation, pollinisation, installation des symbioses, etc.), représentent le résultat d'un processus d'évolution biochimique souvent imposé par des phénomènes de coévolution entre la plante et les autres organismes qui interagissent avec elles. Cette coévolution plantes/agents biotiques a entraîné sur des millions d'années la multiplication de langages chimiques qui permettent aux partenaires de s'approcher ou de s'esquiver, au cours de scénarii programmés et changeants. L'écheveau métabolique représenté par ces molécules est d'une rare complexité et il est encore très loin d'avoir été démêlé (*certaines de ces molécules, dont la synthèse est souvent écartelée entre divers compartiments cellulaires voire même tissulaires, exigent une vingtaine d'enzymes pour être assemblées*). De même la cible précise et la fonction de chacune de ces molécules sont le plus souvent encore complètement inconnues.

3. Quels sont les principaux bénéfices de la biodiversité pour les hommes et leurs sociétés ?

3.1. La biodiversité est-elle importante pour l'alimentation humaine (production agricole, ressources marines) ?

Patrick Lavelle (Correspondant de l'Académie des sciences) avec Anne Turbé (Biointelligence Service) et Wim van der Putten (Netherlands Institute of Ecology)

Biodiversité dans les sols : les héros invisibles. Le rapport Millennium Ecosystem Assessment publié en 2005 (maweb.org) a montré que 60% des services écosystémiques (les fonctions écologiques utiles à l'humanité) de la planète sont dégradés et que l'érosion de la biodiversité est importante. Cette détérioration est en grande partie liée au considérable essor de l'agriculture au cours de la "révolution verte" qui a multiplié par 2,5 la production alimentaire entre 1960 et 2000 tout en réduisant les prix de 40%. Cette augmentation spectaculaire de la production est dûe à la mise en culture de très grandes surfaces d'écosystèmes naturels, à l'usage massif d'engrais et de pesticides et à l'emploi de ressources génétiques performantes. La sévère dégradation de l'environnement qui a résulté de cette intensification est en grande partie liée à l'ignorance des processus naturels qui entretiennent la qualité des sols et régulent les flux d'éléments vers les écosystèmes aquatiques et vers l'atmosphère. Une biodiversité aussi foisonnante que méconnue régule ces fonctions. Le doublement nécessaire de la production agricole d'ici à 2050 ne pourra se faire sans la participation de ces organismes, héros invisibles des écosystèmes.

Les sols sont l'habitat du quart de toutes les espèces terrestres. Une cuiller à café d'un sol de jardin peut contenir des milliers d'espèces, des millions d'individus et plusieurs centaines de mètres de filaments mycéliens. La biomasse bactérienne du sol peut atteindre 1 à 2t par hectare, l'équivalent d'une ou deux vaches de bonne taille, dans le sol d'une prairie de zone tempérée. La plupart des espèces du sol sont de fait des microorganismes, bactéries, champignons ou protistes. Ces ingénieurs chimiques du sol sont les responsables de 99% de la décomposition de la matière végétale morte en nutriments immédiatement disponibles pour les plantes.

Le sol abrite aussi une grande diversité d'animaux, un millier d'espèces dans un sol de forêt de région tempérée. Les nématodes, les enchytraeides, les collemboles et les acariens comprennent des prédateurs de microorganismes, d'autres invertébrés et des herbivores qui exercent une importante fonction de régulateurs biologiques des activités microbiennes dans le temps et dans l'espace. Ces organismes sont généralement ignorés des non spécialistes. Ce n'est pas le cas des plus gros invertébrés, insectes, vers de terre, fourmis et termites, ou petits mammifères dont les adaptations à la vie, dans le milieu obscur et compact qu'est le sol, sont diverses et parfois spectaculaires. Ces organismes sont les ingénieurs du sol qui entretiennent ou modifient l'habitat des organismes plus petits, en construisant des agrégats et des spores résistants. Ce faisant, ils participent à l'entretien des

propriétés physiques du sol et des fonctions hydraulique associées. L'intensité de leurs activités étonne : les taupes sont capables de creuser 30 cm de tunnel en une heure tandis que les vers de terre peuvent ingérer journallement jusqu'à 30 fois leur propre poids de terre, 500 à 1000t de terre par ha et par an. Les termites en région tropicale mobilisent aussi des centaines de tonnes dans leurs diverses constructions. Cet intense travail mécanique n'est pas la seule contribution des vers de terre au fonctionnement des écosystèmes ; ils stimulent la croissance des plantes et les protègent des maladies et des parasites en les rendant tolérants à leurs attaques, par divers effets indirects, allant jusqu'à la modification de l'expression de gènes.

Comprendre l'organisation de la vie souterraine et sa parfaite interaction avec les fonctions écologiques du sol est le défi proposé aux écologistes du sol. Inventer des modèles conceptuels adaptés et les tester par une expérimentation réaliste reproduisant les conditions d'un milieu si mal connu en est le moyen. C'est la voie que doit poursuivre la recherche pour permettre aux humains une utilisation "éco-efficace" des sols qui s'appuie sur l'action d'une biodiversité connue et respectée. Il n'existe pas désormais d'autre voie pour répondre encore une fois à la nécessité d'un doublement de la production alimentaire, alors que les réserves de sol disponibles sont épuisées et que les sols cultivés, dégradés dans 30% des cas, sont eux-mêmes une ressource en péril.

3.1. La biodiversité est-elle importante pour l'alimentation humaine (production agricole, ressources marines) ? (suite)

Yvon Le Maho (Membre de l'Académie des sciences)

L'alimentation humaine repose en grande partie sur la biodiversité, qu'elle soit entièrement naturelle comme dans le cas des ressources marines, ou modifiée par l'homme comme dans le cas des fermes marines ou de l'agriculture.

Le premier sujet d'inquiétude est celui de la surexploitation des ressources marines. Les fermes marines n'apparaissent actuellement pas pouvoir se substituer à ces ressources naturelles. En effet, outre la multiplication des pathologies chez les poissons en élevage intensif, la croissance des espèces carnivores requiert en élevage plus de nourriture qu'elles n'en ont besoin dans leur milieu naturel et ainsi un prélèvement supplémentaire en mer. Il est donc essentiel de parvenir à une exploitation durable des ressources marines. Pour cela, les experts en dynamique de population des poissons doivent travailler de concert avec des économistes pour mieux cerner les conditions de cette durabilité.

Pour ce qui concerne la production agricole, son développement remarquable a jusqu'à présent permis de nourrir toutes les populations de la planète. Les famines, qui sévissent encore aujourd'hui, sont en effet imputables au déplacement de populations fuyant les guerres et à l'effet destructeur de celles-ci. Cependant, avec l'objectif de nourrir demain 9 milliards d'humains, la préservation de la biodiversité apparaît de plus en plus au cœur des enjeux. En effet, corollaire au développement de la monoculture intensive, de nombreuses variétés d'espèces végétales cultivées disparaissent.

Or, cette diversité constitue l'assurance-vie des générations futures contre les épidémies de ravageurs, comme nous le rappelle l'épidémie de phylloxéra en Europe à la fin du 19^{ème} siècle. Il a en effet fallu plus de trente ans pour la surmonter, en utilisant des porte-greffes issus de plants américains naturellement résistants à cet insecte originaire de l'est des Etats-Unis. Les conservatoires de semences comme celui financé par l'Union Européenne au Svalbard constituent une réponse par l'absurde puisque l'on sait pertinemment que la conservation de semences à basse température n'est pas infinie. Elle requiert en effet un semis régulier pour être pérenne. La menace concerne également les services rendus par la biodiversité. Dans le cadre d'un travail collectif international (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), plus de 1300 chercheurs ont en effet montré que 60% de ces services qui nous sont vitaux, comme l'épuration des eaux et ceux rendus par les insectes pollinisateurs, sont en régression constante. Les problèmes rencontrés dans la culture des OGM insecticides montrent que les champs de culture transgénique restent des écosystèmes, même s'ils sont certes simplifiés. En effet, dans le cas du coton BT, la récente apparition d'une résistance aux insecticides des principaux ravageurs, comme en Inde, et d'une pullulation des ravageurs secondaires, comme les punaises en Chine, requiert un épandage d'insecticides, alors même que l'intérêt des OGM était justement la disparition d'un tel traitement. Outre l'enjeu majeur d'une réduction de la pauvreté, car celle-ci explique que la plus grande partie des paysans de notre planète n'ont pas le moyen de travailler mécaniquement la terre, notre capacité à faire face au grand défi de demain que constitue l'alimentation des populations humaines, passe donc par un double défi : une meilleure préservation de la biodiversité et un progrès dans notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes simplifiés correspondant aux champs cultivés. Dans ce contexte, les nouvelles connaissances scientifiques sur les interactions chimiques entre végétaux et insectes, et notamment sur les processus chimiques par lesquels les végétaux attirent les prédateurs de leurs ravageurs, ouvrent de nouvelles voies vers une agriculture durable.

3.1. La biodiversité est-elle importante pour l'alimentation humaine (production agricole, ressources marines) ? (suite)

Georges Pelletier (Membre de l'Académie des sciences)

La biodiversité est-elle importante pour la production agricole ? Depuis une dizaine de milliers d'années, l'homme a choisi, pour les besoins de la production agricole et de l'élevage dont il tire l'essentiel de sa nourriture, une quarantaine d'espèces animales (oiseaux et mammifères) et de l'ordre de 250 espèces végétales. Cela ne représente, en moyenne, qu'un millième des espèces des familles concernées. Toutes n'ont pas la même importance : aujourd'hui 90% de la production est réalisée à partir d'une trentaine d'espèces végétales et d'une quinzaine d'espèces animales. Elles n'ont plus grand chose à voir avec les espèces sauvages dont elles sont issues : au cours du temps, nous les avons transformées par sélection, pour les adapter à nos besoins : meilleures capacités de production et, chez l'animal, des caractéristiques de comportement qui facilitent son élevage.

La biodiversité des espèces qui assurent la production agricole est essentielle : les besoins, les milieux sont eux-mêmes divers et changeants et c'est au sein de cette biodiversité que se trouveront les combinaisons génétiques nécessaires pour le futur.

Au sein de chaque espèce animale, les éleveurs ont créé au fil du temps des races diversifiées par leur isolement génétique, l'adaptation aux conditions et aux besoins locaux, et selon des préférences esthétiques ou sociologiques. Les animaux d'une race domestique possèdent un certain nombre de caractéristiques visibles communes, mais ils sont diversifiés sur le plan génétique. Cette biodiversité n'est maintenue au sein d'une race que si ses effectifs sont suffisamment importants. Or 20% des races animales sont en danger car d'effectifs trop limités. L'érosion génétique des populations d'animaux d'élevage est de ce point de vue en nette augmentation. Dans notre pays, par exemple, une dizaine de races de bovins sont en "conservation" avec des effectifs allant d'une dizaine à quelques centaines d'individus.

De leur côté, et en fonction de leur mode de reproduction, les plantes cultivées se présentent soit sous la forme de populations génétiquement homogènes (lignées, hybrides ou clones), soit, plus rarement dans l'agriculture moderne, sous la forme de populations équivalentes à des races animales. En culture, un mouvement général de simplification a conduit à réduire le nombre de variétés. Dans le cas du riz en Asie, il existe de l'ordre de 80 000 cultivars (dont personne ne sait s'ils sont tous distincts les uns des autres !) mais ceux qui sont majoritairement exploités et qui participent au triplement de la production depuis cinquante ans, proviennent des Instituts de recherche et n'en représentent que quelques centaines.

La diversité génétique des variétés actuelles des plantes de grande culture et celle des variétés du siècle passé dans des pays développés (Allemagne, Australie, Etats-Unis, Royaume-Uni, France) a été analysée par des méthodes de biologie moléculaire. Ces analyses montrent clairement qu'après une décroissance qui s'est située aux alentours des années soixante, c'est-à-dire quand les variétés traditionnelles ont été abandonnées dans leur ensemble au profit de créations récentes, cette diversité génétique est maintenant supérieure : les cultivars de blé postérieurs à 1990 sont plus diversifiés que ceux de la période 1900-1990. On le comprend quand on sait que la diversité génétique du matériel dont disposent les sélectionneurs s'est accrue au cours de la seconde moitié du XXe siècle grâce aux prospections, à la mise en place de collections internationales, aux échanges de ces ressources entre laboratoires, et au perfectionnement des méthodes de sélection et de caractérisation des variétés. Les variétés effectivement cultivées une année donnée sont beaucoup moins nombreuses que celles disponibles, mais d'une année à l'autre, l'agriculteur moderne change beaucoup plus souvent de variétés que par le passé. En définitive, à la variabilité représentée dans l'espace par un ensemble de cultivars s'ajoute une variabilité créée de manière continue et régulièrement renouvelée dans le temps par l'activité des sélectionneurs professionnels.

Quand ce travail de sélection est soutenu, l'espèce cultivée s'enrichit aussi des gènes d'espèces sauvages. L'hybridation entre espèces est une pratique courante de la sélection végétale. Dans le cas de la tomate (*Solanum lycopersicum*), des gènes provenant de *S. peruvianum*, *S. pennellii*, *S. pimpinellifolium*, *S. chmielewskii*, *S. parviflorum*, *S. cheesmani*, *S. hirsutum*, *S. chilense* ont été introduits pour améliorer les caractéristiques gustatives, le contenu en vitamines, la couleur et des résistances à de nombreux parasites et maladies cryptogamiques. Dans le cas du

blé (*Triticum aestivum*), de la même manière, des gènes d'*Aegilops spelta*, d'*A. ventricosa*, de *T. diccicum*, de *Secale cereale* (le seigle) pour la résistance à l'oïdium, à différentes rouilles et au piétin participent à cette augmentation de la diversité génétique de l'espèce.

L'opinion qui a généralement cours est que les pratiques modernes d'amélioration et de diffusion des variétés végétales ainsi que la sélection génétique des animaux d'élevage conduisent inévitablement à une réduction de la diversité génétique. Si cette opinion était exacte, nous serions en train de tarir nos capacités de réaction à d'éventuels changements des conditions climatiques, des pratiques agricoles ou des besoins des utilisateurs. Comme nous venons de le voir, cette opinion n'est pas confirmée par les faits scientifiques chez les céréales. Qu'il s'agisse de la production laitière bovine ou de la vitesse de croissance du poulet, le progrès par sélection génétique se poursuit, ce qui n'est pas l'indice d'une uniformité génétique. Il faut donc chercher ailleurs, avant tout dans le domaine économique, les causes des limitations de la biodiversité de certaines espèces exploitées en agriculture. Il existe ainsi de nombreuses espèces qui ne bénéficient plus, essentiellement pour des raisons de rentabilité économique, de ce travail de sélection. On peut parler d'espèces "orphelines", qui entrent dans un cercle vicieux où l'absence de progrès génétique conduit peu à peu à une élimination progressive des variétés puis même à leur disparition de la production agricole. On voit immédiatement le risque de régression de la diversité génétique de l'espèce à partir du moment où les acteurs capables d'assurer son maintien n'en ont plus les moyens. Il est donc urgent de relancer des actions de préservation des ressources génétiques animales et végétales dans l'esprit du Bureau des Ressources Génétiques dont l'activité ne semble plus, malheureusement, être une priorité des Pouvoirs Publics.

3.2. La biodiversité est-elle importante pour la santé ? Quel est le rôle de la diversité des agents pathogènes ?

Roland Douce (Membre de l'Académie des sciences)¹²

Les produits du métabolisme secondaire chez les plantes et la santé humaine.

Il existe environ 270 000 espèces de plantes décrites et nommées suivant la nomenclature introduite en 1753 par Carl von Linné. En fait le nombre total estimé serait bien supérieur de l'ordre de 350 000. Elles sont regroupées dans 300 familles différentes (grâce aux outils du génie génétique et de la micro-informatique, la systématique connaît une révolution ces dernières années qui a conduit à reconsidérer l'établissement plus que centenaire de diverses familles).

A quelques exceptions près, les plantes sont capables d'utiliser l'énergie solaire pour réaliser la synthèse d'une multitude de composés plus ou moins complexes à partir de molécules très simples comme le gaz carbonique, l'eau, les anions nitrate, sulfate et phosphate, et divers cations (*autotrophie*). Certains d'entre eux qui dérivent du métabolisme primaire (saccharose, amidon, lipides et protéines) sont à la base de la vie sur la planète. L'autotrophie manifestée par les plantes constitue un incroyable

¹² Dewick P.M. (1997) Medicinal Natural Products. A biosynthetic approach. John Wiley ed. New York.

tour de force que l'homme a su détourner à son profit en cultivant des plantes qu'il a toujours sélectionnées depuis la plus haute antiquité parfois jusqu'à utiliser de véritables monstres génétiques.

Les molécules les plus étranges que les plantes fabriquent dérivent du métabolisme secondaire. Elles se comportent très souvent comme des poisons pour combattre une multitude d'agents biotiques ou bien comme des messagers chimiques impliqués dans la reconnaissance entre les plantes et leur environnement biotique (insectes, champignons, bactéries). Très souvent les fonctions exactes de ces molécules sont encore inconnues. Les phénylpropanoïdes (8000), les terpènes (25000) et les alcaloïdes (12000) constituent les trois familles chimiques majeures représentatives des produits de cette chimie d'une exquise "complexité" qui comprennent chacune individuellement une dizaine de milliers de structures chimiques différentes. Un tel arsenal exige un équipement complexe en enzymes spécifiques qui catalysent chacune des étapes de la construction de ces molécules. Pour une espèce donnée il existe donc une multitude de gènes codant pour ces enzymes. Ces gènes appartiennent le plus souvent à des familles multi géniques. Ainsi, par exemple, *Arabidopsis* ne renferme pas moins de 30 terpène-synthases. Cette multiplicité est attribuée en partie à la duplication des gènes qui est une des causes majeures de la création de nouveaux composés au cours de l'évolution. On peut dire que la nature des produits du métabolisme secondaire est éminemment variable d'une plante à l'autre. Ainsi, par exemple, la cocaïne est un alcaloïde que l'on rencontre exclusivement chez *Erythroxylon coca*. Une telle hétérogénéité qui conduit à la notion de "biodiversité moléculaire" contraste avec la très grande uniformité des produits du métabolisme primaire.

C'est parmi ce stock impressionnant de molécules diverses aux propriétés très mal connues et dérivant du métabolisme secondaire, que l'homme a recruté les plus grands médicaments et drogues. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), le traitement de nombreuses maladies par les plantes est la forme la plus populaire des médecines traditionnelles. Citons quelques exemples hautement significatifs. L'éphédrine, alcaloïde extrait de l'Ephédra (Ephedraceae), est certainement l'un des plus vieux médicaments connus puisque les chinois l'utilisaient déjà il y a plus de 5000 ans. Cette amine sympathomimétique qui dérive de la phénylalanine est un broncho-dilatateur particulièrement puissant utilisé dans l'asthme doublé d'un décongestionnant nasal de tout premier plan. L'acide salicylique est un acide benzoïque présent en abondante quantité dans les écorces de saule. Il s'agit là d'un très vieux médicament puisqu'au quatrième siècle avant notre ère, Hippocrate donnait à sucer des pousses de saule aux femmes enceintes pour calmer la douleur au moment de l'accouchement. Ce composé commercialisé après acétylation sous le nom d'*aspirine* est couramment employé pour calmer les douleurs et faire baisser la fièvre.

Le curare alcaloïde complexe extrait des écorces du *Chondrodendron tomentosum* (Menispermaceae) et du *Strychnos toxifera* (Loganiaceae), en bloquant l'impulsion nerveuse à la jonction neuromusculaire, provoque le relâchement des muscles volontaires. Cet alcaloïde est donc utilisé dans différents types d'interventions chirurgicales abdominales. Certains stérols glycosylés ou cardénolides sont des cardiotoniques puissants qui inhibent la pompe à ions sodium-potassium ($\text{Na}^+ - \text{K}^+$). On les rencontre dans différentes espèces comme la Digitale, le Muguet ou le "Milkweed" (*Asclepias syriaca*). L'opium qui renferme une multitude d'alcaloïdes comme la morphine et dont on connaît les effets singuliers n'est autre que le latex

séché des capsules incisées du pavot (*Papaver somniferum*). La morphine est utilisée avec une grande efficacité pour soulager les douleurs intenses associées aux phases terminales de certaines maladies. Le taxol est un ester di terpénique isolé pour la première fois de l'écorce d'un If (*Taxus brevifolia*) localisé sur la côte Nord-Ouest des Etats Unis. Les travaux de Pierre Potier, Membre de l'Académie des sciences (1934-2006) ont montré que ce composé se comporte comme un agent antimitotique puissant car il se lie aux microtubules en empêchant leur dépolymérisation au cours de la division cellulaire. Il est à l'heure actuelle préparé par hémi-synthèse et commercialisé sous le nom de Taxotère à partir de la baccatine, un composé voisin du taxol, et extrait de l'If commun (*Taxus baccata*) beaucoup plus répandu que l'If Américain. Le taxol est employé pour stopper la progression des métastases cancéreuses. L'artémisinine présente dans l'Artémise (*Artemisia annua*), herbe utilisée depuis plus de 1000 ans par les Chinois pour le traitement du paludisme (malaria en anglais), est un sesquiterpène qui renferme une rare liaison peroxyde. Cette molécule agit sur le *Plasmodium* (agent du paludisme) par ses propriétés oxydantes puissantes en affectant la membrane cellulaire du parasite. L'ésérine ou physostigmine, alcaloïde qui s'accumule dans les graines du *Physostigma venenosum* (légumineuse), est un inhibiteur de l'acétylcholine estérase. Il contrecarre l'effet de l'atropine (la forme racémique de l'hyoscyamine) et diminue la pression intraoculaire.

Enfin c'est également dans les dérivés du métabolisme secondaire que l'on rencontre les vitamines (folate, pyridoxal, thiamine, biotine, acide ascorbique, etc.). Ce sont les outils chimiques incontournables de certaines protéines qui jouent un rôle clé dans le métabolisme primaire. Un apport insuffisant en vitamines entraîne chez l'homme des désordres métaboliques graves à l'origine de nombreuses maladies (béribéri, scorbut, etc.).

Il existe à l'heure actuelle un intérêt croissant dans la quête de nouveaux composés naturels ayant une action marquée sur les maladies les plus pernicieuses. L'inventaire du stock très important de molécules qui dérivent du métabolisme secondaire chez les végétaux est encore très loin d'avoir été effectué. Dans ces conditions, Il est clair que de très nombreuses molécules aux vertus thérapeutiques admirables et fabriquées par les plantes restent encore à découvrir. Compte tenu de la régression rapide de la biodiversité il est impératif d'accélérer les recherches dans ce sens.

3.2. La biodiversité est-elle importante pour la santé ? Quel est le rôle de la diversité des agents pathogènes ? (suite)

Maxime Schwartz (Correspondant de l'Académie des sciences)

La biodiversité est-elle importante pour la santé ? Les conséquences de la biodiversité sur la santé sont multiples et ne peuvent être abordées en quelques mots. Ainsi, on peut compter celles, indirectes et abordées par ailleurs, sur l'alimentation, le climat et les ressources en eau. Plus directement, on peut mentionner, par exemple, la diversité des plantes médicinales (qui produisent des substances plus ou moins actives selon les populations), celle des pollens allergisants, celle des serpents et de leurs venins, celle des insectes vecteurs

d'agents infectieux et, éventuellement de leurs hôtes intermédiaires dans la faune sauvage, etc.

Quel est le rôle de la diversité des agents pathogènes sur la santé humaine ? Si l'on qualifie d'agents pathogènes tous les organismes susceptibles d'affecter la santé d'un être humain (ou d'un animal), ceux-ci peuvent être de nature et de structure très diverses. Les plus simples, si simples que l'on peut difficilement les qualifier d'organismes, sont les prions, ces molécules protéiques qui peuvent prendre une conformation pathogène auto-reproductible, provoquent la mort des neurones et sont responsables de maladies mortelles comme la maladie de Creutzfeldt-Jakob. Les plus complexes, ou du moins les plus grands, sont les vers, comme le ténia qui colonise l'intestin et dont la longueur peut atteindre plus de 10 mètres. Cependant, lorsque l'on parle d'agents pathogènes, on pense le plus souvent aux microorganismes, c'est-à-dire :

- aux bactéries, comme celles qui provoquent la peste, la tuberculose ou le choléra,
- aux parasites, comme ceux causant le paludisme,
- aux champignons microscopiques responsables de mycoses dont certaines sont graves voire mortelles,
- sans oublier les virus, comme ceux de la grippe, du sida ou de la poliomyélite, même si, au sens strict, ceux-ci ne sont pas des microorganismes, car incapables de synthétiser eux-mêmes leurs propres constituants.

L'impact de la biodiversité des microorganismes pathogènes sur la santé est aussi bien négatif que positif.

Pourquoi négatif ?

Tout d'abord, et c'est une évidence, l'immense diversité des microorganismes fait que certains, même si leur proportion est infime, sont capables d'infecter les êtres humains et de provoquer des maladies. La biodiversité actuelle des microorganismes, comme celle qui concerne tous les êtres vivants, résulte de mutations, pouvant aller de l'altération d'un seul nucléotide dans leur génome à des remaniements beaucoup plus importants, incluant l'acquisition de gènes provenant d'autres espèces.

Ensuite, cette biodiversité est en perpétuelle évolution, des mutations conférant aux microorganismes de remarquables facultés d'adaptation.

Ainsi certains agents pathogènes hébergés par des espèces animales vont subitement acquérir la faculté d'infecter l'espèce humaine et lui causer de graves dommages. Il est probable que la grande majorité des microorganismes pathogènes infectant l'homme sont dérivés de microorganismes provenant des animaux. Parmi les exemples actuels, citons les virus de la grippe qui, périodiquement, franchissent la barrière d'espèce entre les oiseaux et les hommes et provoquent chez ces derniers des épidémies. Ce type d'adaptation est à la base de l'émergence, relativement fréquente, de nouvelles maladies infectieuses.

Outre cette capacité à franchir les barrières d'espèces, l'adaptabilité des microorganismes pathogènes peut prendre d'autres formes. Par exemple, elle peut lui permettre de surmonter les mécanismes de défense mis en place par l'organisme infecté. Cas extrême, le VIH, dont le taux de mutation est tel que chaque personne

infectée héberge un nombre incalculable de mutants, dont certains sont sélectionnés parce qu'ils échappent aux défenses immunitaires. Autre exemple, celui des virus de la grippe, chez lesquels on voit apparaître, pratiquement chaque année, des mutants capables d'échapper aux anticorps protecteurs apparus dans une grande partie de la population. Dernier exemple, la capacité des microorganismes à acquérir la résistance aux agents anti-infectieux. Chacun connaît le grave problème causé par la dissémination de la résistance aux antibiotiques chez les bactéries pathogènes, celle-ci entraînant notamment une multiplication des infections nosocomiales dues à des germes résistants, et donc difficiles à traiter, mais aussi l'émergence de cas de plus en plus nombreux de tuberculose résistant à l'action des rares antituberculeux disponibles.

Cependant, la biodiversité des agents pathogènes présente également des aspects positifs.

L'aspect positif le plus évident est l'existence, dans la nature, d'espèces ou de souches de microorganismes proches des agents pathogènes et apportant une protection contre ces derniers. On pense immédiatement au cas de la variole. C'est l'existence, chez les bovins, du virus de la vaccine, proche du virus de la variole mais quasiment dépourvu d'effet pathogène dans l'espèce humaine, qui a permis la mise au point du premier vaccin contre une maladie infectieuse chez l'homme. En effet l'administration du virus de la vaccine induit une immunité qui protège contre l'infection par le virus de la variole. Rappelons que l'utilisation systématique de ce vaccin, dans le cadre d'une campagne de vaccination pilotée par l'OMS au niveau mondial a permis l'éradication de la variole, dont le virus ne peut se multiplier que chez l'homme. Voici un cas où la disparition d'une espèce, grave atteinte à la biodiversité, n'attriste pas grand monde !

L'exemple de la variole n'a pas été pour rien dans l'élaboration par Pasteur des grands principes de la vaccination. Il l'a conduit à rechercher l'existence de mutants dits "atténués" de microbes virulents, dont l'administration induit une immunité contre ces microbes virulents. Le succès de cette approche illustre l'intérêt d'une exploitation de la biodiversité potentielle des microorganismes.

La biodiversité semble également intervenir dans la protection contre les agents pathogènes par des mécanismes autres que la vaccination et pas toujours bien compris. Prenons le cas des méningocoques pathogènes, principaux responsables des méningites, maladies graves et souvent mortelles chez l'enfant. Bien que ces bactéries soient retrouvées dans la gorge d'un grand nombre d'individus (environ 10% de la population générale), l'incidence de la maladie reste très faible (en France, en 2008, elle était de 1,2 cas par 100 000 habitants par an). Cette faible incidence de la maladie serait due, en partie, à la présence de méningocoques non pathogènes dans la gorge de nombreux individus. En effet, on constate qu'une plus grande diversité est observée parmi les méningocoques non pathogènes isolés chez les porteurs sains que parmi les souches isolées chez les malades. Par ailleurs, l'incidence de la maladie est la plus élevée chez les nourrissons de moins d'un an (9,6 cas par 100 000 habitants en 2008) chez lesquels le taux de portage de méningocoques non pathogènes est très faible. Les mécanismes de la protection exercée par ces derniers restent à élucider.

Les effets positifs de la biodiversité des microbes sur la santé ne s'arrêtent évidemment pas à l'existence de microbes inoffensifs proches de pathogènes et

susceptibles d'induire une immunité contre ceux-ci. En effet, chacun d'entre nous héberge dans son intestin, sur sa peau et ses muqueuses, sur ses dents, etc. une multitude de microorganismes qui, par des mécanismes divers, contribuent à notre santé. On estime que chacun d'entre nous héberge de l'ordre de 10^{14} bactéries intestinales ! La biodiversité de ces microorganismes avec lesquels nous vivons en symbiose est considérable, comptant sans doute des milliers d'espèces. Les effets bénéfiques de cette flore microbienne qui nous accompagne sont attestés par le fait que les animaux de laboratoire dits "axéniques", c'est-à-dire dépourvus de flore microbienne, ont bien piètre allure !

On ne peut terminer sans mentionner la biodiversité de l'être humain lui-même. Les individus, comme les populations, diffèrent dans leur sensibilité aux agents infectieux et, plus généralement, aux maladies. Dans le cas des maladies infectieuses, cette biodiversité de l'être humain retentit à son tour sur celle des agents infectieux, dans le cadre d'une coévolution permanente du microbe et de son hôte.

3.2. La biodiversité est-elle importante pour la santé ? Quel est le rôle de la diversité des agents pathogènes ? (suite)

Philippe Sansonetti (Membre de l'Académie des sciences)

Microbiote et santé : la biodiversité à l'œuvre. Le microbiote intestinal, terme maintenant utilisé pour qualifier la flore résidente ou commensale de la lumière intestinale (commensa = manger à la même table) est un modèle de biodiversité : 10^{14} microorganismes, soit 10 fois le nombre de cellules somatiques et germinales qui nous composent, un pool de gènes 100 fois supérieur au génome humain, environ 1000 espèces, une activité métabolique égale à celle du foie. L'immense majorité des bactéries intestinales appartiennent aux Firmicutes, surtout les "clusters" XIVA et IV regroupant des bactéries anaérobies à Gram positif extrêmement sensibles à l'oxygène (EOS) et largement incultivables, et aux Bacteroidetes regroupant des bactéries anérobies à Gram négatif. Les autres familles (Protéobactéries comme les entérobactéries, Lactobacillaceae, Mollicutes) sont en quantité négligeable, ce qui ne signifie pas qu'elles soient inutiles. Il est tentant de considérer que le microbiote humain est plus qu'un complexe symbiotique hérité d'une longue co-évolution concernant invertébrés comme vertébrés, mais un véritable organe supplémentaire auquel viennent d'ailleurs s'associer d'autres flores : buccale, génitale, cutanée. D'où la notion de superorganisme tendant à faire un tout cohérent de l'homme et de ses flores. Cette vision est d'autant plus tentante que le microbiote intestinal, une fois constitué dans les premiers mois de la vie, montre une extraordinaire stabilité et une remarquable résilience, particulièrement à la suite d'un traitement antibiotique où l'on observe un quasi *restitutio ad integrum* des espèces constitutives et de leurs grands équilibres. Une sorte de cicatrisation. Dans cette perspective on peut considérer que génome humain et génome de son microbiote forment un tout maintenant appelé hologénome.

Sans microbiote, de nombreuses espèces végétales et animales, à commencer par l'homme, ne seraient sans doute pas apparues, ou auraient disparu, des phyla entiers s'éteignant dans des périodes critiques où les conditions écologiques et climatiques rendaient vitale la présence de bactéries commensales. Sous cette

pression sélective, le microbiote a pris sa place, les bactéries intestinales assurant des fonctions métaboliques majeures comme l'hydrolyse des polysaccharides végétaux complexes que les grands primates sont incapables de digérer. Quid de périodes de refroidissement où nos ancêtres durent se nourrir uniquement de feuilles et de racines ? La biodiversité bactérienne sauvant la biodiversité des espèces vertébrées ? Juste retour des choses pour qui ne voit du monde microbien que l'infime minorité des pathogènes. Le microbiote intestinal assure bien d'autres fonctions vitales comme la biosynthèse de vitamines, la détoxification des substances toxiques de l'alimentation (xénobiotiques). Il joue aussi un rôle de barrière extrêmement efficace contre les microorganismes allogènes, en particulier les pathogènes qui doivent à grand peine, pour coloniser efficacement leur hôte, déloger et détruire cette flore commensale établie dite "de barrière". Les études métagénomiques (analyse en bloc des génomes d'une flore complexe) activement poursuivies, vont fournir un nombre inimaginable de gènes codant des effecteurs de ces fonctions complexes. Ce plongeon dans la biodiversité de nos flores commensales promet des progrès spectaculaires dans des domaines aussi variés que la biologie animale et végétale, la médecine, la biotechnologie, etc...

Tout a un prix cependant. Le maintien de ce microbiote a posé des problèmes à toutes les espèces et les stigmates de cette adaptation commencent à être identifiés, chez les invertébrés comme la drosophile, ou chez les mammifères. Le système immunitaire, en particulier inné, a dû se forger à la pratique du difficile exercice consistant à contrôler ce microbiote si divers afin d'empêcher l'hôte d'en être submergé, tout en prenant soin de ne pas l'éradiquer. Cette co-évolution a fait émerger un réseau de capteurs, signaux et effecteurs complexes menant à une situation de "veille armée". Qu'on la qualifie de tolérance ou d'inflammation physiologique, elle illustre le principe classique du *si vis pacem, para bellum* et s'est aussi constituée en vraie symbiose puisque la présence du microbiote est essentielle à la maturation post-natale du système immunitaire, en particulier muqueux. A ces contraintes s'ajoute pour le système immunitaire la nécessité de discriminer les bactéries pathogènes occasionnelles des commensaux permanents et d'y répondre de façon adaptée au niveau de la menace lorsqu'elle survient. Reconnaître une biodiversité restreinte, celle des bactéries pathogènes, au sein d'une biodiversité plus large, celle du microbiote commensal et/ou symbiotique, est sans doute la seconde contrainte qui a forgé les grands équilibres du système immunitaire.

Nous arrivons ici au cœur de cette réflexion sur l'interface biodiverse du monde microbien et de l'animal, particulièrement l'homme. L'essence de la discrimination entre bactéries commensales et bactéries pathogènes réside moins dans la nature des motifs bactériens (lipopolysaccharides-LPS-, lipopeptides, flagelline, muropeptides) reconnus par les récepteurs de l'immunité innée (Toll-like receptors, Nod-like receptors, scavenging receptors), que dans la perception d'un danger, second signal venant se superposer à la reconnaissance des motifs procaryotes. Ce signal de danger correspond à la réponse de l'hôte à l'expression par la bactérie pathogène d'effecteurs comme des adhésines, invasines, toxines membranolytiques, appareils de sécrétion permettant l'injection d'effecteurs dans les cellules, croissance intracellulaire, etc... Ces effecteurs induisent avec une grande efficacité les signaux pro-inflammatoires médiés par des voies telles NF- κ B et la cascade des MAPKinases, et par l'inflammasome. Ils représentent en eux-mêmes les marqueurs d'une biodiversité générée sous la pression sélective des réponses de l'hôte via l'accumulation de gènes ou de combinaison de gènes (îlots de pathogénicité)

fournissant en bloc, "clé en main", une propriété pathogène, c'est à dire une capacité de coloniser une surface, de l'envahir, d'en causer la destruction inflammatoire et finalement d'infecter efficacement l'hôte en dépit de ses mécanismes de défense.

Au-dessus d'un certain seuil perçu comme caractéristique du danger, l'hôte va répondre, mais quid de la situation infra-liminaire ? Les bactéries commensales constituant le microbiote sont-elles égales dans une incapacité commune à stimuler un signal de danger en dépit de leur diversité taxonomique, ou représentent-elles une communauté complexe d'individus, certains stimulant les réponses immunitaires jusqu'à frôler – voire dépasser - le seuil de danger, d'autres inhibant activement ces réponses. En quelque sorte sommes nous en présence d'un vecteur unique nul ou de nombreux vecteurs, certains positifs, d'autres négatifs, dont la résultante est inférieure au seuil de danger ? Des données récentes semblent soutenir la seconde hypothèse. SFB (Segmented filamentous bacteria), une espèce clostridiale commensale ancrée dans l'apex de l'épithélium intestinal, induit une réponse muqueuse de type inflammatoire (Th1, Th17), alors qu'un Bacteroidetes, *Bacteroides fragilis*, produit une capsule fortement anti-inflammatoire. C'est probablement par une sélection soigneuse au sein de la biodiversité microbienne que se sont façonnées nos flores commensales. Il existe manifestement une combinaison optimale répondant à des nécessités métaboliques et immunologiques. Les analyses à venir - handicapées néanmoins par la difficulté persistante de cultiver nombre de ces espèces bactériennes - permettront de donner son sens à cette diversité maîtrisée.

On voit déjà poindre en médecine, après l'analyse soigneuse des mécanismes moléculaires et cellulaires des infections par les bactéries pathogènes, de nouveaux champs de la pathologie, liés à une mauvaise gestion du microbiote. Obésité, résistance à l'insuline, liés à un déséquilibre du microbiote ou dysbiose, favorisant des espèces bactériennes plus aptes à métaboliser le bol alimentaire et à engranger de l'énergie. Maladies inflammatoires de l'intestin liées à une mauvaise gestion du réseau de signalisation menant à la tolérance du microbiote, les membres les plus agressifs parmi les bactéries commensales, les "pathobiontes", prenant le dessus et maintenant un niveau danger au dessus du seuil critique.

En guise de conclusion, tentons une vision sociétale de la biodiversité de notre microbiote. Chaque société a ses délinquants (pathogènes, pathobiontes) nécessitant de monter le niveau de lutte (microorganismes anti-inflammatoires), mais aussi révélateurs de faiblesses et de déséquilibres dans cette société (dysbiose). Elle a aussi ses altruistes, ses égoïstes, ses industriels, ses paresseux, mais surtout ses membres inertes qui forment les plus gros contingents, mais assurent sans doute la résilience du système. Gageons qu'un pan important de la pathologie va apparaître lié à des déséquilibres dans la biodiversité des microbes qui nous colonisent. C'est un nouveau paradigme qui représente un changement d'échelle en microbiologie et demandera une adaptation des esprits et des moyens technologiques, en particulier de diagnostic.

3.3. La biodiversité est-elle importante pour le climat et les ressources en eau ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

La biodiversité est importante pour le climat et les ressources en eau, au moins pour deux raisons. Premièrement, les cycles biogéochimiques, particulièrement le cycle du carbone, dépendent du fonctionnement d'écosystèmes tels que les océans, forêts, eaux continentales et autres milieux naturels. Les océans par exemple séquestrent près de 2 gigatonnes de carbone par an et le simple fait de réduire la dégradation des forêts ralentirait les émissions de carbone de plus de 1 gigatonne de carbone par an (rappelons que l'utilisation des combustibles fossiles provoque l'émission d'environ 8 Gt de carbone par an dans l'atmosphère¹³). Deuxièmement, maintenir et restaurer les milieux naturels est la manière la moins coûteuse, la plus saine et la plus facile qu'on puisse imaginer pour réduire les émissions de gaz à effet de serre – la plus réaliste aussi, sur le long terme et à une échelle planétaire. Pratiquement, et pour plusieurs décennies, le meilleur mécanisme susceptible d'enlever le CO₂ actuellement présent dans l'atmosphère est encore de replanter des forêts sur les terres que nous avons dénudées.

Mieux, grâce à leur biodiversité, les milieux naturels peuvent nous protéger, au moins en partie, des tempêtes, des inondations, des sécheresses prolongées – événements extrêmes susceptibles de nous frapper à tout moment, changement climatique ou non. Parmi ces milieux, les plus souvent évoqués sont les mangroves, les récifs coralliens et les zones humides, particulièrement en régions côtières et insulaires. Les mangroves par exemple protègent les côtes contre les crues, les ouragans, et les grandes marées. En 1999, le cyclone qui a frappé la côte est de l'Inde a tué près de 10 000 personnes résidant en zone côtière, emportées pour plus de 70 % par la force du courant. On a pu montrer que le nombre de victimes aurait été trois fois plus élevé en l'absence des forêts de mangrove qui ont protégé certains villages exposés¹⁴. Ce rôle protecteur des mangroves justifie pleinement qu'on les protège, même s'il est clair que cette protection doit aller de pair avec des mesures d'alerte précoce. Ainsi la disparition totale ou partielle des mangroves proches de la Nouvelle-Orléans a-t-elle pesé lourdement sur les effets dévastateurs du cyclone Katrina en 2005, et même pour des tempêtes de moindre ampleur, les zones humides côtières des Etats-Unis assurent une protection estimée à 23,2 milliards de dollars US par an¹⁵, sans compter les possibilités de pêche pour des régions entières.

En fait, toute une part encore inexplorée de la biodiversité risque de disparaître avant même qu'on ait pris la mesure de ses usages possibles. En agriculture, combien de cultivars sauvages à découvrir, adaptés à de nouvelles conditions de température et

¹³ Canadell J.G. *et al.* (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS* **104** : 18866-18870.

¹⁴ Das S., Vincent J.R. (2009) Mangroves protected villages and reduced death toll during Indian super cyclone. *PNAS* **106**: 7357-7360.

¹⁵ Costanza, R. *et al.* *Ambio* 37, 241–248 (2008)

de précipitations ? En pharmacologie, combien de molécules et de médicaments à tirer des milieux naturels ? Et combien de services inconnus susceptibles d'être apportés par les écosystèmes, au-delà de l'approvisionnement en eau et du stockage du carbone ?

L'adaptation au changement climatique passe par une protection des milieux naturels – car ils peuvent nous aider à faire face à ce changement et aux événements extrêmes associés. Continuer à dégrader les forêts, les zones humides ou l'océan ne ferait qu'accélérer le changement climatique, exacerbant la nécessité d'adaptation alors même que les écosystèmes ne pourraient plus remplir leur fonction d'atténuation. En conservant la biodiversité, nous augmentons la capacité de résilience des systèmes écologiques et sociaux. Cette conservation passe par des partenariats avec les communautés les plus démunies – celles qui ont le plus besoin des services écologiques. Elle passe aussi par une prise de conscience de la nécessité de protéger l'intégrité des milieux naturels.

Cette intégrité est en effet nécessaire pour conserver la vie sauvage comme pour produire durablement des ressources indispensables, celles en eau douce par exemple. Nous savons désormais qu'elle est aussi nécessaire pour nous aider à faire face au changement climatique y compris dans ses manifestations les plus extrêmes. Or, la biodiversité est sans nul doute le garant de cette intégrité, ce qui conduit à l'idée que l'avenir de nos économies et de nos moyens d'existence dépend de la façon dont nous saurons intégrer la conservation de la biodiversité dans les plans d'adaptation au changement climatique¹⁶.

Les forêts tropicales font figure d'exemple emblématique en ce domaine, avec leurs litières de matières organiques absorbant jusqu'à sept fois leurs propres poids en eau, leurs réseaux racinaires conservant l'humidité du sol, et leurs canopées piégeant la vapeur d'eau au point de créer des brouillards propices à l'existence de nombreuses espèces. Avec aussi leur aptitude à préserver les sols de l'érosion, à protéger les bassins versants, à stocker le carbone et à absorber les gaz à effet de serre, freinant leur rejet dans l'atmosphère.

D'où le projet de grande muraille verte, ceinture forestière de 15 km de large reliant Dakar à Djibouti sur plus de 7 700 km de longueur en zone sahélienne. Son but ? Faire reculer le désert grâce à l'arrêt des processus de déforestation et de dégradation des milieux naturels¹⁷. Un projet de longue haleine, difficile à mettre en œuvre, mais qui pourra bénéficier des enseignements tirés d'expériences antérieures semblables, algérienne pour prévenir l'avancée du Sahara vers le nord ou chinoise pour renforcer les oasis dans le désert du Xinjiang.

D'où également le mécanisme de réduction des émissions provenant de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les pays en développement (REDD) (*Reducing Emissions from Deforestation and Degradation*). Ce mécanisme imaginé dans le cadre des Nations Unies comprend désormais des questions liées à la conservation, à la gestion durable des forêts et au renforcement des stocks de carbone forestier (REDD+). Suite à l'accord de Copenhague de décembre 2009, une conférence internationale sur les grands bassins forestiers s'est tenue à Paris en mars 2010, suivie d'une deuxième à Oslo en mai pour mettre au point un partenariat

¹⁶ Turner W.R., Oppenheimer M., Wilcove D.S. (2009) A force to fight global warming. *Nature* **462**: 278-279

¹⁷ Voir le DVD *La grande muraille verte* <http://videothèque.cnrs.fr>

REDD+. De nombreuses questions se posent encore au sujet du transfert des ressources financières des pays industrialisés vers des pays en développement afin d'y rémunérer les réductions des émissions issues de la destruction de leurs forêts. L'objectif visé est cependant essentiel : arrêter la perte de couvert forestier dans les pays en développement d'ici 2030 et y réduire la déforestation brute de 50% d'ici 2020.

Cet objectif de REDD+ peut permettre de limiter l'ampleur du réchauffement climatique, de même que la préservation des milieux naturels côtiers peut permettre d'atténuer la dangerosité des tempêtes tropicales et que celle de la biodiversité des milieux terrestres et aquatiques rendra possible maintes découvertes basées sur des millions d'années d'évolution du vivant sur cette planète. La biodiversité est une alliée puissante et essentielle pour faire face au changement climatique et réduire ses impacts.

3.3. La biodiversité est-elle importante pour le climat et les ressources en eau ? (suite)

Ghislain de Marsily (Membre de l'Académie des sciences) avec Nathalie de Noblet-Ducoudré (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA-CNRS, Saclay)

Le lien entre biodiversité, climat et ressources en eau existe, mais est cependant indirect, et passe par la nature de la couverture végétale du sol. A cette couverture végétale sera associée l'existence d'un écosystème plus ou moins riche, diversifié et productif. Si l'on prend l'exemple de la forêt tropicale humide, on sait parfaitement que celle-ci constitue un "hot spot" de la biodiversité, avec une extraordinaire richesse d'espèces, d'écosystèmes et de productivité biologique¹⁸. Tout écosystème forestier a un effet direct sur le cycle local (voire régional) de l'eau, qui est bien connu : évapotranspiration plus élevée que celle d'une prairie, ruissellement et érosion limités, fort potentiel de rétention de l'eau et maintien de l'humidité du milieu (sol et atmosphère).

Le rôle biogéophysique¹⁹ d'une forêt, à l'échelle globale, est cependant moins évident et varie selon la latitude. Des travaux récents²⁰, par exemple, ont comparé par modélisation une terre entièrement recouverte de forêts (à l'exception des zones arides) et une autre dans laquelle les prairies remplacent les forêts. Ils ont quantifié les trois impacts biogéophysiques principaux de la déforestation :

- augmentation de l'albédo, engendrant une réduction de la température globale de la surface de 1,36 °C ;

¹⁸ Voir aussi le texte de Henri Décamps sur cette même question 3.3, en ce qui concerne la forêt tropicale.

¹⁹ Biogéophysique par opposition à biogéochimique. Les impacts d'un écosystème sur le climat se font à la fois par (i) une modification des échanges et bilans d'eau, d'énergie et de chaleur (effets biogéophysiques) ; (ii) une modification des échanges et bilans de carbone/azote/..., gaz à effet de serre, composés organiques volatiles pouvant affecter la chimie de l'atmosphère (effets biogéochimiques).

²⁰ Davin E., de Noblet-Ducoudré N. (2010). Climatic impact of global-scale deforestation: radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, vol. 23, 97-112, DOI 10.1175/2009JCLI3102.1.

- réduction de la rugosité de la surface, réduisant les échanges à l'interface surface-atmosphère et augmentant ainsi la température globale de la surface de 0,29 °C ;
- réduction de l'efficacité de l'évapotranspiration, augmentant la température de la surface de 0,24 °C.

La combinaison de ces trois effets est un refroidissement proche de 1 °C à l'équilibre (soit après quelques décennies) et à l'échelle du globe, avec cependant des variations entre les latitudes. Dans les tropiques elles sont positives, dans les hautes latitudes et sur les océans négatives, tandis que la température change peu sur les continents des moyennes latitudes. Localement, les variations de température peuvent être très contrastées et atteindre une amplitude bien supérieure (~3°C). Des mesures en micro-météorologie en Amazonie ont en effet montré qu'on observe une diminution du rayonnement solaire absorbé et de l'évapotranspiration ainsi qu'une augmentation du flux de chaleur sensible après une déforestation, conduisant à une température de l'air plus élevée, en particulier en été. Des modélisations du climat montrent également, en cas de défrichement de l'Amazonie, un réchauffement et une aridification du climat régional. Mais l'effet sur le climat global est encore très incertain. L'étude du rôle de la déforestation historique dans les moyennes latitudes (de l'ère pré-industrielle à nos jours) montre que cette déforestation aurait réduit de 20 % (et localement de 50 %) les effets d'augmentation de températures par les gaz à effet de serre (incluant les émissions liées à la déforestation) de la même période²¹. A la fin du XXI^e siècle, la déforestation supposée des zones tropicales pourrait en revanche conduire à un renforcement du réchauffement, de 10 % à 50 %, par exemple en Amazonie. La déforestation amplifie d'autre part les variations saisonnières et inter-annuelles du climat, et joue donc sur les événements extrêmes et potentiellement, sur la fréquence et le déroulement du phénomène "El Niño".

Cependant, si la déforestation conduit à un refroidissement immédiat global par ses effets sur l'albédo, elle conduit à un réchauffement global par ses effets sur le cycle du carbone. La déforestation s'accompagne en effet d'une émission importante de CO₂ amplifiant l'effet de serre dans l'atmosphère, résultant d'une part du devenir des résidus du bois, d'autre part d'une modification de l'intensité des flux nets de carbone échangés entre la surface et l'atmosphère. L'effet carbone l'emporte dans le cas d'une déforestation tropicale, et donc entraîne un réchauffement. Dans les zones tempérées à boréales, l'effet albédo l'emporte mais de peu. La déforestation n'est donc pas une solution pour lutter contre l'effet de serre !

En somme, c'est par le biais de la présence ou l'absence d'une couverture forestière, à laquelle est associée une certaine forme de biodiversité, que celle-ci peut agir indirectement sur le climat et les ressources en eau.

²¹ Davin E. (2008). Étude de l'effet biophysique du changement d'occupation des sols sur le système climatique. Thèse Université Paris VI et Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Saclay.

3.4. A-t-on pu quantifier certains des bénéfices de la biodiversité et certains des préjudices dus à une érosion de la biodiversité ?

Claude Combes (Membre de l'Académie des sciences)

La molécule qui t'aurait sauvé. Les spécialistes éprouvent parfois quelques difficultés – pourquoi ne pas le reconnaître – à persuader le "grand public" que la préservation de la biodiversité est une question prioritaire dans la gestion de la planète. Il n'est pas exceptionnel de rencontrer des sceptiques ("pourquoi aurions-nous besoin de conserver des dizaines de milliers de grosses ou petites bêtes qui ne servent à rien ?"), voire des opposants ("n'est-il pas plus utile, vu les ressources limitées d'espace et de nourriture qu'offre la Terre, de les consacrer aux populations d'hommes plutôt qu'aux écureuils roux, aux ours polaires, aux baleines bleues et aux orangs-outans ?").

Un autre problème est celui de l'indifférence, sous-produit de la myopie temporelle de beaucoup d'humains (je n'ose écrire la majorité, car celle-ci n'est pas toujours responsable de son ignorance). Lorsqu'on interpelle nos semblables en criant "Que laisserez-vous à vos enfants ?", lorsqu'on brandit l'image du "*Silent Spring*" ("Printemps silencieux") sans chants d'oiseaux ni de cigales de Rachel Carson (1962), je ne suis pas certain que cela suffise à modifier le comportement à court terme qu'encourage la société moderne : ce serait trop facile de croire que "après moi le déluge" ne germe que dans le cerveau des rois. "*Silent Spring*" n'a pas été inutile, loin de là (ce livre, dont deux millions d'exemplaires ont été vendus, a conduit entre autres à l'interdiction du DDT) mais bien davantage parce que les gens ont eu peur pour leur santé que parce qu'ils souhaitaient préserver la biodiversité. J'ajoute que, même si les sociobiologistes vont trop souvent trop loin, 3,8 milliards d'années de sélection naturelle, donc de loi de la jungle, ne prédisposent pas à l'altruisme, même envers nos descendants plus ou moins lointains.

Que l'on me pardonne de donner pareille image égoïste de l'être humain, mais je crois que la meilleure stratégie consiste à montrer que la préservation de la biodiversité pourra peut-être, un jour ou l'autre, "sauver" notre personne ou nos proches, de manière directe ou indirecte : directe par la découverte de molécules-médicaments, indirecte par la substitution de biopesticides aux pesticides de synthèse. N'oublions pas non plus le rôle que peuvent jouer des substances "issues de la biodiversité" sur l'acquisition de connaissances majeures, d'ordre physiologique et médical, comme en témoigne l'élucidation de la transmission de l'influx nerveux.

L'humanité est loin d'avoir épuisé les ressources pour la santé que recèlent les espèces qui nous entourent, qu'elles soient de grande ou de petite taille, d'origine bactérienne, végétale ou animale, terrestre ou aquatique.

Les combinatoires d'atomes et de molécules sont tellement nombreuses qu'il est illusoire et impossible de synthétiser et de tester toutes les molécules possibles : rien qu'avec les vingt acides aminés qui s'associent pour former les longues chaînes des protéines, il existe des milliards et des milliards de combinaisons possibles... Peu de ces combinaisons ont la propriété d'interférer avec les problèmes de santé des humains, de sorte que la méthode la plus économe de temps et d'efforts consiste à

rechercher dans la biodiversité les molécules qui ont un "sens", c'est-à-dire qui ont été soumises au tri impitoyable de l'évolution. Les modèles moléculaires biosynthétisés par certains organismes vivants, et sélectionnés pour leur efficacité dans des phénomènes de communication chimique (attraction, répulsion), peuvent être d'une originalité et d'une complexité extraordinaire. Les hommes ont ainsi identifié des substances actives depuis longtemps et la méthode a fait ses preuves puisque la moitié des molécules utilisées de nos jours comme médicaments sont réputées issues d'espèces animales ou végétales, l'aspirine née dans les saules étant leur porte-drapeau.

Une espèce, apparemment insignifiante, vient de disparaître, dans une forêt perdue ou un rivage ignoré : "*elle fabriquait peut-être la molécule qui t'aurait sauvé*" : voilà ce qu'il faut dire à chaque terrien. Non seulement cet argument s'ajoute à tous les autres arguments écologiques ou sociaux en faveur de la biodiversité, non seulement il touche à ce qui intéresse chacun de nous, mais en plus, il n'est absolument pas un mensonge. Bien sûr une frange de la société n'a nul besoin de cette démonstration pour respecter et faire respecter la biodiversité, mais aussi longtemps qu'il s'agira d'une frange, aucune stratégie ne doit être négligée, *vu l'urgence*.

3.4. A-t-on pu quantifier certains des bénéfices de la biodiversité et certains des préjudices dus à une érosion de la biodiversité ? (suite)

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

Nous dépendons du milieu et des êtres vivants qui nous entourent, de notre "environnement", de façon très variée. Certaines composantes d'apparence physique, comme la qualité de l'air ou de l'eau, dépendent largement du fonctionnement de systèmes écologiques. D'autres sont plus directement biologiques, comme la qualité des aliments. D'autres sont indirectes et plus difficilement appréhendables, comme les aspects esthétiques et culturels. La biodiversité et le fonctionnement des systèmes écologiques qui en résulte ont de nombreux bénéfices pour l'homme : on parle de "services écosystémiques". En voici quelques exemples :

le reboisement à la fin du XIXème siècle de l'Aigoual, massif arrosé de l'arrière-pays montpelliérain, a régularisé les cours d'eau qui en sont issus ;

le bénéfice de la pollinisation des cultures par les insectes sauvages a pu être évalué à 150 milliards de dollars par an ;

70 % des médicaments sont issus de molécules biologiques, même s'ils sont actuellement obtenus par synthèse comme l'aspirine. L'invention du monde vivant reste donc une source d'inspiration ;

les productions agricoles intensives dépendent de la biodiversité microbienne du sol et du recyclage par celle-ci des nutriments.

Chacun peut trouver d'autres exemples, l'un des plus frappants étant le rôle de la biodiversité microbienne de notre système digestif. Mais l'analyse des effets de perte de biodiversité est encore plus instructive.

Tout d'abord, une baisse de biodiversité révèle souvent un dysfonctionnement écologique, sans en être la cause. L'évaluation de la qualité des eaux à partir d'inventaires des invertébrés d'eau douce est un exemple simple de ce rôle d'indicateur : la réduction de leur diversité n'est qu'une conséquence des pollutions, mais permet d'enregistrer celles-ci de façon simple et robuste, en en gardant une trace biologique dans la durée.

Les élevages de volaille d'une seule variété présentent une homogénéité génétique beaucoup plus élevée que des populations naturelles ou gérées extensivement. Cette homogénéité, la surdensité des élevages, et le transport des animaux favorisent une forte transmission des agents pathogènes, résultant de l'interaction entre la réduction de diversité génétique et divers changements d'usages. On obtient bien sûr des rendements plus élevés en année normale. Mais ces rendements s'effondrent lors d'événements plus rares. Par comparaison, un élevage et une agriculture visant des rendements moins élevés en année normale, par exemple avec un confinement moins extrême et un mélange de plusieurs races de sensibilités différentes aux agents pathogènes, seront plus résistants à des événements extrêmes. On pourrait dire la même chose de la forêt des Landes, dans laquelle on a privilégié une seule espèce, le pin maritime, à croissance rapide sur les sols pauvres, mais que son faible enracinement rend sensible aux tempêtes.

Pourtant les calculs économiques ne provisionnent pas le coût d'événements exceptionnels comme la grippe aviaire dans les élevages de volaille ou les tempêtes sur les forêts. Le regard sur ces pratiques et leur gestion de la biodiversité devrait changer au fur et à mesure que les économistes progressent dans la prise en compte des coûts à long terme. L'anticipation des coûts (par exemple le provisionnement des "miles" émis par les sociétés aériennes, qui gagent des places d'avions à venir) est de règle dans tous les secteurs de l'activité économique. L'évaluation économique de la biodiversité ne saurait donc se réduire à de simples bilans des services directs.

Le caractère diffus et qualitatif de la biodiversité est encore plus net avec les aspects culturels. Même si l'économie africaine bénéficie des safaris et de l'écotourisme, les grands fauves font partie du patrimoine partagé de l'humanité, tout aussi difficile à chiffrer que celui de nos cathédrales gothiques. "Comment voulez-vous gouverner un pays qui a 350 sortes de fromages" aurait dit le Général de Gaulle : cette diversité culturelle n'est permise que par la biodiversité des microorganismes, qu'il semble licite de protéger de pressions réglementaires trop uniformisantes.

La réduction de la biodiversité induite par les activités humaines est donc omniprésente et ses causes et conséquences multiformes. L'homme devra inéluctablement se réconcilier avec la nature, c'est-à-dire s'appuyer sur les mécanismes écologiques, plutôt que poursuivre une lutte séculaire contre ceux-ci, lutte rendue désormais souvent contre-productive par l'emprise de notre développement technique. Selon le mot fulgurant de Michel Serres, "la terre, jadis notre mère, est devenue notre fille".

3.5. Pourquoi attribuer une valeur monétaire à la biodiversité ?

Christian Dumas et Henri Décamps (Membres de l'Académie des sciences)

A priori, l'idée d'attribuer une valeur monétaire à la biodiversité peut choquer. Comment en effet apprécier quelque chose qui n'a pas de prix ? Comment vendre un bien sans lequel nous ne pourrions pas vivre ? Et comment partager avec le public l'évaluation d'un bien – la biodiversité – avec lequel ce public est peu familier, dont il apprécie mal le niveau souhaitable et sur lequel il dispose d'informations fort variables. D'ailleurs, les évaluations monétaires proposées ne considèrent souvent qu'une composante, au mieux un ensemble de composantes, de la biodiversité. Et certains s'insurgent, voyant dans la valorisation du vivant une dérive dangereuse qui inviterait à établir une hiérarchie entre les espèces susceptibles de fournir « des services intéressants » et les autres, créant une discrimination infondée au sein de systèmes écologiques finalement indissociables.

En réalité, on peut reconnaître à la biodiversité une valeur d'existence (ou intrinsèque), conditionnée par des valeurs morales. La biodiversité est ainsi une source non négligeable d'identité culturelle et sa valeur esthétique varie des Européens aux Japonais et aux Chinois, des Néo-Zélandais aux Inuits. On peut aussi reconnaître à la biodiversité une valeur instrumentale (ou utilitaire), et souligner son intérêt pour les industriels du tourisme, de la santé, de l'alimentation, des biotechnologies, de même que pour les sociétés humaines, bénéficiaires de services délivrés gratuitement par les écosystèmes. Estimer la valeur de la biodiversité peut alors permettre de chiffrer les répercussions économiques d'utilisations non durables de notre « capital naturel ». Ces différentes valeurs ne sont pas sans relations : la valeur de la diversité génétique d'une portion de forêt tropicale ne correspond pas seulement aux possibilités d'exploitation de cette forêt, mais peut aussi se définir comme une valeur intrinsèque.

Notons enfin que les solutions techniques ne sauraient remplacer la nature et sa capacité d'innovation face au changement. Mieux, les plus performantes de ces solutions techniques s'inspirent du fonctionnement du vivant lui-même, donnant naissance à une véritable ingénierie écologique.

Le coût de l'érosion de la biodiversité. La biodiversité n'a cessé de diminuer depuis la création de la *Convention sur la diversité biologique* lors du sommet de la terre de Rio en 1992. A titre d'exemple, selon l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), la moitié des mammifères sont en déclin et un quart d'entre eux sont menacés d'extinction. Ce qui est vrai pour les espèces animales les plus visibles est aussi avéré, et dans des proportions tout aussi inquiétantes, pour une grande partie de la biodiversité connue, c'est-à-dire environ 1,7 millions d'espèces. Le taux de disparition des espèces a évolué d'environ une extinction par an et par million d'espèces, valeur estimée par les spécialistes pour les 65 derniers millions d'années, à des valeurs comprises aujourd'hui entre 50 et 560 – signe d'une dramatique accélération de ce processus. Selon un récent rapport du PNUE, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, les pertes économiques mondiales liées à la dégradation des écosystèmes atteindraient 2 à 4,5

milliards de dollars. Les dirigeants politiques réunis à Johannesburg, en 2002, s'étaient engagés à rechercher les moyens de ralentir significativement cette érosion de la biodiversité d'ici à 2010. L'échec de cet objectif fait de la biodiversité un enjeu majeur de ce siècle, au même titre que la pauvreté, les ressources en eau, les besoins alimentaires et... le changement climatique.

Origine du concept de la valeur monétaire de la biodiversité. Dès 1967, l'économiste John Krutilla (1967) mettait en avant la nécessité de recourir à des évaluations économiques pour argumenter une philosophie de préservation de la biodiversité²². Les biologistes ont largement fait écho à cette préoccupation, notamment avec Edward Wilson pour qui « *la biodiversité est l'une des plus grandes richesses de la planète, et pourtant la moins reconnue comme telle* ». En 1983, Norman Myers attirait l'attention sur la richesse apportée au bien-être de l'humanité par la diversité biologique²³, tandis qu'en 1998, Robert Costanza et ses collaborateurs ouvraient un vif débat en chiffrant à plus de 33 000 milliards de dollars par an, la totalité des services rendus à l'humanité par les écosystèmes de la planète – une évaluation mise en regard avec les 18 000 milliards de dollars du PIB mondial. Plus récemment, deux rapports ont proposé des analyses stimulantes de l'évaluation de la biodiversité – le premier dirigé par l'Indien Pavan Sukhdev sous l'égide de l'ONU²⁴, le second dirigé par le Français Bernard Chevassus-au-Louis, à la demande du Premier ministre au lendemain du Grenelle de l'environnement²⁵. Ces deux rapports ouvrent des voies nouvelles pour que « *toutes les décisions publiques soient arbitrées dans le futur en intégrant leur coût pour la biodiversité* ».

Quelques valeurs de services écosystémiques. L'*Évaluation des écosystèmes pour le millénaire* a établi une véritable typologie des services rendus par les milieux naturels. Au delà de cette typologie, la biodiversité apparaît comme un paramètre majeur de la valeur de ces services. Et ces « services » n'ont jamais cessé de surprendre : qui pouvait imaginer que des champignons seraient à l'origine de la découverte de la pénicilline (*Penicillium notatum*), ou serviraient comme immunosuppresseurs (*Tolypocladium Inflatum*) en élaborant la cyclosporine ? Et que penser de l'if (*Taxus baccata*) dont un extrait, le taxol, est un médicament anticancéreux comme le sont la vinblastine et la vincristine, molécules isolées de la pervenche de Madagascar (*Cataranthus roseus*), espèce un temps menacée de disparition ? En fait, chaque organisme vivant peut recéler un trésor à l'exemple de la G.F.P. (Green Fluorescent Protein), protéine issue des méduses *Aequorea victoria*, très largement utilisée dans l'imagerie biologique *in vivo*, et dont la découverte a reçu les honneurs du prix Nobel de chimie en 2008.

A d'autres échelles, les interactions entre insectes et plantes peuvent détruire ou, au contraire, favoriser les productions agricoles. Le service rendu par des pollinisateurs comme les abeilles a été estimé pour la France à 2 milliards d'euros par an. Selon une étude dirigée par Jean-Michel Salles du CNRS et Bernard Vaissière de l'INRA, l'apport des insectes pollinisateurs aux principales cultures mondiales en 2005 peut être évalué à 153 milliards d'euros, soit 9,5% de la valeur de la production

²² Krutilla J.V., 1967 *American Economics Review* 57, 777.

²³ Myers N, 1983 *A wealth of wild species*. Storehouse for human welfare, Boulder, Westview Press.

²⁴ Sukhdev P. (2008). L'économie des écosystèmes et de la biodiversité, Rapport d'étape. Office des publications officielles des Communautés européennes.

²⁵ Chevassus au Louis B. et al. (2009). *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique*. Centre d'Analyses stratégiques. www.strategie.gouv.fr

alimentaire mondiale. De son côté, le rapport Chevassus-au-Louis donne une valeur de référence de 970 euros par hectare et par an pour une forêt tempérée, avec une fourchette comprise entre 500 et 2 000 euros par hectare et par an selon, en particulier, la fréquentation touristique ou récréative et le mode de gestion de l'écosystème. Il est clair que ce ne sont là que des valeurs de référence, susceptibles de varier selon les lieux et le temps, par exemple en fonction de choix publics, d'actualisations, d'enjeux socioéconomiques, d'objectifs de politique environnementale.

Quelles que soient ces variations, la diversité biologique a une valeur inestimable en ce sens qu'elle représente la Vie dont nous, humains, faisons partie. Elle donne à la Vie son étonnante capacité d'adaptation à un environnement sans cesse changeant... à condition de disposer de temps et d'espace.

3.6. Dans quelle mesure les immenses progrès dans les sciences du vivant permettent-ils de mieux connaître la biodiversité, son rôle dans la nature, et de comprendre ce qui la modifie?

Michel Delseny (Correspondant de l'Académie des sciences)

La biodiversité peut s'analyser à différents niveaux. A un premier niveau, c'est l'ensemble des espèces existantes à la surface de la planète, dont on peut faire l'inventaire (encore inachevé) et suivre l'évolution de façon quantitative en fonction du temps. Un second niveau d'analyse est celui de la population et de l'espèce: y a-t-il une variabilité génétique entre individus d'une même espèce au sein d'une population ou entre individus de populations différentes ?

L'utilisation de critères morphologiques, puis de marqueurs biochimiques, et enfin moléculaires a permis d'aborder ces questions tant chez les animaux que chez les plantes. Nous avons volontairement limité notre exposé aux espèces végétales. Les premiers résultats ont montré, comme on pouvait s'y attendre, que la variabilité au sein d'une espèce dépend essentiellement du système de reproduction: les espèces autogames (le pollen d'un individu féconde les ovules du même individu) sont de façon générale nettement moins variables que les espèces allogames chez qui la fécondation croisée est possible ou obligatoire (le pollen d'un individu féconde les ovules d'un autre individu). Un autre facteur important de variabilité est l'isolement géographique et sa durée.

Au début des années 1990, on a commencé à utiliser massivement les microsatellites comme marqueurs génétiques pour apprécier la biodiversité. Ce sont des marqueurs simples (des répétitions plus ou moins longues d'un motif de quelques nucléotides), relativement polymorphes et a priori neutres, qui sont dans l'ensemble faciles à analyser par les méthodes classiques de la biologie moléculaire. Pour les principales espèces cultivées et quelques espèces sauvages il est apparu que pour un même marqueur microsatellite, il y avait souvent au sein d'une même espèce plusieurs formes ou allèles. En dénombrant les allèles communs à différents individus, ou à différentes populations, il est possible de classer les individus, ou les populations, en fonction de leur proximité génétique, ceux qui ont le plus d'allèles en commun étant les plus proches. Il est ainsi possible de déterminer la structure d'une

population ou celle d'une ressource génétique. Cet outil s'est révélé extrêmement utile tant pour conserver les ressources génétiques que pour programmer les croisements à réaliser afin d'améliorer les plantes.

Il y a dix ans, il est devenu possible de déterminer la séquence quasi complète d'un génome, même si c'est une opération coûteuse. Le premier génome analysé chez les plantes a été celui de l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), une petite crucifère qui sert de modèle aux généticiens au même titre que la drosophile ou la souris pour les animaux. L'élucidation de ce génome a été suivie 4 ans plus tard par celle du riz. On dispose actuellement de huit autres génomes de plantes publiés (peuplier, vigne, papayer, sorgho, concombre, maïs, soja et brachypodium). L'essor des nouvelles méthodes de séquençage, apparues à partir de 2005, permet maintenant d'étudier un génome beaucoup plus facilement et rapidement pour un coût qui reste raisonnable (quelques centaines de milliers d'euros). De ce fait une cinquantaine d'autres génomes de plantes sont actuellement en cours de séquençage et on peut estimer que d'ici 5 ans on disposera de séquences génomiques de qualité correcte pour les principales espèces cultivées et sans doute quelques espèces sauvages. La capacité et le débit des nouvelles méthodes de séquençage sont tels qu'il est maintenant possible de re-séquencer les génomes d'individus, de variétés ou de populations différentes d'une même espèce et ainsi de décrire, avec une résolution jamais atteinte, la variabilité génétique d'une espèce. Ces nouvelles approches permettent aussi de comprendre quels sont les moteurs de la biodiversité et comment elle évolue. Seules quelques espèces bénéficient actuellement de tels programmes: *Arabidopsis*, le riz, le maïs, la vigne et le soja. Les travaux les plus avancés concernent les trois premières espèces.

Chez *Arabidopsis*, dans le cadre du projet "1001 génomes", il est prévu d'échantillonner 10 régions géographiques, d'y prélever 10 populations et pour chaque population de séquencer 10 individus. En comparant 2 lignées avec celle de référence, plus de 800 000 différences simple nucléotide (SNP, Single Nucleotide Polymorphism) et près de 80 000 délétions ou insertions d'un à trois nucléotides ont été repérées. Près de 3,5 millions de nucléotides sur les 130 millions qui constituent le génome sont très divergents entre les 2 lignées et celle de référence. On considère que ces différentes mutations affectent près d'un millier de gènes et déterminent ainsi les différentes caractéristiques phénotypiques des lignées. Des gènes actifs dans une lignée peuvent être altérés et inactivés dans une autre. Un autre projet a visé à évaluer expérimentalement le taux de mutation. *Arabidopsis* est maintenue à l'état de lignées, en principe homogènes, par autofécondation. Cinq individus ont été échantillonnés après 30 générations d'autofécondation, séquencés et comparés à l'échantillon dont ils descendaient: des différences significatives ont été observées.

Chez le riz, on savait déjà que les variétés et populations sont structurées en différents groupes, dont les principaux sont les *japonica* et les *indica* (les riz qui poussent en Chine et au Japon d'une part, et ceux qui poussent en Inde et Thaïlande, d'autre part). Les génomes de vingt espèces cultivées ont été partiellement re-séquencés, révélant que les lignées *indica* diffèrent des lignées *japonica* par environ 150 000 SNP, alors qu'au sein de chaque groupe, la différence est de l'ordre de 60 à 90 000 SNP. On peut ainsi, à partir de ces travaux, reconstituer l'histoire évolutive de l'espèce et déterminer quelles sont les régions qui ont été sélectionnées par les agriculteurs. On peut également, en se focalisant sur certains

gènes comme ceux qui déterminent la date de floraison, comprendre l'adaptation des diverses variétés aux différentes latitudes et luminosités.

Les travaux menés sur le maïs sont eux particulièrement intéressants car le système de reproduction est différent, les variétés de maïs dérivant le plus souvent de croisements complexes. L'étude du génome montre comment les gènes disparaissent et comment d'autres apparaissent à cause de l'activité des éléments transposables (des petites séquences d'ADN capables de changer de place dans le génome et de s'y multiplier). On pense que ces mouvements se font à la faveur de stress affectant la plante. Lorsqu'un transposon s'installe quelque part, il peut inactiver un gène ou ses séquences régulatrices. Inversement une séquence régulatrice dans le transposon peut activer un gène voisin et modifier radicalement certains aspects de la plante. Un événement de ce type est à l'origine de la différenciation du maïs et de son ancêtre la téosinte: la régulation du gène *Tb* qui contrôle le branchement des épillets dans l'épi a été modifiée par le passage d'un élément transposable. En bougeant, ou en se recombinant, les transposons peuvent provoquer des délétions et ainsi éliminer des gènes, ou encore entraîner avec eux des fragments d'un gène voisin et les réassocier, ailleurs dans le génome, à d'autres fragments et donner ainsi naissance à une nouvelle séquence qui peut devenir un gène nouveau. Le résultat de ce brassage est impressionnant et on estime actuellement qu'il y a plus de différences, au niveau génétique, entre deux variétés de maïs qu'entre un homme et un chimpanzé !

On ne peut donc considérer la biodiversité comme statique et fixée au niveau des génomes. Les nouvelles méthodes de séquençage révèlent chaque jour que ces génomes sont extrêmement fluides et dynamiques et que cette fluidité est l'un des moteurs de l'évolution de la biodiversité.

3.6. Dans quelle mesure les immenses progrès dans les sciences du vivant permettent-ils de mieux connaître la biodiversité, son rôle dans la nature, et de comprendre ce qui la modifie? (suite)

François Gros (Membre de l'Académie des sciences)

Les avancées majeures que connaissent les sciences de la vie depuis ces dernières décennies ont souvent bénéficié – et seront sans doute appelées à le faire davantage – à la connaissance, à la conservation, voire à une exploitation plus raisonnée de la biodiversité.

Déjà, dès les années 80, la biologie moléculaire avait conduit à établir la classification des espèces (notamment bactériennes) sur des critères plus objectifs que par le passé (par exemple, grâce aux techniques d'hybridation moléculaire ADN-ADN). Par la suite, l'avènement de la génomique (c'est-à-dire la détermination de la séquence chimique intégrale de l'ADN présent dans le matériel héréditaire de l'espèce), combiné à l'utilisation de l'informatique dans le traitement des données, a profondément renouvelé l'étude de la diversité biologique. Ainsi, dans le règne végétal, la génomique ne permet pas seulement d'affiner les données de la systématique classique, elle donne désormais accès à un grand nombre de gènes "d'intérêt" en agriculture, foresterie, horticulture, etc, gènes responsables de

propriétés recherchées par les sélectionneurs (croissance, robustesse, résistances aux agents pathogènes, aux stress, richesse en protéines).

Mais c'est au sein du monde microbien que les plus gros progrès sont sans doute en train de s'accomplir. En premier lieu, des centaines de génomes de bactéries ont été séquencés, fournissant souvent des éclairages très importants sur les causes de la virulence de diverses espèces pathogènes (ex : formes pathogènes d'E. coli, bacille de Koch, bacille de la lèpre, etc.) et laissent entrevoir de nouvelles formes de vaccins. De manière plus significative, et depuis guère plus d'une décennie, une nouvelle stratégie, baptisée "métagénomique" ou "génomique environnementale", permet d'appréhender "en bloc", la biodiversité de populations entières de microorganismes bactériens, planctoniques, ainsi que de parasites, de virus ou encore de protistes vivant dans des écosystèmes complexes (sols, bassins d'épuration, flore digestive, milieu marin, etc.). Cette nouvelle démarche exploratoire repose sur l'extraction de l'ensemble des ADN existants dans la population, son amplification par la technique PCR, sa fragmentation, le clonage et le séquençage des fragments obtenus ; les séquences ainsi acquises sont comparées à celles de micro-organismes déjà répertoriés dans les bases de données. Dès lors on est en mesure d'en inférer l'existence de multiples espèces inconnues, généralement très difficilement cultivables.

Les données issues de la métagénomique démontrent que la biodiversité de l'infiniment petit est énorme ! Sans doute près de cent fois supérieure à celle déjà répertoriée. Au vu des premiers résultats, de nombreuses retombées sont à en attendre dans les domaines de la biomédecine (virologie, pathologies digestives, etc.), de l'agronomie (microbiologie des sols) ou en océanologie (flore bactérienne et planctonique des profondeurs).

3.6. Dans quelle mesure les immenses progrès dans les sciences du vivant permettent-ils de mieux connaître la biodiversité, son rôle dans la nature, et de comprendre ce qui la modifie? (suite)

Bernard Kloareg (Correspondant de l'Académie des sciences) avec Gurvan Michel et Mark Cock (Station biologique de Roscoff, CNRS-UPMC)

Le mot biodiversité, une contraction de diversité biologique, recouvre deux grandes problématiques. L'une cherche à décrire la diversité des espèces vivantes qui peuplent aujourd'hui les différents écosystèmes. Une autre vise à comprendre comment cette biodiversité est apparue et s'est développée sur la Terre.

Historiquement, à partir de la classification de Haeckel en 1866, les formes de vie que nous percevons le plus communément autour de nous ont été regroupées en trois grands "règnes", les animaux, les plantes et les protistes. Cette division du vivant était fondée essentiellement sur la comparaison des caractères anatomiques et des cycles de reproduction, selon le principe que, si deux espèces partagent des caractères semblables, elles sont des taxons apparentés. Cette perception de "l'arbre de la vie" reste encore aujourd'hui profondément ancrée dans le sens commun, en dépit du fait que des pans entiers de cette classification ont été remis en question par les progrès de la biologie moléculaire.

On dispose en effet aujourd'hui de très nombreuses données sur les gènes des organismes vivants. Les gènes qui codent pour des protéines de même fonction et qui sont homologues (ils dérivent d'un même gène ancestral) constituent autant de caractères de l'évolution, à comparer par des méthodes dites de phylogénie moléculaire. Leur degré d'apparement est alors analysé en utilisant des approches algorithmiques, a priori plus objectives que les déductions taxonomiques.

Les études de phylogénie moléculaire fondées sur divers gènes nucléaires homologues montrent que les trois règnes délimités par Haeckel se composent en fait de huit lignées majeures, bien distinctes. On peut certes les regrouper en trois grands règnes, mais ces règnes sont très différents de ceux initialement proposés. Le premier regroupe les amibes, les animaux et les champignons, un ensemble d'organismes non photosynthétiques désigné par le terme d'Unichontes. Le deuxième englobe les algues rouges (Rhodophytes), les algues vertes (Chlorophytes) et les plantes terrestres (Embryophytes), constituant le règne des Archaeplastidés. Le troisième, enfin, est constitué par les dinoflagellés (tels que ceux qui forment les "marées rouges"), les alvéolés (tels que l'agent du paludisme, *Plasmodium*), les diatomées, les algues brunes (Phéophytes) ou encore les oomycètes (on y trouve des pathogènes des cultures agronomiques, qui ne sont donc plus considérés comme des champignons). Ce dernier grand ensemble est désigné par le terme de Chromalvéolés. En dépit du fait que tous ses membres sont autotrophes (ou l'ont été au cours de leur évolution), ils sont aussi éloignés phylogénétiquement des Archaeplastidés que des Unichontes.

L'étude des parentés phylogénétiques des gènes des plastes, ces organites qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique (photosynthèse), a montré que les plastes dérivent tous d'une cyanobactérie. Tous les végétaux sont donc issus d'endosymbioses plastidiales. L'endosymbiose plastidiale dite primaire, entre un eucaryote hétérotrophe primitif et une cyanobactérie photosynthétique, a permis l'émergence des algues rouges et des algues vertes. Les Embryophytes, qui ont pour ancêtre direct une algue verte de la classe des Charales, forment ainsi un sous-embanchement de ce règne. Au cours des endosymbioses plastidiales dites secondaires, des algues unicellulaires rouges ont, indépendamment et à plusieurs reprises au cours de l'évolution, établi des symbioses avec des eucaryotes unicellulaires hétérotrophes, donnant ainsi naissance aux diverses lignées chromalvéolées.

Les méthodes de phylogénie moléculaire ont donc au début, dès 1990, profondément modifié notre vision de l'origine et de l'évolution des végétaux, terrestres ou marins. Ces derniers sont communément appelés algues. Ce terme apparaît aujourd'hui comme un terme générique sans grande signification phylogénétique. En caricaturant à peine, il y a en effet autant de distance évolutive entre une algue brune et une algue rouge qu'entre une algue brune et un éléphant. Si l'on raisonne en termes de grandes lignées évolutives, il apparaît également que le milieu marin renferme bien plus de diversité végétale que les environnements terrestres. C'est dû au fait que le passage sur la terre ferme a été un goulot d'étranglement pour beaucoup de ces grandes lignées. Par exemple, on ne trouve pas d'algues brunes ni d'algues rouges dans les écosystèmes terrestres.

Nous avons entrepris de développer des approches de génomique sur les algues brunes et les algues rouges, deux lignées végétales majeures restées quasiment

inexplorées à ce jour. Le génome complet de l'algue brune *Ectocarpus siliculosus* est désormais disponible (Cock et coll., *Nature*, 2010, 465, 617-622).

Ces nouvelles données permettent d'analyser avec un angle de vue jamais utilisé jusqu'à présent, celui centré sur les Chromalvéolés, les mécanismes moléculaires qui permettent l'émergence de la multicellularité complexe chez les eucaryotes. Cette dernière est apparue dans cinq lignées majeures, les algues rouges, les algues vertes et les plantes, les algues brunes, les champignons et les animaux, de façon indépendante donc (toutes ces lignées sont issues d'ancêtres unicellulaires). En dépit du caractère convergent de ce processus évolutif, on s'attend à ce que le développement de la multicellularité mette en jeu, dans chacune de ces lignées, des évolutions des génomes qui affectent la composition de la matrice extracellulaire (qui rend les cellules cohésives et permet la formation de tissus), les mécanismes du développement (la capacité à construire à chaque génération le même organisme à partir d'un zygote unicellulaire) et l'immunité innée (la capacité à se défendre contre les agressions).

L'étude approfondie du génome d'*E. siliculosus* montre que les algues brunes ont adopté une stratégie semblable à celles des autres lignées pluricellulaires, mais en utilisant des éléments spécifiques. On y trouve ainsi une famille originale de récepteurs transmembranaires, vraisemblablement impliqués dans la régulation du développement (Cock et coll., *Nature*). Il apparaît également que le mannitol, un polyol utilisé pour le transport du carbone organique, et l'alginate, le polysaccharide matriciel majeur des algues brunes et connu pour être impliqué dans la reconnaissance du non soi chez ces végétaux, ont tous deux été acquis par un transfert de leur métabolisme à partir d'une actinobactérie ancestrale. Cet événement a sans doute beaucoup contribué à l'évolution des algues brunes vers la pluricellularité (Michel et coll., *New Phytologist*, 2010a, 2010b). Ces données montrent, enfin, que de nombreux gènes jusqu'alors considérés comme présents uniquement chez les animaux le sont également chez les algues brunes (intégrines, sulfotransférases et sulfhydrolases agissant sur les polysaccharides sulfatés de la matrice extracellulaire, etc.). Il s'agit donc de gènes ancestraux que les plantes terrestres ont perdus lors de leur diversification après la sortie de l'eau.

En conclusion, les progrès de la génétique, qui culminent aujourd'hui dans les approches de génomique structurale et fonctionnelle, modifient complètement notre vision de la classification du vivant et nous éclairent beaucoup sur l'origine et l'évolution de la biodiversité. Ainsi, les travaux décrivant l'ensemble des gènes présents chez des plantes et des algues marines représentatives de grandes lignées évolutives permettent de retracer l'origine et l'évolution des végétaux et celle des constituants cellulaires des organismes vivants. Ils nous renseignent également sur les bases moléculaires qui ont permis l'émergence des organismes pluricellulaires. Enfin, ils permettent de mieux comprendre l'adaptation des plantes lors de la conquête des milieux terrestres. Ces recherches nous font ainsi dépasser la vision "horizontale" de la biodiversité contemporaine et soulignent que les organismes vivants sont des archives de plusieurs milliards d'années d'évolution.

4. Quels sont les faits nouveaux qui suscitent des inquiétudes chez les scientifiques ?

4.1. Quelles sont les principales causes de changement de la biodiversité ? Y a-t-il un lien entre la rapidité et l'ampleur du changement climatique et celles de la variation de la biodiversité?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

La disparition des habitats naturels est une cause majeure du changement actuel de biodiversité. D'autres causes sont souvent également évoquées : pollutions des sols et des eaux, invasions d'espèces exotiques, changement climatique. Toutes ces causes agissent de concert, de manière variable selon les régions.

Concernant le climat, il est difficile de prévoir les conséquences du réchauffement actuel sur la biodiversité, d'une part parce que les espèces répondent différemment à ce réchauffement, d'autre part parce que ces réponses dépendent d'événements météorologiques extrêmes dont on comprend mal les évolutions à venir, qu'il s'agisse de leur intensité ou de leur fréquence. Il est aussi difficile de s'appuyer sur le passé en ce domaine : le changement climatique actuel paraît plus ample et plus rapide que ceux des 500 000 dernières années ; et il affectera des écosystèmes largement modifiés par les activités humaines.

Cependant, le changement climatique a déjà interrompu de nombreuses interactions entre espèces au sein des écosystèmes. La moitié de toutes les espèces sauvages pour lesquelles nous disposons de données sur le long terme ont répondu d'une manière ou d'une autre au réchauffement local, régional ou continental – des herbes aux arbres, du plancton aux poissons, des insectes aux mammifères, quels que soient les continents ou les océans considérés. Globalement, au cours des quarante dernières années, les aires de répartition des espèces se sont déplacées vers les pôles sur des distances variant de 50 à 100 kilomètres. Ainsi les chenilles de la processionnaire du pin ont-elles envahi de nouveaux territoires vers le Nord. En montagne, on assiste de même à des glissements d'aires de répartition vers les altitudes plus élevées. Dans tout l'hémisphère nord, de nombreuses espèces réagissent à l'existence de printemps plus précoces et d'automnes plus tardifs. Et ces réactions diffèrent d'une espèce à l'autre, d'où des décalages entre ces espèces, de nouveaux rapports au sein des communautés d'espèces, et de nouvelles dynamiques, affectant la vie sauvage (associations, compétitions, prédatations), mais aussi la santé humaine (épidémies, parasites) et des secteurs entiers de production agricole, forestière ou de la pêche.

Les modifications des régimes des températures et des précipitations sont susceptibles de transformer la structure et le fonctionnement des écosystèmes, de même que les répartitions géographiques des espèces et les interactions que ces espèces développent entre elles, avec des conséquences sur la biodiversité et les services écologiques. Pour des températures moyennes globales supérieures de 2 à 3°C à celles de l'ère préindustrielle, le risque d'extinction augmentera

vraisemblablement pour 20 à 30% des plantes et animaux étudiés à cet égard. Pour des températures moyennes globales supérieures de 4°C à celles de l'ère préindustrielle, ce même risque augmenterait pour 40 à 70% des plantes et animaux étudiés.

Indépendamment des modifications des régimes des températures et des précipitations, l'augmentation des teneurs en CO₂ de l'atmosphère est à elle seule susceptible d'affecter directement les écosystèmes terrestres et marins. A court terme, certaines plantes – blé, riz, espèces des climats froids – pourraient bénéficier de teneurs en CO₂ plus élevées car ces dernières sont susceptibles d'accroître les taux de photosynthèse, mais pour combien de temps et dans quelle mesure ? En forêt tropicale, les lianes risquent d'être favorisées au détriment des arbres par une augmentation des teneurs en CO₂ atmosphérique, avec des conséquences négatives sur les possibilités de stockage du carbone dans ces écosystèmes. En milieu océanique, l'acidification des eaux consécutive à une augmentation des teneurs en CO₂ atmosphérique affecterait profondément certains organismes marins, particulièrement ceux qui dépendent du processus de calcification pour construire leurs coquilles comme les mollusques, ou pour édifier leurs récifs comme les coraux. Cette acidification est par ailleurs susceptible de diminuer la capacité des océans à absorber le CO₂, augmentant ainsi les quantités restant présentes dans l'atmosphère.

4.2. Les variations de la démographie, l'urbanisation, le développement économique et industriel ont-ils un impact sur la biodiversité ?

Henri Leridon (Correspondant de l'Académie des sciences) et Ghislain de Marsily (Membre de l'Académie des sciences)²⁶

L'effet de la démographie sur la biodiversité est en principe direct : si l'humanité est plus nombreuse, elle a besoin de plus d'espaces pour vivre et se loger, de plus de productions alimentaires pour se nourrir, et de plus de produits industriels et d'énergie, même à consommation individuelle constante. Si on y ajoute le développement économique et l'accroissement de consommation qu'elle engendre (modifications des habitudes alimentaires, consommation accrue de biens matériels et d'énergie, besoins accrus d'espaces tant urbains que pour le transport), la croissance démographique et économique se fait nécessairement aux dépens des espaces naturels qu'il faut aménager ou cultiver, des écosystèmes que ces espaces contiennent, des ressources en eau, en sols, en matériaux, en minéraux, en énergie que nous utilisons chaque jour davantage pour nos besoins... La croissance se fait donc *in fine* nécessairement au détriment de la biodiversité. C'est indiscutable.

Or il s'agit là de tendances lourdes. L'accroissement de la population mondiale est inéluctable pendant encore plusieurs décennies. Le développement économique de toute la partie du monde la moins avancée se poursuivra aussi. Les seules marges de manœuvre pour réduire la dégradation de la biodiversité résideront donc dans les *façons* de consommer et de produire. Deux voies principales s'ouvrent à nous.

²⁶ Ces quelques éléments sont issus du Rapport RST de l'Académie des Sciences n°31, "Démographie, climat, alimentation mondiale", à paraître chez EDP Sciences à l'automne 2010.

La première se résume à la *frugalité*, sous diverses formes que nous allons brièvement évoquer. Les sociétés développées actuelles se caractérisent par une consommation et un gaspillage sans limite. Par exemple, on estime que 30% de la nourriture produite et commercialisée dans les pays développés est perdue, jetée sans avoir été consommée ou même déconditionnée, alors que près d'un milliard d'êtres humains ne mangent pas à leur faim dans d'autres continents. Autre exemple, l'excès de consommation de produits d'origine animale, de graisses, de sucres, conduit l'humanité à de graves problèmes d'obésité et de surpoids²⁷ : outre les conséquences directes sur la qualité de vie des personnes concernées, ces pathologies entraînent des maladies graves, allant des affections cardio-vasculaires au cancer colorectal. Il est indispensable, pour faire face à la croissance démographique, de restaurer des consommations alimentaires mieux adaptées, économes en ressources, comportant une part moindre de calories d'origine animale dans les pays développés. Le gaspillage de nourriture doit être farouchement combattu, dans les faits et surtout dans l'esprit des citoyens. C'est la seule façon de réduire l'empreinte écologique de l'humanité pour sa nourriture.

Dans le même esprit, la terre agricole doit impérativement être protégée et conservée, en particulier (mais pas seulement) dans les pays développés, pour éviter de devoir aller défricher là les espaces cultivables qui font défaut ici. On perd actuellement en terre agricole l'équivalent de la surface d'un département français par an dans l'Europe des 27, ou encore d'un département français tous les dix ans en France. Ces pertes sont dues à l'urbanisation, à l'extension du réseau de transport, aux constructions industrielles. L'habitat dispersé pavillonnaire est à ce titre une catastrophe : il faut impérativement redensifier l'habitat (et les superficies mises à disposition de chacun) si l'on veut lutter contre les pertes en terre et, partant, le défrichement et la perte de biodiversité. On pourrait dire la même chose pour la sur-consommation de produits industriels, le non recyclage, etc., ou par exemple l'ensemble des ressources consommées pour le transport individuel par rapport au transport collectif.

La seconde voie, complémentaire, qui s'offre à nous, est la recherche de *l'efficacité*, par l'amélioration technologique. Toute innovation qui procure le même service en utilisant moins d'énergie, de matière (ciment, métaux, molécules organiques...), de ressources naturelles (eau, bois, fibres textiles naturelles), contribue à la préservation de la biodiversité. Il faut analyser le "cycle de vie" de chaque produit industriel, et s'efforcer de minimiser son empreinte écologique à service donné. Il faut d'ailleurs améliorer et généraliser ces outils d'analyse du cycle de vie. Les matériaux nouveaux (composites...), les objets plus légers et plus petits, les outils pluri-fonctionnels (par exemple de télécommunication) ou une meilleure organisation sociale (téléconférences, télétravail...) permettent aussi de réduire l'empreinte écologique des habitants de la planète. Il faut s'y engager sans tarder, avec plus d'ardeur, en l'associant au changement des habitudes mentales, allant vers la frugalité, car il ne servirait pas à grand chose de développer ces nouveaux outils, ces nouvelles techniques, si cela conduisait à en consommer davantage, en remplaçant le vieux par du neuf, avant qu'il ne soit arrivé en fin de vie.

²⁷ On estimait en 2005 à 1,3 milliard le nombre d'adultes en surpoids, dont 400 millions d'obèses, soit respectivement 33% et 10% de la population d'adultes mondiale. Plus de 800 millions de ces personnes vivent dans les PED. Si les tendances récentes se poursuivent, la planète comptera 3,3 milliards de personnes en surpoids en 2030, dont 80% dans les PED.

En somme, l'humanité n'a pas le choix. La croissance démographique, bien qu'elle ralentisse, est certaine : nous serons environ 9 milliards d'habitants sur terre en 2050, sauf catastrophe planétaire (la moitié de l'accroissement ayant lieu en Asie du Sud, du Sud-Est et de l'Est, et la plus grande partie de l'autre moitié en Afrique). Si nous réussissons à aider à un contrôle encore meilleur des naissances non voulues, par exemple par l'éducation, nous serons quand même 8,5 milliards en 2050, et cette différence de 500 à 700 millions représenterait un gain important pour la biodiversité de la planète. A 8 ou 9 milliards d'humains sur Terre, si nous ne développons pas des mœurs plus frugales, en particulier pour nous nourrir, si nous ne préservons pas la terre agricole, si nous ne nous battons pas pour l'efficacité, alors il est fort probable que la Terre que nous léguerons à nos enfants aura perdu une part significative de sa biodiversité, par accaparement pour nos propres besoins des espaces naturels, riches en biodiversité. Sans connaître aujourd'hui les seuils au dessous desquels une trop faible biodiversité pourrait compromettre la vie de l'homme sur Terre, il faut déjà poser la question : la Terre sera-t-elle encore viable ?

4.2. Les variations de la démographie, l'urbanisation, le développement économique et industriel ont-ils un impact sur la biodiversité ? (suite)

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

L'ingénierie écologique. Clairement, le développement économique et industriel de ces dernières décennies s'est traduit par l'érosion de la biodiversité, la pollution des milieux naturels, voire leur destruction. Cependant, l'évaluation de cet impact n'a de sens que si elle amène à intégrer la protection de la biodiversité dans les pratiques de développement, à utiliser les biens et les services délivrés par les écosystèmes, à dégager des mesures de mitigation et de compensation. Tout ce travail oblige à un vaste effort de recherche, d'autant plus difficile qu'il doit tenir compte de diverses parties prenantes, dans le but de dégager des objectifs de biodiversité compatibles avec des activités économiques et industrielles durables. Dans cette perspective, la force de l'écologie est d'être une science de proposition vis-à-vis du développement économique et industriel des années à venir, à toutes les échelles : locales, régionales, continentales.

Cette science de proposition peut prendre différentes formes, dont celle de l'ingénierie écologique, application des principes de l'écologie à la gestion de l'environnement. L'ingénierie écologique permet par exemple de tirer parti des connaissances acquises sur le fonctionnement et la dynamique des populations, des communautés et des écosystèmes pour utiliser des microorganismes afin d'épurer les eaux usées, ou des plantes accumulatrices de métaux lourds afin de réhabiliter certains sols pollués. Elle est appelée à se développer dans une perspective de protection de la biodiversité, d'adaptation au changement climatique, de réconciliation des sociétés humaines avec leur milieu naturel.

L'appel d'offres de recherche 2010 du CNRS et du Cemagref, définit l'ingénierie écologique comme "l'utilisation, le plus souvent *in situ*, parfois en conditions contrôlées, de populations, de communautés ou d'écosystèmes dans le but de modifier une ou plusieurs dynamiques biotiques ou physico-chimiques de l'environnement dans un sens réputé favorable à la société et compatible avec le

maintien des équilibres écologiques et du potentiel adaptatif de l'environnement"²⁸. L'ingénierie écologique conduit ainsi à la production de technologies "éco-compatibles" dérivées de la connaissance du fonctionnement des systèmes écologiques pour épurer les eaux, traiter les déchets, transformer notre habitat, configurer nos systèmes industriels... Elle permet en outre de restaurer certains milieux naturels dans un souci de bien commun. Cette utilisation du vivant conduit clairement à une réflexion de nature scientifique et sociale, mais aussi éthique quant à ses conséquences sur l'aménagement des territoires, la réhabilitation d'écosystèmes dégradés, la réintroduction d'espèces, la création de nouveaux écosystèmes durables, la manipulation *in situ* de systèmes écologiques pour en tirer tel service plutôt que tel autre.

Les perspectives ouvertes par l'ingénierie écologique alimentent une véritable écologie industrielle dont le but est de repenser notre activité de production et de consommation sur le modèle des écosystèmes²⁹. Des réalisations préfigurent déjà certains développements à venir, par exemple la symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark – sorte de chaîne alimentaire de sept industries, chacune se nourrissant des déchets de ses voisines, minimisant ainsi ses besoins en matière première et réduisant ses déchets. Autre réalisation, le *Beddington Zero fossil Energy Development*, dans laquelle tout un quartier de Londres se développe sans consommation d'énergie fossile, "neutre en carbone", c'est-à-dire produisant au moins autant d'énergie renouvelable qu'il en consomme. Ailleurs, la station hydraulique souterraine de Sécheron pompe l'eau du lac Léman pour la distribuer à basse température à tout un quartier de Genève, économisant l'énergie nécessaire pour produire du froid...

Ainsi se met en place peu à peu la possibilité d'une "croissance verte" basée sur une utilisation plus parcimonieuse de la ressource énergétique et des matières premières non renouvelables. Ses avantages ? Émettre moins de gaz à effet de serre, privilégier des technologies moins néfastes pour l'environnement, permettre d'utiliser les services rendus par les écosystèmes, respecter les cultures et les patrimoines, promouvoir la participation de tous aux décisions,... sans oublier la possibilité d'emplois pour différentes filières : transports, bâtiment, agriculture, tourisme, biodiversité-services écologiques...

L'ingénierie écologique est donc un outil nouveau pour adapter les sociétés aux changements globaux et adopter des modes de développement durable. La demande en ce domaine continuera à exploser, prédisent les écologues³⁰. Car la biodiversité apparaît de plus en plus comme une opportunité nouvelle pour affirmer la compétitivité des entreprises. Elle s'insère désormais dans les stratégies élaborées par ces entreprises, créant de nouveaux marchés, de nouveaux besoins en compétence et en organisation, et de nouvelles perspectives en matière de recherche, de formation et d'action.

²⁸ <http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes/IngECOTech/IngEcoTech.htm>

²⁹ Erkman S. (2004) *Vers une écologie industrielle* Ed.Mayer.

³⁰ Abbadie L. L'ingénierie écologique et les entreprises. Journées de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité. Paris, 18 novembre 2008

4.3. En estimant le rythme de disparition actuel des espèces et en le comparant aux périodes d'extinction du passé, peut-on parler de crise de la biodiversité ?

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

Les espèces apparaissent et disparaissent depuis l'origine de la vie. Le cas des vertébrés est bien documenté. La durée de vie moyenne d'une espèce peut être estimée à partir des données paléontologiques et de l'analyse des divergences entre espèces. On sait par exemple que le chimpanzé et l'homme ont divergé d'un ancêtre commun il y a quelques millions d'années. Ces approches donnent une durée de vie pour une espèce de vertébré de l'ordre d'un million d'années ou plus. Parmi environ 50 000 espèces, il devrait donc disparaître au plus $50\,000/1\,000\,000 = 0,050$ espèce par an. Le nombre d'espèces qui apparaissent devrait être voisin mais il est impossible à évaluer, du fait de la description régulière d'espèces passées inaperçues, nouvelles seulement pour la science.

Or on sait, car on en a la liste, que plus d'un vertébré par an a disparu au cours des cinq derniers siècles sous l'effet des activités humaines. C'est le cas du célèbre "dodo" de l'île Maurice, un gros parent des pigeons inapte au vol, exterminé par l'homme au XVII^{ème} siècle. Le taux de disparition des vertébrés a été multiplié au minimum par 20.

Cette accélération a malheureusement débuté il y a des millénaires. La disparition rapide de nombreux mammifères à la fin des glaciations en Amérique du Nord résulte en partie de la chasse par les Amérindiens. Les moas, cousins géants des actuels kiwis, ont été éradiqués par les Maoris il y a quelques siècles. Plus frappant encore, de -1 500 avant notre ère à 1 500, on estime que près de 2 000 espèces d'oiseaux insulaires ont disparu (20 % de l'avifaune mondiale). Près de 10 % des vertébrés ont donc disparu au cours des derniers millénaires sous l'action de l'homme. Alors que l'emprise de l'homme sur la biosphère s'accroît, on ne peut donc taxer de pessimisme l'Union Internationale de Conservation de la Nature, une ONG respectée, qui déclare que sont menacés aujourd'hui 10 % des oiseaux, au moins 20 % des mammifères, et 18 % des reptiles...

La faune des îles, souvent adaptée à l'absence de prédateurs et d'agents pathogènes, a payé le plus lourd tribut, sous l'effet de destructions directes ou d'introductions malencontreuses, notamment de rats. Dans tous les milieux, les espèces "longévives" (formées d'individus à grande longévité), dont l'effort de reproduction est étalé sur de nombreuses années, présentent des capacités faibles de croissance annuelle de population. Cette capacité de croissance ne peut compenser la moindre augmentation de mortalité : comme un capital placé à un taux d'intérêt trop faible, elles tolèrent difficilement l'impôt des activités humaines. Ce sont des ressources faiblement renouvelables. Il s'agit en outre souvent d'espèces de grande taille, aux effectifs restreints, aux exigences spatiales fortes, et donc encore plus sensibles aux activités humaines. Il reste ainsi environ 300 baleines franches boréales, jadis chassées par dizaines de milliers dans l'Atlantique Nord. Moins de 10 adultes meurent de mort naturelle chaque année. La mortalité, par collision avec des bateaux ou ingestion d'engins de pêche, est du même ordre : cette espèce est peut-être déjà condamnée par ces impacts diffus. Tous les cétacés se rapprochent plus

ou moins rapidement de cette situation, et les prétendues chasses scientifiques du Japon ou de la Norvège sont une véritable insulte à la science et au bon sens.

L'exemple des vertébrés longévifs rend assez pessimiste sur la capacité d'autoréparation de la biodiversité : en moins d'un an ont disparu 2 000 des 4 000 éléphants du Parc National de Zakouma lors des troubles récents au Tchad : pour atteindre de nouveau 2 000 à 4 000 individus, il faut au minimum 20 ans en conditions idéales. L'exemple de l'effondrement des stocks de morue est similaire.

Pour les insectes, à côté d'anecdotes, comme la raréfaction due aux collectionneurs de l'isabelle, un splendide papillon des Alpes du Sud, dans le groupe des libellules on compte près de 10 % d'espèces menacées, malgré leurs capacités de dispersion. Les arbres longévifs présentent la même fragilité démographique que les grands vertébrés. Le séquoia géant de Californie a failli disparaître au XIX^{ème} siècle. Or des centaines d'espèces d'insectes sont strictement inféodées à chacune des espèces d'arbres des forêts intertropicales. La déforestation a inévitablement sur ces arbres longévifs et sur tous leurs hôtes des impacts considérables.

D'après diverses évaluations, le taux naturel d'extinction de l'ensemble des espèces vivantes semble être actuellement multiplié par 50 à 100 par les activités humaines.

Enfin, sans pour autant s'éteindre, c'est-à-dire disparaître de la planète, d'innombrables espèces disparaissent de nombreux sites ou de régions entières. Ces extinctions locales ou régionales appauvrissent partout les communautés vivantes et perturbent le fonctionnement des écosystèmes.

Il ne semble donc pas exagéré de parler de "crise de la biodiversité".

4.3. En estimant le rythme de disparition actuel des espèces et en le comparant aux périodes d'extinction du passé, peut-on parler de crise de la biodiversité ? (suite)

Philippe Taquet (Membre de l'Académie des sciences)

L'histoire de la biodiversité est une longue histoire. Les premières formes de vie sont apparues sur terre il y a 4 milliards d'années environ. Puis au cours de millions et de millions d'années et à partir de formes microscopiques, d'innombrables êtres vivants se sont différenciés. Vers 600 millions d'années, les formes pluricellulaires commencent à peupler les océans et il y a 525 millions d'années, la vie s'épanouit, se diversifie et se complexifie en une profusion d'organismes invertébrés.

Au fil du temps, la biodiversité ne cesse d'augmenter et une nouvelle étape sera franchie avec la conquête des milieux terrestres : végétaux et animaux vont, en évoluant et en s'adaptant, pouvoir peupler les continents. Mais l'histoire de la vie n'a pas été linéaire loin s'en faut. Elle a été jalonnée de plusieurs crises majeures, dues à des bouleversements de l'environnement consécutifs à des modifications profondes et relativement rapides du climat.

C'est ainsi que cinq crises majeures ont perturbé au cours des temps géologiques l'expansion de la biodiversité : il y a 444 millions d'années, à la fin de l'Ordovicien, avec la disparition d'un tiers de la faune marine ; il y a 359 millions d'années à la fin du Dévonien, avec la disparition d'un grand nombre de récifs ; il y a 251 millions

d'années, à la fin du Permien où l'on estime que 95% de la faune disparaissent, peut-être en raison de perturbations causées par une activité volcanique exceptionnelle ; il y a 201 millions d'années, à la fin du Trias, avec une forte modification des milieux marins et, pour terminer, il y a 65 millions d'années à la fin du Crétacé, avec la disparition de très nombreuses espèces animales, dont les ammonites, les bélemnites et les reptiles marins dans les mers, les reptiles volants dans les airs et les dinosaures sur terre, à l'exception d'une lignée de petits carnivores qui donne naissance aux oiseaux.

Mais la vie a surmonté chacune de ces crises et, dans les espaces libérés par la disparition d'un grand nombre d'espèces, elle a pu évoluer et s'adapter pour donner naissance à de nouvelles formes. Ainsi dans les écosystèmes libérés par les encombrants dinosaures, de nombreuses lignées de nouveaux mammifères se sont diversifiées très vite au cours des 50 derniers millions d'années. Ces mammifères dont les représentants nous sont familiers peuplent aujourd'hui notre environnement.

Parmi ces lignées de mammifères, celle des primates va connaître un grand essor ; au sein de celle-ci, une espèce, la nôtre, a, en quelques centaines de milliers d'années conquis tous les espaces, chassé efficacement les autres espèces, domestiqué quelques unes pour son profit, modifié profondément les écosystèmes par la cueillette et l'agriculture, bref changé durablement le visage de la Terre. En quelques siècles, nous avons éliminé un grand nombre d'espèces au point que l'on peut se demander aujourd'hui si l'homme est en train de vivre la sixième grande extinction et s'il est l'acteur principal de cette extinction.

La rhytine ou vache de mer, un mammifère de l'ordre des Siréniens décrit pour la première fois par le naturaliste Steller en 1741 a disparu des océans 27 ans plus tard, en 1768, sous les coups des chasseurs. Le dodo de l'île Maurice, cher à l'écrivain Lewis Carroll, appartient à un passé révolu. Ce gros oiseau terrestre ressemblant à un pigeon, mais incapable de voler, a été chassé pour être mangé. Son extinction a été constatée en 1801. Le dernier grand pingouin fut tué sur une île proche de l'Islande en 1844. Le dernier couagga, forme originale de zèbre qui habitait l'Afrique du Sud, est mort au zoo d'Amsterdam en 1883. La pensée sauvage du bassin de Paris a disparu à la fin du siècle dernier. Le dernier pigeon migrateur d'Amérique, dont les populations se chiffraient en centaines de millions d'individus, est mort le 1^{er} septembre 1914 au zoo de Cincinnati. Le dernier canard à tête rose de l'Inde a disparu en 1935. Le dernier Thylacine ou loup marsupial de Tasmanie fut abattu en 1961.

Le rythme des extinctions ne fait que s'accélérer et l'on estime que le XX^{ème} siècle a vu la disparition de 260 espèces de vertébrés, que les effectifs d'oiseaux d'Europe ont diminué de 20% au cours des 20 dernières années. Selon le dernier décompte de l'Union internationale pour la conservation de la nature, 36 % des espèces évaluées sont aujourd'hui menacées d'extinction. Altération des habitats naturels, déforestation, urbanisation, introduction d'espèces envahissantes, surcharge des sols en fertilisants ou en effluents, surexploitation des ressources vivantes, autant de causes qui bouleversent les équilibres naturels et qui permettent de penser que l'on s'achemine vers une grave crise de la biodiversité, crise dont l'homme est le premier responsable.

Des millions d'années d'une lente évolution ont été nécessaires pour que soit façonné le visage de la Terre et pour que soit distribuée à la surface de celle-ci, dans

les mers, sur terre et dans les airs, une extraordinaire diversité biologique portant tout à la fois sur les écosystèmes, sur les espèces, sur les gènes. Cette biodiversité qui nous est pourtant indispensable est aujourd'hui gravement menacée.

Les scénarios prévoient malheureusement une perte continue de la biodiversité à l'horizon 2050. Le taux d'extinction des espèces au cours de la première moitié du XXIème siècle risque de s'accroître. A la différence des dinosaures qui ne purent échapper à leur sort et qui subirent une extinction relativement brutale, l'espèce humaine a fort heureusement la possibilité, la capacité, et, en fin de compte, le devoir de réagir en veillant avec soin au devenir de sa planète. Un changement radical du mode de vie et de développement des représentants de l'espèce *Homo sapiens* est indispensable, et ce, avant que Nature ne meure.

4.4. L'état des ressources marines est-il particulièrement préoccupant ?

Claude Combes (Membre de l'Académie des sciences) avec Bernard Banaigs et Annabel Simon-Levert (Université Perpignan)

Des trésors sous la mer. Les écoliers apprennent que les humains, comme toute autre espèce animale d'ailleurs, dépendent entièrement du milieu vivant qui les entoure. Ils y trouvent leur source d'énergie accompagnée de diverses substances indispensables, mais aussi de molécules particulières qui sont capables d'interagir avec la chimie de notre corps. Si certaines de ces interactions sont perçues négativement comme les venins ou les toxines, d'autres sont perçues positivement comme les molécules utilisées en pharmacopée (en réalité d'ailleurs, beaucoup de molécules ont des effets qui dépendent essentiellement de la dose utilisée).

Où se trouvent les molécules que les hommes peuvent utiliser pour se soigner ?

On est tenté de dire "partout".

Ce qui est vrai. Mais ce qui est vrai aussi, c'est que la recherche de ces molécules actives n'est pas aussi avancée dans tous les milieux. Ceci est valable si l'on compare entre eux les grands écosystèmes terrestres, mais ce l'est encore plus si l'on pense au milieu marin, pour lequel le décalage des recherches est considérable. Or, dans leur physiologie, dans leur composition chimique, les organismes terrestres, y compris les humains, gardent très largement le souvenir de leurs ancêtres marins.

Alors que les premiers témoignages crédibles d'une vie sur la planète remontent à 3,8 milliards d'années, la conquête des terres émergées est datée de seulement un peu plus de 400 millions d'années. Autant dire que les êtres terrestres au sens géographique du mot sont un événement "récent" de l'évolution... Peut-être est-ce la raison pour laquelle, si tous les phylums aujourd'hui présents sur les terres émergées sont représentés dans les mers, la réciproque n'est pas vraie : au moins une dizaine de phylums marins n'ont jusqu'ici fourni aucune espèce continentale. Les mers et océans occupent plus de 70% de la surface terrestre, et même si la biodiversité est maximale près des côtes, aucune parcelle, qu'il s'agisse du fond ou de la masse d'eau, n'a échappé à la conquête par la vie.

L'identification des espèces qui peuvent être utiles à la santé (ou à tel ou tel autre aspect des activités humaines) n'est pas chose facile, quel que soit le milieu. Sans

doute les problèmes posés sont-ils encore plus nombreux dans les écosystèmes océaniques.

C'est pourquoi les biologistes s'aident d'un certain nombre d'indices. La biosphère est un monde de signaux qui sont continuellement échangés entre les cellules d'un même organisme, entre les organismes d'une même espèce, entre espèces différentes. Or, les océans ne sont pas que poissons et plancton : beaucoup d'espèces marines sont sessiles (algues, éponges, coraux, tuniciers...), de telle sorte que la sélection naturelle a privilégié chez elles la communication chimique. Il s'agit d'une véritable écologie – on pourrait même dire une sociologie – chimique. Il existe chez ces espèces une grande diversité de phéromones, allomones et autres kairomones, autant de médiateurs chimiques qui sont différents de ceux que l'on trouve sur les continents et qui ouvrent donc des pistes thérapeutiques nouvelles. La recherche de composés actifs naturels d'origine marine est orientée par des aspects particuliers des organismes : par exemple, c'est souvent chez les espèces non protégées par des carapaces, des piquants, des coquilles ou des colorations cryptiques que la sélection naturelle a retenu des molécules "de défense" originales, intéressantes par leurs propriétés toxiques, anti-mitotiques, inductrices d'apoptose, ou autres. Six mille molécules ont déjà été identifiées chez les seules éponges ! Une difficulté (attendue) est qu'il a fallu parfois récolter une tonne de matériel biologique pour obtenir quelques milligrammes de substance active. La synthèse en laboratoire, par voie chimique ou génétique, doit impérativement prendre le relais, sous peine de risquer de faire disparaître la ou les espèces concernée(s).

La recherche en ce domaine a déjà abouti à des découvertes et à des "mises sur le marché" mais n'en est tout de même qu'à ses balbutiements par rapport au domaine émergé.

Les écosystèmes marins font encore trop peu parler d'eux quand il s'agit de conserver la biodiversité. Pourtant, cachés et parfois difficilement accessibles, des *trésors* attendent les plongeurs, les biochimistes, les médecins. Ces écosystèmes sont aussi fragiles, sinon plus, que les écosystèmes terrestres. Leur biodiversité mérite comme eux le degré maximal de protection.

4.4. L'état des ressources marines est-il particulièrement préoccupant ? (suite)

Yvon Le Maho (Membre de l'Académie des sciences)

La surexploitation des ressources marines, associée à l'illusion de leur caractère inépuisable, a pour conséquence qu'il s'agit du domaine environnemental où il est le plus évident que l'action de l'homme conduit à la catastrophe. Comme l'a montré le rapport rédigé en 2003 par l'Académie des sciences "Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes", sous l'égide de Lucien Laubier, Correspondant de l'Académie des sciences (1936-2008), la première évidence de cette surexploitation est en effet le constat que le produit total des pêches mondiales a cessé d'augmenter depuis le début des années 70 malgré une augmentation exponentielle des moyens mis dans le domaine de la mer. Une étude vient de montrer que l'on pêchait plus de poissons sur les côtes britanniques au 19^{ème} siècle qu'aujourd'hui,

naturellement avec des équipements dont la productivité apparaît actuellement comme dérisoire.

Comme le montrent Philippe Cury, directeur du centre de recherche halieutique méditerranéenne et tropicale de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), et Yves Miserey, journaliste au Figaro, dans leur récent ouvrage "La mer sans poissons", la situation est en effet très grave. Ainsi, malgré l'arrêt de la pêche à la morue sur les bancs de Terre-Neuve en 1980, les bancs ne se sont toujours pas reconstitués 30 ans plus tard. Le fonctionnement d'un écosystème marin est en effet complexe et la dynamique de population d'une espèce ne peut être considérée indépendamment de celle des autres espèces. Ainsi, la surexploitation des harengs dont s'alimentaient les morues adultes a pour conséquence que ces dernières se nourrissent des jeunes morues. Pour la morue arctique, une ressource encore importante pour la Norvège et la Russie, un autre problème est que les mailles des filets de pêche sont trop petites pour permettre à cette espèce d'atteindre une taille autorisant sa reproduction. De même, la taille des thons rouges pêchés est de plus en plus réduite, et cela va également à l'encontre des conditions optimales pour la reconstitution des stocks. On voit bien dans ce contexte que la modification des quotas ne changera rien. Au contraire, comme vient de le montrer une étude norvégienne dans laquelle des biologistes travaillant sur la morue arctique ont été associés à des économistes, une augmentation de la taille des mailles de filets permettrait aux morues de se reproduire de façon optimale. Il en résulterait une pérennisation des populations alors que la taille actuelle des mâles compromet l'avenir de ces populations. Du point de vue des pêcheurs, le plus intéressant est que, contrairement à leurs craintes, leur revenu financier augmenterait progressivement sur une dizaine d'années pour plafonner à environ trois fois et demi le revenu actuel. En d'autres termes, ils auraient un revenu financier très supérieur tout en préservant la source de ce revenu !

La fuite en avant actuelle est notamment marquée par la pêche de poissons de grandes profondeurs sans toujours bien évaluer les conséquences du risque d'un prélèvement excessif. En effet, certaines espèces ne commencent à se reproduire qu'à l'âge de 5 ou même 10 ans.

Il est donc temps que les décideurs politiques, comme l'a annoncé le Président de la République dans son discours du Havre en juillet 2009, prennent enfin en compte les avis des scientifiques sans plier devant la pression des pêcheurs. Mais la responsabilité de la société française est également engagée envers ceux-ci ; ils doivent en effet être aidés pour pouvoir s'engager vers une pêche à caractère durable. Des mesures sévères doivent être prises pour empêcher la pêche illégale. Comme le montre la chasse à la baleine, prétendue scientifique, dont les produits sont ensuite commercialisés, il ne faut cependant pas se faire d'illusions. La lutte sera très difficile contre la surexploitation des ressources marines. Sait-on par exemple que, pour certaines espèces de baleines, la population qui subsiste aujourd'hui représente à peine 1% de la population initiale ?

4.5. Les invasions biologiques sont-elles un phénomène répandu, et quel impact ont-elles sur la biodiversité ?

Christian Dumas (Membre de l'Académie des sciences)

Une espèce est dite invasive lorsqu'elle accroît son aire géographique naturelle de répartition, qu'elle est un facteur de dommage et qu'elle nuit à la biodiversité. Dans la littérature on trouve toute une série de terminologies à ce propos : on parle d'*espèces colonisantes*, de *pestes*, d' "*aliens*", d'*invasives*, etc., autant de termes liés à notre anthropomorphisme. Dans notre imaginaire, une espèce invasive fait référence aux invasions qui détruisent tout sur leur passage ; et que dire d'espèces colonisantes ! Dans les milieux scientifiques, ce type de questionnement est apparu comme un thème majeur lors d'un congrès de l'Union Internationale des Sciences Biologiques (IUBS), en 1964. Aujourd'hui, on parle d'espèces introduites même si la terminologie d'espèces invasives demeure. Un Comité particulier à ces espèces a été créé en 1982. Il a traité trois questions majeures illustrées à partir de quelques exemples qui, pour autant, ne sont pas généralisables .

Quels sont les facteurs qui font qu'une espèce est invasive ou non ? L'opinion publique a été alertée, il y a une vingtaine d'années, à propos d'une algue, la caulerpe (*Caulerpa taxifolia*), qui envahissait progressivement les fonds marins du littoral méditerranéen de la région de Monaco. Cette algue, originaire d'Australie, se serait échappée accidentellement d'un aquarium du Muséum de la Principauté. La spécificité de la flore bactérienne associée aux caulerpes augmente leur résistance aux basses températures, ajoutant à leurs capacités de prolifération. En situation de compétition avec les espèces natives, comme les posidonies, plantes à fleurs constituant les herbiers marins, les caulerpes développent leur appareil végétatif nommé thalle et réduisent leur teneur en caulerpenyne, une substance toxique, alors que le phénomène inverse s'observe chez les posidonies, qui réduisent leurs tiges feuillées et synthétisent des tanins de manière accrue. De plus, les caulerpes se développent indifféremment dans des eaux peu ou très polluées, éventuellement avec des teneurs élevées en métaux, comme quelquefois dans les ports. La caulerpe augmente son aire géographique grâce à ses facultés adaptatives vis-à-vis d'un nouvel écosystème.

Y a-t-il des caractéristiques des écosystèmes qui les rendent vulnérables ou résistants? L'Herbe de Jacobée (*Senecio jacobea*) est un séneçon originaire d'Eurasie. Introduite en Amérique, cette plante est devenue invasive et est très agressive vis-à-vis des espèces végétales indigènes et même toxique pour le bétail à cause des alcaloïdes qu'elle synthétise. En 1976, une photographie aérienne montrait que cette espèce couvrait environ 12.000 km² dans l'ouest de l'Oregon aux Etats-Unis. Mais en 1988, la surface infestée était réduite des trois-quarts et la végétation native était pratiquement revenue à son état initial. Ce changement est attribué à l'introduction délibérée (lutte biologique) d'un papillon européen nommé "goutte de sang" (*Tyria jacobaeae*). Sous sa forme larvaire, sa chenille attaque la plante dont elle se nourrit, malgré la présence de poisons alcaloïdes. La larve séquestre ces alcaloïdes dans des structures particulières pour sa propre défense contre ses prédateurs; sa couleur rouge l'indique comme si elle avait des 'warnings' !

Pour l'Herbe de Jacobée, l'absence de prédateurs ou d'agents pathogènes constitue un facteur facilitant son développement et son caractère envahissant, à la différence de ce qui se passe dans son aire d'origine.

Peut-on développer des systèmes efficaces de gestion de la biodiversité ? Une des difficultés de la biologie des espèces invasives et de leur contrôle est l'absence d'approches expérimentales, ce qui pose un réel problème pour le gestionnaire en charge des espaces naturels même si, comme dans le cas précédent, les invasions d'espèces biologiques peuvent être vues comme des expériences naturelles à grande échelle. De plus, il faut intervenir tôt car plus on attend, plus l'espèce introduite assure des fonctions dans ce nouvel écosystème. Il vaut mieux la naturaliser que de tenter de la "reconduire aux frontières" de l'écosystème, d'autant que ces dernières sont aussi peu précises que ne l'est la définition d'un écosystème ! Ainsi, on estime que plus de 9% de la flore vasculaire française (plantes à fleurs, conifères et fougères) hors outre-mer, soit 440 espèces, sont des espèces naturalisées non natives. Par opposition, plus de 40% de la flore de l'île de la Réunion est constituée d'espèces envahissantes qui continuent de progresser et de réduire la biodiversité insulaire !

Un autre exemple, touchant directement la santé humaine peut être rapporté ici. Il s'agit de l'introduction accidentelle de l'Ambrosie d'Amérique (*Ambrosia artemisiifolia*), au début du XX^e siècle. Lorsqu'elle fleurit, en août, cette espèce libère de grandes quantités de pollen qui induit de fortes rhinites allergiques à l'origine d'un coût estimé à plusieurs millions d'euros pour la Sécurité Sociale en France. Cette espèce invasive s'est largement implantée et est considérée comme un vrai problème de santé publique. Les communes doivent l'éradiquer et des brigades vertes en sont chargées sur le domaine public ; sa multiplication subsiste dans les terrains privés, notamment lorsque les sols sont remués (labours) ou à l'issue de travaux d'aménagement.

Est-ce que tout est négatif dans le domaine des espèces invasives ? L'exemple suivant montre que non. La peste qui a fait d'immenses ravages entre les XII^e et XVII^e siècles a dû, en partie, son éradication à l'arrivée d'une espèce non native : le surmulot (*Rattus norvegicus*). Plus fort et plus prolifique que le rat noir indigène (*Rattus rattus*), vecteur de la peste, il a pratiquement exterminé ce dernier.

En dépit de travaux importants, les connaissances dans ce domaine de l'écologie sont encore très fragmentaires car peu d'expérimentations sont possibles et donc difficilement généralisables et utilisables par les gestionnaires. On considère aujourd'hui que sur 100 espèces introduites, 10 vont s'acclimater (c'est-à-dire sans induire de dégâts apparents), alors qu'une va devenir envahissante. Il manque des bases théoriques à ces études et le meilleur remède est encore la prévention qui passe évidemment par l'éducation et une connaissance minimale de la flore et de la faune. Mais où apprend-on aujourd'hui à observer, à connaître et à identifier les organismes vivants ? Pratiquement plus à l'école primaire, ni au collège ou au lycée, ni même à l'université. Botanique et zoologie relèvent de disciplines en voie de disparition laissées essentiellement à quelques spécialistes ou aux sociétés d'amateurs ou encore à quelques ONG. Cependant, ces dernières soufflent le plus souvent la peur, ont des discours exagérés ou tentent de rigidifier les réglementations en cours sous des prétextes, souvent fortuits -mais pas toujours- de protection de la biodiversité ! D'où la difficulté d'avoir une opinion claire sur ce sujet et le dilemme évident qui se pose alors aux politiques ou aux gestionnaires.

4.6. Quels sont les lieux où la biodiversité est la plus fragile et la plus menacée ?

Christian Dumas (Membre de l'Académie des sciences)

Cette question est d'une grande actualité en 2010, à la suite de l'explosion et de l'incendie qui ont détruit en avril 2010 une plate-forme de forage pétrolier au large des côtes de Floride. Des images prises d'avion ont montré l'importance de la nappe de pétrole qui s'étend sur des centaines de km² et qui a déjà touché en juillet les côtes de plusieurs Etats (Louisiane, Alabama et Floride incluant l'estuaire du Mississippi). Elles rappellent d'autres catastrophes du même ordre. C'est donc une vaste zone côtière riche en biodiversité, avec des milliers d'espèces animales et végétales, qui est menacée. En effet, certaines espèces emblématiques de ces régions et déjà en danger, comme le lamantin de Floride, le pélican brun de Louisiane ou encore la tortue de Kemp, sont menacées de disparition définitive et avec elles plus de 400 autres déjà répertoriées. On a ici un exemple de domaines où la biodiversité est à la fois très riche et, en même temps, très fragile. Richesse et fragilité sont des caractéristiques communes à toutes les zones humides, avec les menaces qui pèsent sur elles, en grande partie liées aux activités humaines.

Que sont les zones humides et quelle est leur importance dans le monde et en France ? Les zones humides correspondent à des espaces de transition entre la terre et l'eau, que l'eau provienne de mares, de tourbières, de lagunes, de rivières, de mers ou d'océans. Les étangs et mares de toutes dimensions, temporaires ou permanents, sont très nombreux sur la planète. On estime leur nombre à 280 millions avec des surfaces comprises entre 1.000 et 10.000 m², il atteindrait même 3 milliards, si l'on intégrait les mares de 100 à 1.000 m². En France, on considère que l'ensemble des zones humides correspond à environ 3 millions d'hectares (Sologne, Dombes, Marais Poitevin, Camargue, etc.). Certaines sont constituées d'eaux douces, d'autres d'eaux saumâtres, notamment les estuaires comme la baie de Somme ou encore le delta du Rhône ; ces derniers sont extrêmement riches en oiseaux migrateurs, avec une flore et une faune abondantes renfermant des espèces spécifiques à ces zones, soit de manière constitutive, soit de manière temporaire (migration d'oiseaux, par exemple). Les deux tiers des zones humides ont disparu en France en un siècle, alors que leur importance a été reconnue depuis plusieurs dizaines d'années menant à de nombreuses actions visant leur protection.

L'exemple des mangroves. Hors de France métropolitaine, il existe des forêts tropicales humides localisées dans la zone de balancement des marées, au sein de baies ou d'estuaires : les mangroves. Dans ces écosystèmes particuliers, seules quelques espèces d'arbres, les palétuviers, sont capables de pousser. En effet, ils vivent dans l'eau saumâtre et poussent dans la vase (milieu pauvre en oxygène), ce qui implique des adaptations particulières : racines aériennes, reproduction vivipare, etc. Ces mangroves recouvrent 50 000 hectares en Guyane et 20 000 en Guadeloupe ; elles sont beaucoup plus importantes encore dans les zones tropicales d'Asie du Sud-Est, d'Afrique ou d'Amérique centrale. Après les récifs coralliens, ce sont les écosystèmes littoraux les plus menacés par les destructions humaines (prélèvement de bois, aquaculture, urbanisation) alors qu'ils renferment une faune et une flore uniques, et qu'ils jouent aussi un rôle protecteur contre les marées et les tsunamis. La catastrophe qui a frappé le Sud-Est asiatique en 2004 est encore

présente dans toutes les mémoires. Une étude de 2010 a révélé que 16% des espèces de palétuviers, sur les 70 répertoriées à l'échelle mondiale, sont menacées et doivent être inscrites sur la liste rouge des espèces en danger. Les zones les plus touchées sont celles d'Amérique centrale où 40% des mangroves sont déjà très menacées. Leur valeur écosystémique, c'est-à-dire l'ensemble des bénéfices que la société tire de cet écosystème particulier, est estimée à 1,2 milliard d'euros par l'*Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire* (Rapport international publié en 2005).

L'utilité des zones humides en France. Les forêts humides d'origine alluviale ou bordant les ruisseaux sont composées de diverses essences : frênes, ormes, aulnes, peupliers ou saules, et assurent des fonctions écologiques majeures. Ce sont, par exemple, des pièges à nitrates qui assurent la dénitrification de l'eau ; les nitrates étant souvent ajoutés aux sols cultivés pour améliorer le rendement des cultures. Elles jouent aussi un rôle majeur de filtre dans les zones de captage d'eau, surfaces particulièrement protégées aux alentours des grandes agglomérations et qui servent à leur alimentation en eau potable. Ces zones jouent également un rôle important de filtration des radiations solaires et de régulation de la température de l'eau. Enfin, par le bois mort qu'elles fournissent au milieu, et l'originalité des organismes associés s'en nourrissant (champignons, insectes, bactéries, etc), elles interviennent dans la complexité des fonds aquatiques et participent à l'organisation de cette mosaïque d'habitats riches en biodiversité. En leur sein, on peut aussi mentionner des mammifères, des oiseaux ou des batraciens, espèces les plus visibles et donc les mieux suivies dans leurs effectifs et leur diversité. On a ici encore un exemple remarquable d'un *service écosystémique* de grande valeur.

Les étangs et les mares abritent également une faune diverse très riche en insectes. Ces derniers sont les animaux les plus nombreux ; ils constituent plus de 70% de la biodiversité spécifique connue du règne animal et représentent une biomasse importante. Celle-ci forme le flux énergétique intermédiaire entre la production primaire fournie par les plantes et celle des prédateurs aquatiques comme les oiseaux ou les poissons. Ainsi à l'automne, les feuilles mortes, qui tombent dans l'eau sont dégradées par des bactéries et des champignons puis consommées par toute une catégorie d'insectes phytophages qui les fragmentent en parties de plus en plus fines. Ce flux énergétique a été quantifié : pour 1 kg de feuilles mortes qui tombent dans un étang, environ un quart est transformé et disponible au printemps, sous forme de larves ou d'adultes, comme moucherons, éphémères, libellules ou autres phryganes pour la consommation des poissons, batraciens, oiseaux ou mammifères. Dans certains pays, ces insectes contribuent aussi à l'alimentation humaine comme les scorpions d'eau géants cuisinés avec du piment et du riz en Thaïlande ou bien les libellules dépourvues de leurs ailes cuites dans le lait de coco avec du gingembre et de l'ail à Bali.

Les zones humides sont fragiles et donc à protéger. Le niveau de protection des forêts et des zones humides en Europe est assez faible. Les spécialistes considèrent qu'il est de l'ordre de 6% pour les forêts alluviales et de 13% pour les forêts marécageuses ; ce qui veut dire que 94% des premières et 87% des secondes sont peu ou pas protégées ! Leur dégradation continue est largement due aux pratiques de la sylviculture : tassement des sols lié à la mécanisation, disparition progressive de la faune associée, plantation d'essences allochtones (c'est-à-dire non indigènes), culture intensive de peupleraies à courte rotation (coupées régulièrement tous les 15-20 ans). Il faut aussi ajouter l'expansion de plantes envahissantes (balsamine de

l'Himalaya, renouée du Japon, par exemple) ou encore la pollution des eaux, la modification des berges et, bien entendu, l'emprise croissante des infrastructures routières et de l'urbanisation. Ceci aboutit depuis un demi-siècle à une fragmentation de ces habitats qui deviennent génétiquement fragilisés, notamment par diminution des flux de gènes entre espèces. En Europe, leurs surfaces ne cessent de diminuer entraînant ainsi une érosion lente mais inéluctable de leur biodiversité. Un rapport européen, couvrant la période 2001-2006, révèle que la part des habitats et des espèces en bon état de conservation est faible, notamment pour les espèces patrimoniales. L'article 17 de la directive "*Habitats*" oblige heureusement les Etats membres de l'Union Européenne à entreprendre la surveillance de ces habitats et de ces espèces et à faire un état des lieux et de leur conservation tous les six ans. Mais cette directive n'est pas toujours suivie d'effet. En France, c'est le cas pour seulement un habitat sur six et une espèce sur cinq avec les situations les plus défavorables pour les zones humides. De ce constat est née l'idée de la trame bleue destinée à favoriser le continuum des cours d'eau et des paysages afférents, afin de protéger la biodiversité qu'elle renferme. Depuis 2009, cette notion a même été introduite dans le droit français, à la suite du Grenelle de l'environnement.

Heureusement, certaines espèces sont devenues emblématiques de ces zones humides car elles participent à la valeur esthétique, éducative et récréative de leur biodiversité. Il en est ainsi d'animaux comme les libellules ou les castors dont l'effigie se retrouve dans de nombreuses brochures éditées par les associations de protection de la Nature. Un parc aux libellules (*Honmoku citizen park*) a même été créé à Yokohama au Japon. On doit aussi mentionner certaines plantes emblématiques de ces milieux comme les massettes, les renoncules aquatiques, les iris d'eau, sans oublier les plantes carnivores de nos tourbières (grassettes ou droseras). L'éducation reste encore le meilleur garant de la protection de cette biodiversité. Encore faudrait-il que les programmes d'enseignement mettent suffisamment l'accent sur cette thématique et que les personnels soient bien formés et sensibilisés à ces enjeux.

4.7. Quel est l'état de la biodiversité dans le monde et principalement en Europe ?

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

La biodiversité est d'ores et déjà appauvrie globalement par les activités humaines : ainsi près de 10 % des vertébrés ont disparu au cours des derniers millénaires. Au niveau local, d'une région, d'un massif de montagne, d'un lac, les extinctions l'emportent encore plus largement sur les recolonisations.

En Europe, les milieux agricoles de plaine accusent une baisse marquée de la diversité végétale et animale (insectes, oiseaux...). En France, l'abondance des oiseaux des zones agricoles a baissé de 20 % en dix ans, surtout pour les espèces spécialistes de tel ou tel milieu.

S'y ajoute l'extension de la présence d'espèces invasives, introduites par l'homme, telle l'écrevisse de Louisiane. Si certaines espèces introduites se sont "naturalisées",

comme le châtaignier en Europe, les invasions, dont celles des rats sur les îles, sont une des sources majeures d'appauvrissement de la biodiversité.

La biodiversité se réduit et s'homogénéise donc. L'érosion d'une biodiversité localement adaptée et son remplacement par une biodiversité plus généraliste se traduit généralement par une dégradation des services écosystémiques pour les sociétés humaines (voir pages 53-54).

Des prises de conscience permettent parfois d'inverser la tendance : en France, des plans de chasse et un contrôle serré du braconnage ont permis une remontée des effectifs - et des tableaux de chasse - des grands ongulés (cerf, sanglier, chevreuil, chamois...). Cette véritable remise à niveau de la biodiversité a notamment induit une recolonisation naturelle des Alpes par le loup, à partir des populations italiennes.

Dans la tendance générale à l'érosion de la biodiversité, la première cause a été historiquement l'exploitation directe ; actuellement les transformations d'usage des terres jouent un rôle majeur, et les changements climatiques exercent leurs premiers effets.

L'exploitation directe a un fort impact depuis des millénaires. En 1914 s'est éteint en Amérique du Nord, suite à une surchasse effrénée, le dernier pigeon migrateur, dont les vols obscurcissaient le ciel quelques décennies auparavant. La surexploitation est encore monnaie courante : au Népal, les prélèvements par les firmes commerciales font décliner les populations de plantes médicinales au contraire des prélèvements faits plus sélectivement par les médecins traditionnels, les "Amchis". La surexploitation des populations de poissons marins est tellement patente qu'il n'est pas besoin de s'y attarder. La transition vers l'aquaculture, similaire au passage de la chasse à l'élevage, ne se fait pas sans soubresauts, l'aquaculture tendant à reproduire les excès et inconvénients de l'agriculture intensive.

Parmi les transformations d'usage des terres, la déforestation des forêts intertropicales, qui abritent 50 % de la biodiversité mondiale, relâche des quantités massives de CO₂ dans l'atmosphère. L'intensification de l'usage des terres et des mers fait payer des tributs très variés à la biodiversité, avec en corollaire la disparition de services souvent inattendus. La disparition des mangroves a ouvert aux tempêtes nombre de côtes plates. Le développement des transports est un facteur clé de l'uniformisation de la biodiversité, aux multiples conséquences, comme la rapide dissémination intercontinentale de formes de moustiques résistantes aux insecticides.

Parmi les événements climatiques, la sécheresse au Sahel a fortement affecté les oiseaux migrateurs transsahariens comme la cigogne blanche, dont les populations de l'Europe de l'Ouest ont été décimées dans les années 70. Les effectifs de tourterelles des bois ont baissé de 70 % au Royaume-Uni depuis cette même période.

L'impact attendu des changements climatiques concerne aussi des espèces emblématiques de milieux extrêmes tels les manchots de l'Antarctique, ou l'ours blanc. Mais les conséquences les plus marquantes sur la biodiversité vont concerner les ceintures climatiques de végétation qui se succèdent selon la latitude (du plus chaud au plus frais, donc du sud au nord dans l'hémisphère boréal : forêts feuillues, taïga, toundra). La vitesse potentielle du mouvement de ces ceintures de végétation vers le nord pourrait atteindre 6 km par an au milieu du XXI^{ème} siècle, soit dix fois la

vitesse atteinte à la fin des dernières glaciations. Mais, faute de semenciers pour produire suffisamment de graines, et de disséminateurs à rayon d'action suffisant, les forêts ne pourront peut-être pas "marcher" aussi vite vers le nord : d'importants déséquilibres entre végétation et climat sont à attendre ; des épisodes marqués de dépérissement forestier et une augmentation des incendies et des "chablis" - ces chutes d'arbres en "jeu de quilles" lors de tempêtes - sont à craindre.

Les effets d'interactions entre ces différents modes d'action de l'homme sont actuellement l'objet de recherches actives.

4.8. Est-il possible de prédire l'évolution de la perte de la biodiversité et les conséquences pour les sociétés humaines dans les décennies à venir ? Y a-t-il déjà des effets irréversibles ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

En 1995, Stuart Pimm et ses collaborateurs estimaient que les taux récents de disparition d'espèces étaient 100 à 1 000 fois supérieurs à ceux qui prévalaient avant l'arrivée des humains sur notre planète³¹. Cette évaluation ne portait certes que sur quelques groupes bien connus, mais ces groupes représentaient une large diversité de taxons et de régions. Les auteurs ajoutaient que si toutes les espèces qualifiées de "menacées" en 1995 disparaissaient au cours du XXIème siècle, les taux de disparition seraient encore 10 fois supérieurs aux taux récents.

Depuis 1995, qu'avons-nous appris sur les pertes à venir de la biodiversité et sur les conséquences de ces pertes pour les sociétés humaines ? D'abord, que des espèces continueront à disparaître au cours de ce siècle, à un rythme élevé par rapport à celui qui existait avant le développement de nos sociétés humaines. Le dernier rapport du secrétariat de la convention sur la diversité biologique³² est clair à cet égard : de nombreux signes indiquent que la diversité biologique continue à décliner, au niveau de ses trois composantes : les gènes, les espèces et les écosystèmes. On retiendra parmi ces signes que l'abondance des populations de vertébrés a baissé d'un tiers entre 1970 et 2006, que l'étendue des milieux naturels a diminué sur l'ensemble de la planète, par disparition, fragmentation ou dégradation, que la diversité génétique des cultures et des animaux d'élevage s'est affaiblie... Ces tendances sont autant de menaces pour les services garantis par un certain niveau de biodiversité : fourniture d'aliments, de fibres, d'eau potable, de médicaments, pollinisation des cultures, filtration des substances polluantes, protection contre les catastrophes naturelles – des services auxquels s'ajoutent des valeurs spirituelles, éducatives, récréatives, esthétiques.

Il convient donc de se soucier des conséquences pour la biodiversité de l'urbanisation accélérée de nos sociétés, du déboisement des régions tropicales, de l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, de la pollution et du barrage des fleuves et des rivières, de l'exploitation abusive des écosystèmes marins. Sans

³¹ Pimm S.L., Russell G.J., Gittleman J.L., Brooks T.M. (1995). The future of biodiversity. *Science* **269**: 347-350

³² Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010). Troisième édition des *Perspectives mondiales de la diversité biologique*. Montréal, 94 pages.

oublier les effets des changements climatiques, avec des déplacements d'espèces vers les pôles et vers les altitudes élevées et, en conséquence, des bouleversements dans la composition des communautés végétales et animales. Il convient aussi de se soucier des seuils, des ruptures, des points de basculement qui rythment les dynamiques écologiques. Ces évolutions soudaines des écosystèmes vers de nouveaux états sont marquées par d'importants changements de biodiversité et par la dégradation de services écologiques dont dépend la survie de nos sociétés humaines, à commencer par les plus pauvres. Souvent, ces changements ne surviennent qu'après un temps de latence par rapport aux causes qui les déterminent ; ils sont soudains, persistants, difficiles, voire impossibles, à inverser ; ils peuvent même s'accroître d'eux-mêmes, dans une sorte de spirale autoalimentée.

Ces points de basculement sont d'autant plus redoutables que leurs dynamiques nous échappent. La forêt amazonienne risque ainsi de dépérir soudainement au-delà d'un taux de déforestation supérieur à environ 20%, avec des effets sur la diminution des précipitations et le stockage du carbone atmosphérique, et des conséquences désastreuses pour les économies locales et régionales. L'accumulation des phosphates et des nitrates dans les eaux continentales et côtières risque ainsi d'entraîner des proliférations d'algues éventuellement toxiques, un déclin des stocks de poissons et des conséquences sur la santé, la sécurité alimentaire et l'économie de régions entières. L'acidification des océans jointe au réchauffement des eaux et à leur pollution risque ainsi d'accroître la disparition des récifs coralliens par manque d'ions carbone, prolifération des algues et appauvrissement de la biodiversité, au détriment des moyens d'existence de centaines de millions de personnes. Dans tous ces cas, on ne peut préciser quand surviendront ces points de basculement des écosystèmes vers de nouveaux états : on sait simplement que tout retour à des états antérieurs s'avèrera très coûteux, souvent impossible, et que la protection de la biodiversité est encore le plus sûr moyen d'accroître la résilience des écosystèmes face au risque de basculement.

Or, nous pouvons accompagner l'évolution de la biodiversité par un usage plus efficace des terres, des eaux douces et marines, par un partage équitable et durable des ressources, par une prise en compte des services rendus par les écosystèmes dans nos économies, par l'éducation au respect de la biodiversité. Nous pouvons aussi restaurer les écosystèmes dégradés en gérant localement l'évolution de la biodiversité, dans un souci de réduction de la pauvreté, d'amélioration des conditions de la santé humaine, de prospérité et de sécurité, d'adaptation au changement climatique. Tout en sachant que la prochaine décennie sera décisive pour l'avenir de la biodiversité.

Avons-nous justement des raisons d'espérer en cet avenir ? Oui car, même s'il n'a pas été atteint, l'Objectif 2010 pour la biodiversité a favorisé la création de nouvelles aires protégées, la conservation de certaines espèces, la lutte contre les pollutions ou les espèces exotiques envahissantes. Cet objectif a amené 170 pays à adopter des stratégies et des plans d'action en faveur de la biodiversité. Des ressources financières ont été mobilisées, des progrès accomplis dans le suivi et l'évaluation scientifiques de la biodiversité. Tous ces efforts ont permis de freiner la déforestation, de contenir l'expansion de certaines espèces exotiques envahissantes, d'en sauver d'autres menacées d'extinction. Ils ont aussi permis de s'appuyer sur la protection de la biodiversité pour atténuer les effets du changement climatique, améliorer les approvisionnements en eau, lutter contre les inondations... Ces résultats suggèrent

que l'appauvrissement de la biodiversité pourra, à la fin de ce siècle, être enrayeré, peut-être même inversé, si sont prises dès maintenant "des mesures urgentes, concertées et efficaces, en appui d'une vision à long terme et partagée"³³. Des mesures indispensables à la fois à une atténuation durable de la pauvreté dans le monde, à une prévention des effets du changement climatique, à une adaptation de nos sociétés à ces effets.

Toute prévision de l'avenir de la biodiversité s'insère dans un cadre singulier : celui d'un environnement changeant en permanence, tantôt lentement, tantôt brutalement, et d'une Vie qui tente de s'adapter à ces changements depuis qu'elle existe sur Terre – une Vie qui elle-même contribue au changement des systèmes écologiques. La biodiversité évolue donc dans un environnement qui ne reste jamais stable très longtemps – influence humaine ou pas – et dont les équilibres sont toujours transitoires. Mais cette instabilité naturelle ne nous interdit nullement de trouver certains changements souhaitables, et d'autres non. Et surtout pas d'agir. Simplement, nos actions doivent être décidées en toute conscience de l'instabilité permanente de notre environnement. En toute conscience aussi de l'importance de la biodiversité pour affermir la résilience de nos systèmes écologiques et sociaux face aux secousses qui marquent leurs dynamiques³⁴.

En fait, la question n'est pas de conserver la biodiversité telle qu'elle est – voire telle qu'elle était – mais de prédire comment elle évoluera³⁵. La question est de savoir si cette évolution nous permettra demain de bénéficier des mêmes services écosystémiques qu'aujourd'hui. La crise actuelle de la biodiversité, avec ses conséquences sociales et économiques, ne trouvera de solution que dans une compréhension encore à parfaire des processus par lesquels la biodiversité évolue dans un environnement toujours changeant... et dans une sauvegarde du potentiel évolutif des espèces, basé sur la connaissance de leur variation génétique.

5. L'homme et la biodiversité

5.1. L'homme crée-t-il de la biodiversité ?

Michel Delseny (Correspondant de l'Académie des sciences)

S'il est indéniable que certains aspects de l'activité humaine comme l'urbanisation ou la déforestation sont dévastateurs et dommageables pour la biodiversité, d'autres, comme l'agriculture, sont des inconvénients nécessaires et en partie maîtrisables par une meilleure gestion des pratiques culturales. Nous limiterons notre propos au secteur végétal, n'ayant pas compétence dans les autres domaines.

³³ Ibid

³⁴ *Événements climatiques extrêmes : réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques et sociaux*. (2010). Rapport sur la Science et la Technologie n° 29. Académie des sciences. 194 pp.

³⁵ Grant, F., Mergeay, J., Santamaria, L., Young, J. and Watt, A.D. (Eds.). (2010). *Evolution and Biodiversity: The evolutionary basis of biodiversity and its potential for adaptation to global change*. Report of an e-conference.

L'agriculture et l'amélioration des plantes ont tendance à réduire la biodiversité des écosystèmes cultivés. La mise en culture de grandes surfaces avec un nombre limité d'espèces appauvrit nécessairement la biodiversité végétale locale, mais n'entame pas la biodiversité des zones non cultivées. Pour que les cultures soient rentables, il faut qu'elles soient homogènes (monoculture au sein d'un champ avec des plantes de même taille, ayant les mêmes dates de floraison et de maturité et un rendement optimal pour faciliter la récolte). Cet objectif n'est atteint qu'au prix d'une sélection génétique rigoureuse qui identifie et combine les meilleurs allèles de quelques gènes importants. Les allèles sont les différentes formes d'un même gène, qui peuvent se trouver dans une population. On pourra ainsi avoir différents allèles d'un gène qui confère une plus ou moins grande résistance à un agent pathogène, ou d'un autre gène qui contrôlera le niveau de production d'huile par une graine. Dans cette opération, un certain nombre d'allèles sont perdus dans la variété finalement commercialisée et mise en culture. Ils ne sont pas pour autant perdus si l'on prend au préalable la précaution de préserver une collection de plantes représentatives de la variabilité génétique initiale. Autrement dit, la sélection bien menée va de pair avec la conservation et la préservation des ressources génétiques. Cette conservation est assurée dans les stations de sélection publiques ou privées des différents pays et par quelques grands centres internationaux qui maintiennent en culture, ou à l'état de collections de graines, l'essentiel de la biodiversité d'une espèce cultivée. Par exemple l'IRRI (International Rice Research Institute) aux Philippines conserve et remet régulièrement en culture près de 100 000 variétés de riz cultivés et sauvages collectées dans le monde entier.

Lorsque le sélectionneur crée une nouvelle variété de blé, de maïs ou de fraise, il crée de la biodiversité à partir d'un pool de gènes et d'allèles présents dans les populations naturelles, car la nouvelle variété n'existait pas précédemment. Il n'a pas créé de nouveaux allèles, mais il a réalisé une combinaison nouvelle d'allèles existants qui permet de réaliser une autre variété d'une plante donnée. Le sélectionneur dispose de plusieurs moyens d'augmenter la biodiversité au delà des croisements classiques. Il peut réaliser des croisements interspécifiques. Par exemple, de nombreuses variétés de tomates sont résistantes à des virus, des champignons ou à la sécheresse parce que des croisements ont été réalisés entre la tomate cultivée *Lycopersicon esculentum* et des tomates sauvages telles que *Lycopersicon pimpinellifolium*, *Lycopersicon hirsutum* ou *Lycopersicon chilensis*, plus rustiques et qui, naturellement possèdent les gènes ou allèles qui déterminent ces caractères. Les plantes issues de ces croisements sont ensuite croisées de façon répétée avec la tomate cultivée et sélectionnées de façon à ce que la majorité des gènes des plantes obtenues soit ceux de la tomate cultivée plus quelques gènes intéressants empruntés à la tomate sauvage.

Les sélectionneurs ont remarqué que lorsqu'ils croisaient deux variétés d'une même espèce, les plantes de la génération suivante présentaient une vigueur et souvent un rendement accrus. Ce phénomène est connu sous le nom d'hétérosis et a conduit les sélectionneurs à essayer de produire, de façon reproductible et contrôlée, des hybrides qui sont maintenant les principales formes cultivées pour certaines espèces comme le maïs, le tournesol ou le colza. Ces hybrides sont, eux aussi, des formes nouvelles d'espèces cultivées, créées par l'homme, qui n'existent pas à l'état naturel. Pour contrôler les croisements et leur descendance, le sélectionneur a d'abord utilisé la castration. Par exemple le pollen d'une lignée de maïs, qui servira de parent femelle, est éliminé (on dit que la lignée est castrée) et ses ovules sont fécondés par

le pollen prélevé sur la lignée qui sert de parent mâle. Le résultat est un maïs hybride plus performant que ses deux parents. Cependant si on laisse le maïs hybride s'autoféconder, ou s'il est pollinisé de façon non contrôlée, les gènes sont remélangés et les propriétés performantes sont perdues. C'est ce phénomène qui conduit l'agriculteur à renouveler ses semences chaque année et à faire confiance aux firmes semencières pour lui assurer un produit de qualité. La castration manuelle a été remplacée par des systèmes chimiques, puis biologiques, au fur et à mesure qu'ils ont été découverts : ce sont principalement des systèmes d'interactions incompatibles entre noyau d'une lignée et cytoplasme d'une autre, qui conduisent à une stérilité mâle. Pour les utiliser efficacement et être capable de maintenir les lignées parentales, il est indispensable de disposer d'un moyen de restaurer la fertilité. De tels systèmes sont bien connus chez nombre d'espèces cultivées, telles que le maïs, le tournesol, le colza ou le riz. Ainsi, l'INRA a introduit chez le colza un système de stérilité mâle en fusionnant des protoplastes de colza avec des protoplastes de radis et en sélectionnant des régénérants qui possédaient noyaux et chloroplastes de colza, mais mitochondries de radis. Là aussi de la diversité a été créée.

À propos de ces variétés hybrides, il faut noter que l'étude des génomes révèle que de nombreuses plantes, cultivées ou non, sont en fait d'anciens hybrides, et que l'homme ne fait que reproduire, en y ajoutant une étape de sélection, ce que la nature a toujours fait. Des espèces telles que le blé, le maïs, le colza, la canne à sucre sont sans doute des espèces hybrides, créées par l'homme, ou des espèces naturelles mais repérées et amplifiées par lui dès l'aube de la civilisation. Parmi les créations les plus récentes, on peut citer le Triticale, hybride de blé et de seigle, également créé par l'INRA.

A ce stade, l'impact de l'homme sur la création de biodiversité se limite à redistribuer les cartes en remélangant les différents gènes et leurs allèles, par des croisements intra ou interspécifiques suivis de la sélection des variétés d'intérêt.

Cependant, l'homme peut aller plus loin dans cette démarche, en forçant des croisements par fusion de protoplastes et régénération de plantes, en forçant le doublement chromosomique, soit par des traitements à la colchicine, soit en sélectionnant des doublements anormaux naturels. Le résultat est une plante polyploïde qui a un stock double de chaque gène. Un exemple classique en est la fraise cultivée qui est une espèce octoploïde alors que la fraise des bois sauvage est diploïde. C'est le cas aussi de certaines variétés de mandarines ou de bananes qui sont triploïdes.

Lorsque le sélectionneur considère que la variabilité génétique est insuffisante, il peut avoir recours à la mutagenèse chimique, physique (par exemple par irradiation) ou biologique (par un passage en culture *in vitro*, suivie de régénération et sélection de variants somaclonaux). Ces derniers sont des variants qui apparaissent lors de la régénération de plantes entières après une étape de culture *in vitro*, indépendamment de toute reproduction sexuée ; ils sont le plus souvent dus à l'activité d'éléments transposables, petits fragments d'ADN capables de se déplacer d'un endroit à un autre dans le génome sous l'effet d'un stress). Le cas le plus élaboré de création biologique de variabilité est la transgénèse dans laquelle un ou plusieurs gènes d'intérêt, originaires d'un autre organisme ou d'une autre espèce, voire synthétiques, sont insérés dans le patrimoine génétique de la variété OGM.

On peut donc conclure que l'activité humaine, et en particulier l'agriculture, n'a pas un effet totalement négatif sur la biodiversité. Elle contribue à mettre à notre disposition, sur un nombre limité d'espèces (moins d'une centaine sur les quelques 300 000 recensées) des variétés nouvelles, qui n'ont jamais existé à l'état naturel, et qui présentent un intérêt particulier soit pour notre alimentation, soit pour nos besoins industriels ou environnementaux.

5.1. L'homme crée-t-il de la biodiversité ? (suite)

Pascal Ribéreau-Gayon (Correspondant de l'Académie des sciences)

La création de nouvelles formes de vignes résistantes aux maladies. Compte tenu de l'intérêt que les hommes ont toujours porté au vin, la vigne représente une valeur économique certaine. Pour cette raison, elle a toujours été un objet de recherche scientifique et technique particulier.

Il existe une classification simplifiée qui distingue différentes formes au sein du genre *Vitis* ; en fonction de leur origine, on distingue les "vignes européennes" et les «vignes américaines». Les premières appartiennent toutes à l'espèce *Vitis vinifera* qui comprend la majorité des cépages producteurs de vin dans le monde. Les secondes comprennent plusieurs espèces, les principales étant *Vitis riparia*, *Vitis rupestris* et *Vitis labrusca* ; certaines ne donnent pas de fruit, d'autres des fruits et des vins de qualité médiocre. Une différence essentielle entre ces groupes est leur résistance aux différentes maladies (oïdium, phylloxéra, mildiou). Les variétés de *V. vinifera* sont dans l'ensemble très sensibles, alors que de nombreuses vignes américaines sont résistantes.

Etant donné la grande diversité des espèces naturelles, l'amélioration du vignoble s'est faite pendant des siècles par une sélection empirique des vignes existant dans l'environnement. Mais on sait depuis longtemps que les différentes variétés peuvent s'hybrider facilement. On obtient ainsi de nouvelles formes qui s'inscrivent dans la notion de biodiversité. On en connaît un exemple remontant au début du XIXème siècle. Il existe des cépages, rares mais recherchés, qui possèdent des baies à jus coloré, permettant la production de vins rouges foncés ; malheureusement elles possèdent de faibles rendements. En croisant l'une d'elles avec l'Aramon, cépage gros producteur, il a été créé en 1925, l'Alicante Bouschet qui remplissait ces conditions et qui a représenté 18% du vignoble français en 1927.

Bien plus significatives ont été les variétés créées à l'occasion des maladies qui ont ravagé les vignobles européens : oïdium (champignon) en 1852, phylloxéra (insecte) en 1868, mildiou (champignon) en 1878. Les vecteurs de ces maladies provenaient sans doute des boutures de plants américains dont on ignorait la contamination et dont l'importation a augmenté considérablement au moment de la lutte contre l'oïdium. Le développement de l'insecte, qui attaque les racines des vignes européennes et provoque le phylloxéra, fut rapide et dramatique.

La lutte contre le phylloxéra fut longue et difficile. L'immersion du sol du vignoble en hiver soulevait des problèmes, mais donnait des résultats satisfaisants ; deux traitements chimiques ont semblé prometteurs, mais se sont révélés d'une efficacité insuffisante. On essaya des plants américains; leur résistance aux parasites était

bonne, mais la qualité des vins inacceptable. Après quelques difficultés, le greffage de cépages *V. vinifera*, sur porte-greffes américains à racines résistantes, s'est révélé, aujourd'hui encore, la solution satisfaisante. Il n'intervient pas sur la biodiversité mais il permet le maintien de la pérennité de l'encépagement qui a fait la notoriété des vignobles. Aujourd'hui, dans le monde entier, pratiquement tous les vignobles producteurs de vin sont constitués de cépages *V. vinifera*, greffés sur porte-greffes américains.

Quelques années plus tard, l'apparition du mildiou fut une nouvelle catastrophe. Le greffage était inefficace. La prévention a été obtenue par un traitement à base de sulfate de cuivre (bouillie bordelaise); mais celui-ci était plus onéreux que le greffage. Cette circonstance a incité les pépiniéristes à rechercher la création de nouvelles variétés issues de multiples croisements entre *V. vinifera* et plants américains. On pouvait espérer ainsi obtenir de nouvelles variétés, possédant les caractéristiques de leurs parents, résistance aux maladies provenant des cépages américains et qualité des vins issue de *V. vinifera*. Cette pratique s'est révélée facile à mettre en œuvre et de nombreux amateurs s'essayèrent à cette technique qui bénéficiait d'un préjugé favorable. Il s'agissait de créer une viticulture nouvelle, à partir des connaissances scientifiques appliquées à une production agricole très traditionnelle, avec l'espoir de créer de nouvelles variétés de vigne associant qualité du vin avec résistance aux maladies, donc des frais de culture moins élevés. Ces nouvelles variétés furent connues sous le nom d'hybrides-producteurs-directs, parce que ne nécessitant pas le greffage. Le grand espoir était de créer la "vigne idéale".

Des pépiniéristes professionnels s'attelèrent à cette tâche; plusieurs nouvelles variétés, surtout à raisins noirs, furent créées et commercialisées, dont une dizaine a été plantée sur plus de 10 000 hectares. En 1958, les hybrides représentaient 400 000 hectares, soit 30% du vignoble français; en 1980 ce chiffre était retombé à 150 000 hectares. Aujourd'hui ils sont devenus très limités, demeurant essentiellement pour l'autoconsommation et la production d'Armagnac. Les raisons de cet échec sont compréhensibles; la résistance aux maladies a bien été obtenue, mais elle ne permettait pas de compenser la qualité insuffisante du vin.

La culture des cépages hybrides était autorisée pour les vins ordinaires, mais pas pour les appellations contrôlées qui sont soumises à des réglementations strictes. Cependant en période de crise économique, les risques de fraude étaient réels et effectivement ces fraudes furent nombreuses en l'absence de tout contrôle analytique objectif; elles justifiaient des procédures judiciaires restées célèbres.

Dans les années 1960 il a été montré que la matière colorante rouge des vins est différente. Chez les *V. vinifera*, les anthocyanes existent exclusivement sur la forme de monoglucosides, alors que *V. riparia* et *V. rupestris*, les plus utilisées dans les hybridations, possèdent des mono et diglucosides. Ce caractère étant dominant, au sens génétique du terme, dans les croisements, la majorité des hybrides possèdent des mono et des diglucosides; mais le caractère récessif de *V. vinifera* peut réapparaître à l'issue de plusieurs croisements; quelques hybrides ne sont pas discernables par l'analyse des anthocyanes.

L'analyse des anthocyanes du vin se fait très simplement par chromatographie. La généralisation de cette méthode a rapidement permis d'éliminer la totalité des cépages hybrides dans les vignobles d'appellation. Ce fut une des causes qui a permis l'avènement de la prospérité du vignoble bordelais.

Aujourd'hui, malgré le souhait de diminuer l'emploi des pesticides, dans le cadre de l'agriculture biologique, on estime qu'il ne sera pas possible de reprendre, même avec les données scientifiques modernes, les travaux d'hybridation faisant intervenir les variétés américaines. Les résultats s'éloigneraient trop des facteurs naturels immuables de la grande viticulture de qualité. La biodiversité serait certainement plus acceptable, dans la mesure où elle concernerait exclusivement le croisement entre elles de variétés de *V. vinifera*; des résultats ont été obtenus (cf. Alicante Bouschet) mais actuellement ils sont limités et concernent plus des variétés de vigne à raisins de table.

5.2. Les OGM menacent-ils la biodiversité ?

Christian Dumas (Membre de l'Académie des sciences)

On utilise aujourd'hui souvent le terme OGM, *Organisme Génétiquement Modifié*, de manière restrictive, en pensant aux plantes, sujet de controverses et de polémiques en France depuis 1997. C'est en effet à cette période qu'a été donnée la première autorisation de mise en culture d'une variété de maïs OGM, autorisation rapidement suspendue à la suite de différents moratoires. Seuls quelques essais en champ ont été autorisés mais ils ont été le plus souvent détruits par les opposants à ce type de culture, destructions anarchiques largement médiatisées par les organisations qui prônent ces actions illégales. Les plantes génétiquement modifiées menacent-elles l'environnement et la biodiversité ? Les caractères génétiques introduits jusqu'à présent sont essentiellement la résistance aux insectes, aux herbicides ou aux virus. Dès 2012, l'introduction de la résistance à la sécheresse dans le maïs est prévue en Afrique du Sud. Dans un avenir proche, la production de molécules à haute valeur ajoutée, comme des médicaments, sera obtenue grâce à des OGM. Pour répondre à la question de la menace sur la biodiversité, il faut expérimenter.

L'évaluation de l'impact des OGM sur l'environnement est nécessaire. Un rapport de 2010 publié par les *National Academies* (sciences, médecine, technologies) des Etats-Unis répond, entre autres, à cette question. Il porte sur une quinzaine d'années d'utilisation de la technologie OGM dans les domaines de l'environnement, de l'agronomie et de l'économie, à l'échelle du continent nord-américain. Il indique que maïs, coton et soja OGM couvrent la moitié des surfaces cultivées avec ces espèces. Réalisée par des experts, cette étude aura-t-elle plus de chance d'être relayée par les médias que les précédents rapports publiés en France par l'Académie des sciences ou encore par les Académies de médecine, de pharmacie ou d'agriculture? L'analyse précise du rapport bénéfices/risques démontre que les OGM procurent des bénéfices réels du point de vue environnemental. Il en est ainsi des plantes génétiquement résistantes aux insectes phytophages qui renferment une protéine insecticide issue d'une bactérie du sol (*Bacillus thuringiensis*) connue depuis longtemps pour ses propriétés insecticides. Cette bactérie utilisée sous forme de pulvérisations sur les cultures depuis un demi-siècle est autorisée en agriculture biologique. Dans le cas des plantes OGM, c'est la plante elle-même qui produit l'insecticide mais à des doses infinitésimales, sans effet sur la faune associée, les sols ou l'eau, contrairement aux traitements conventionnels. On connaît la citation : "*Tout est poison, rien n'est poison, la dose fait le poison !*"

L'histoire du moratoire sur les OGM en France. Le problème des plantes transgéniques s'est cristallisé autour du maïs Bt dont l'inscription sur le catalogue officiel autorisant sa mise en culture a été obtenue du Ministère de l'Agriculture, en février 1997 ; autorisation suspendue une semaine plus tard alors que les importations ne l'étaient pas ! Cette suspension, décidée sans explication en direction de l'opinion, est levée provisoirement par le gouvernement Jospin, en décembre 1997, puis bloquée à nouveau à la suite d'un recours de *Greenpeace* à la Cour européenne de La Haye. Ces volte-face successives, en vertu du principe de précaution, sans une réelle information de l'opinion, suscitent des peurs liées à l'utilisation de cette nouvelle technologie par l'industrie semencière et à des scénarios catastrophes largement relayés par les médias.

La publication par la revue scientifique *Nature*, le 20 mai 1999, d'une petite note sur les maïs OGM a entraîné le renforcement du moratoire en Europe et a été considérée par les militants anti-OGM comme la preuve qui leur manquait pour étayer leur argumentaire. À la différence d'un article scientifique classique, les notes sont acceptées sous la seule responsabilité de l'éditeur, c'est-à-dire sans une évaluation critique par des référés. De quoi s'agit-il ? Une équipe nord-américaine avait nourri en laboratoire des chenilles du papillon Monarque avec des feuilles de laitron saupoudrées de grains de pollen issus de maïs transgéniques exprimant un insecticide. Ce protocole était supposé mimer ce qui se passe autour des champs de maïs au moment de la ponte des papillons. Destiné à protéger la plante des insectes herbivores, le " transgène " intégré à la plante lui permettait de fabriquer son propre insecticide. Ce dernier se retrouvait aussi dans les grains de pollen et les chenilles nourries de cette manière avaient des taux élevés de mortalité. Ce travail expérimental assez peu élaboré dans son protocole et très largement critiqué dans les milieux scientifiques a eu un très fort impact médiatique : il transformait ce travail plus que préliminaire en une preuve tangible de la dangerosité des OGM sur la biodiversité ! Les anti-OGM voyaient là le moyen d'interdire les essais en champ et surtout un argument de poids, pour promouvoir un moratoire sur la culture de maïs transgénique, y compris aux Etats-Unis. Ceci a eu également des répercussions en Amérique du Nord. En effet, le papillon Monarque qui migre du Canada au Mexique par vol de plusieurs millions d'individus est un véritable symbole et une attraction touristique dans certains Etats. Au Mexique, les Anciens croyaient même que les migrations de Monarque ramènent avec elles l'âme des morts, car ils reviennent vers la Toussaint.

Plusieurs équipes indépendantes de scientifiques comprenant des spécialistes des insectes, des généticiens, des agronomes, etc., ont fait des expériences sur le terrain pour vérifier les travaux publiés par la revue *Nature*. Leurs résultats, expertisés par des référés internationaux, ont été publiés, fin 2001, dans un même numéro des *PNAS*, revue prestigieuse de la *National Academy of Sciences* des Etats-Unis. Les milieux scientifiques ont eu connaissance de ces résultats qui démontrent l'absence de toxicité des maïs transgéniques sur la biodiversité, les seuils étant souvent très inférieurs à ceux obtenus avec des maïs traités par voie chimique conventionnelle. Mais les médias n'ont absolument pas repris cette information ! Depuis, plusieurs milliers d'articles scientifiques ont été publiés. Si certains, peu probants et très controversés pour les protocoles utilisés ou leur interprétation, ont encore alimenté la polémique, la très grande majorité d'entre eux atteste de l'innocuité des plantes OGM, comme le maïs insecticide, sur l'environnement et la biodiversité.

Les effets sociaux de l'utilisation des OGM. Ils sont identiques à ceux liés au développement de nouvelles technologies qui marquent une rupture en agriculture, comme dans le cas des OGM. On peut signaler ainsi le rejet massif par les agriculteurs français des premiers maïs hybrides américains introduits en 1947, à la suite du plan Marshall destiné à redresser l'agriculture européenne et à lui donner l'autosuffisance alimentaire qui lui était nécessaire. La technologie de l'hybridation, véritable rupture technologique, n'a été développée en France qu'à partir de 1957 grâce à l'INRA et aux travaux d'André Cauderon (Membre de l'Académie des sciences, 1922-2009) ; elle a permis de faire passer les rendements de maïs de 18 qx/ha en 1948 à 100 qx/ha en 2009.

La culture de plantes transgéniques, autre rupture conceptuelle et technologique, a permis récemment de sauver des variétés cultivées. C'est le cas pour la papaye des îles Hawaï irrémédiablement condamnée à la suite d'une maladie virale sans traitement efficace. Des papayes OGM, résistantes à ce virus, ont permis aujourd'hui de maintenir cette culture dans ces îles. L'introduction de la technologie OGM, avec les concepts sous-jacents, est récente dans les programmes de lycée où elle figure seulement en option ; seul un tout petit pourcentage de citoyens a accès à cette formation scientifique permettant d'avoir un regard critique sur le sujet.

L'intérêt des essais en champ. Il est indispensable de pouvoir effectuer des essais en champ, seules expériences fiables permettant *a priori* d'éliminer tout risque potentiel vis-à-vis de l'environnement. L'autorisation de mise en culture est proposée par des experts placés sous l'égide de la *Haute Autorité sur les biotechnologies* depuis le *Grenelle de l'environnement* ; la décision finale incombe ensuite aux responsables politiques. Le risque n'est pas synonyme de danger, il demande une évaluation rigoureuse à effectuer dans les conditions naturelles, c'est-à-dire en champ. Les conditions de serre préconisées par les militants anti-OGM sont totalement artificielles et irréalistes car les différents paramètres de l'*écosystème champ* ne sont pas modulables. On peut citer parmi ces paramètres : le sol avec ses microorganismes (bactéries, champignons, virus) et la microfaune associée (vers de terre, arthropodes, etc.), les prédateurs, les parasites, les agents pathogènes, les adventices des cultures, et enfin le climat (pluviométrie, vents, etc.). Des essais variés dans des localités aux conditions pédoclimatiques différentes sont donc indispensables. Ce sont les conditions nécessaires pour obtenir l'inscription au catalogue officiel des plantes cultivées pour une nouvelle variété.

En conclusion : Que penser des interdictions concernant les essais en champ votées par certaines assemblées régionales ou certains conseils municipaux ? Que dire également de l'information concernant cette question et diffusée, notamment, par les télévisions ? Aujourd'hui, les porte-paroles les plus écoutés sur les sujets traitant de l'environnement ou des OGM sont journalistes, photographes ou cinéastes, de grand talent certes, mais sans réelle compétence scientifique. Dans ce domaine devenu très polémique, la réfutabilité est du domaine de la science, seul domaine où l'on peut expérimenter. Encore faut-il que les expérimentations soient possibles !

5.2. Les OGM menacent-ils la biodiversité ? (suite)

Georges Pelletier (Membre de l'Académie des sciences)

OGM est communément devenu synonyme de plante génétiquement modifiée. Ce sont exclusivement elles qui font débat alors que les microorganismes génétiquement modifiés sont largement utilisés en médecine ainsi que dans l'industrie agro-alimentaire.

Une plante génétiquement modifiée contient dans son génome un ou plusieurs gènes obtenus par génie génétique. On parle de constructions génétiques. Dans quel but ? Il s'agit de conférer à une culture une propriété visant à améliorer sa production comme la résistance à un groupe de virus ou à un insecte ravageur, la tolérance à un herbicide non-sélectif, ou à un déficit en eau, ou encore la capacité à mieux utiliser le nitrate du sol indispensable à sa croissance, ou conférant à sa récolte une qualité nouvelle comme la production d'acides gras essentiels dans ses graines. Pour chaque cas, un gène particulier a été en quelque sorte construit pour obtenir l'une ou l'autre de ces propriétés. Ainsi nous avons lancé à l'INRA, il y a une vingtaine d'années, des recherches pour créer un colza tolérant à un champignon et produisant une huile améliorée.

Ce type d'étude a été interrompu suite aux saccages des groupes anti-OGM qui ont touché d'abord nos Instituts publics de recherche. Parmi les slogans de ces militants utilisés, pour justifier leur action, il y a l'affirmation que les OGM portent atteinte à la biodiversité.

Il existe près de 8 000 articles scientifiques dans le monde se rapportant aux aspects agri-environnementaux de la culture des plantes transgéniques. Prenons l'exemple de variétés tolérant un herbicide. L'herbicide réduit plus ou moins fortement des populations de plantes sauvages dans le champ. À ces plantes sont inféodés des insectes qui, privés de leur habitat, ne s'y reproduiront pas. Les animaux qui s'en nourrissent délaisseront ce champ. Il est clair dans ce cas que le caractère OGM est un facteur de réduction de la biodiversité du champ, comme le serait d'ailleurs un sarclage soigneux ! Mais l'usage facile d'herbicide permet de limiter le recours au labour, émetteur de CO₂ et perturbant fortement la microflore et la faune du sol. La tolérance à un herbicide n'est d'ailleurs pas l'exclusivité de la transgénèse : des cultures comme le blé qui sont traitées par un herbicide dit "sélectif" sont donc spontanément résistantes à cet herbicide.

Les caractères créés par transgénèse peuvent eux-mêmes avoir indirectement des effets favorables sur la biodiversité. Par exemple, d'après les études financées par la Commission européenne, le maïs Bt (produisant une protéine toxique pour les chenilles) n'a pas d'effet négatif sur les abeilles, ni sur les arthropodes auxiliaires, les acariens, les pucerons, les micro-organismes du sol, les microarthropodes du sol. Pour toutes ces espèces, l'impact des rotations de cultures ou des variations climatiques d'une année sur l'autre est infiniment plus important que la différence entre un maïs Bt et un maïs conventionnel sans traitement insecticide. La biodiversité des insectes d'un champ de maïs Bt est à peu près la même que celle d'un champ non traité par insecticides, mis à part les insectes cibles et évidemment leurs

parasites ; cette biodiversité est plus grande que celle d'un champ traité. Les plantes productrices de toxine Bt, hautement spécifique, rendent inutiles des insecticides dont le spectre est beaucoup plus large et qui ne font pas la différence entre les prédateurs des cultures et les insectes utiles.

Interdite en France, pour des raisons politiques, la construction génétique MON 810, créée par le centre de recherche de la compagnie Monsanto, est dans ce cas. Les raisons "scientifiques" avancées pour cette interdiction ont été désavouées par les experts scientifiques de la communauté internationale, ce qui ridiculise l'expertise française : posture politique, imposture scientifique.

Toutes les variétés de blé cultivées portent un même caractère, qui n'existe pas chez les blés sauvages et qui permet aux grains de rester attachés au rachis de l'épi jusqu'au battage. Cette mutation d'un gène a été privilégiée dès le néolithique. On parle de mutation de domestication. Plus récemment, le gène qui est responsable du raccourcissement des pailles a été vulgarisé chez les céréales. Le génie génétique est également, au fond, une forme de domestication. S'agissant d'un seul gène, il est très facile de le transférer par croisement à la variété de son choix adaptée à des conditions pédoclimatiques particulières. Dès 2004, on dénombrait pour les quelques constructions génétiques exploitées dans le monde, résistance au glyphosate ou résistance aux chenilles, 1261 variétés distinctes de soja, 782 variétés de maïs, et 81 variétés de cotonnier. Ces variétés peuvent différer les unes des autres par les quelque 30 000 gènes que comprend leur patrimoine héréditaire. Les études récentes ont montré que la diversité génétique des variétés OGM cultivées en Amérique du Nord depuis moins de quinze ans est équivalente à celle des variétés conventionnelles qui les ont précédées, et elle a même augmenté dans le cas du cotonnier.

La polyvalence des transgènes est un atout pour leur transfert dans diverses variétés végétales, adaptées à des conditions particulières de milieu quand ces variétés se reproduisent sexuellement. C'est aussi la possibilité de préserver ou de réhabiliter des cultivars d'espèces à reproduction clonale comme la pomme de terre, la vigne, certains arbres fruitiers, plus ou moins abandonnés ou du moins peu cultivés compte tenu de leur sensibilité à des maladies. De ce point de vue, les OGM sont un facteur favorisant la diversité génétique des plantes cultivées et ils le seraient plus encore s'ils étaient banalisés. Cependant, en pratique et dans les conditions actuelles, le frein que constitue le coût très élevé des évaluations de sécurité, le plus souvent totalement injustifiées, privilégie quelques grandes entreprises en excluant de nombreux acteurs, et écarte les espèces dont l'importance économique est secondaire.

La plus grande menace que fait peser l'agriculture sur la biodiversité est, pour répondre à la croissance de la population, l'extension des territoires mis en culture aux dépens des zones non cultivées comme les grands massifs forestiers, conséquence inévitable de la poursuite de pratiques agricoles peu performantes. Sans progrès génétique, auquel participent les OGM, ce mouvement ne sera pas enrayé.

5.2. Les OGM menacent-ils la biodiversité ? (suite)

Bertrand Saint-Sernin (Membre de l'Académie des Sciences Morales et Politiques)

Organismes domestiqués et organismes génétiquement modifiés. Les plantes et les animaux qui servent à notre alimentation ont été transformés par les agriculteurs depuis l'époque néolithique. La question qui se pose est celle-ci : avons-nous les moyens de tester les qualités des OGM de façon aussi sûre et aussi complète que nous testons les qualités d'organismes sauvages ou d'organismes modifiés par l'agriculture classique ?

En ce qui concerne l'usage médical des OGM, la réponse est "oui". L'insuline, certains anti-coagulants et des médicaments utilisés en cancérologie sont synthétisés à partir d'OGM. Cet usage médical des OGM est bien admis. De nouvelles générations d'OGM peuvent pallier certaines carences alimentaires et remédier, par exemple, à certaines formes de cécité infantile.

En ce qui concerne l'usage alimentaire des OGM, la réponse est aussi "oui". On dispose de tests fiables et, dans les pays où la consommation de produits alimentaires comportant des OGM est autorisée, on n'a pas constaté de cas d'intoxication. En outre, même en France où l'usage des OGM est restreint, une partie de la nourriture du bétail est à base de soja transgénique, et l'on n'a pas constaté de problèmes particuliers.

Reste l'action des plantes génétiquement modifiées sur l'environnement. Créer une plante génétiquement modifiée, c'est créer une variété nouvelle. Cette variété se comporte dans la nature comme les autres variétés obtenues par les agriculteurs. Si, dans un environnement donné, la plante génétiquement modifiée jouit d'un avantage reproductif, elle marginalise ses concurrentes ou les élimine. Il se passe entre les variétés génétiquement modifiées et les autres variétés ce qui se passe dans la nature entre les variétés sauvages selon les lois de la sélection naturelle.

Pour mesurer les effets sur l'environnement d'une plante génétiquement modifiée, il faut procéder à des essais en plein champ : c'est ce qui se pratique aux Etats-Unis, au Brésil, en Chine, en Égypte, en Afrique du Sud, etc. Or c'est devenu impossible en France. Les essais réalisés dans des centres publics de l'INRA ou des centres privés de semenciers étant détruits chaque fois, on n'a aucun moyen de se faire une idée précise des avantages ou des inconvénients pour l'environnement d'une plante transgénique donnée.

On ne dispose pas non plus d'étude comparative sur les effets de l'épandage d'engrais chimiques et de l'utilisation de moyens biologiques pour la sauvegarde des cultures.

Ainsi, la recherche agronomique française se trouve entravée, alors que de grands pays développent la leur et que la Chine propose à l'Afrique sub-saharienne une coopération de recherche et de développement des OGM.

Biotechnologies et biodiversité. Du point de vue théorique, les biotechnologies ne sont pas les ennemies de la biodiversité. Revenons un instant sur ce qui s'est produit en chimie depuis le premier tiers du XIX^e siècle. La chimie de synthèse, en moins de deux siècles, a produit plus de vingt millions de substances dont 5% seulement se trouvaient déjà dans la nature. Les substances créées par synthèse prennent place dans la nature à côté des autres.

De même, l'agriculture a réussi, depuis ses débuts à l'époque néolithique, et, de façon bien plus rapide au XX^e siècle, à créer, au sein des espèces cultivées, de très nombreuses variétés : il existe, par exemple, 100 000 variétés de riz.

La technique appelée "transgénèse", qui consiste à introduire dans un organisme vivant (par ex. une plante) un ou plusieurs gènes provenant soit d'une autre variété de la même espèce, soit d'une espèce différente, ne réduit pas la biodiversité, mais l'augmente, puisqu'elle crée ainsi une nouvelle variété au sein d'une espèce donnée. Au cours du XXI^e siècle, la biologie de synthèse fera apparaître de nouveaux organismes vivants – des variétés nouvelles – comme la chimie de synthèse a fabriqué des millions de nouvelles substances.

Pourquoi, dès lors, certains voient-ils dans les biotechnologies – dans la production des OGM notamment – une atteinte à la biodiversité ? Pour une raison simple : les OGM se comportent comme les espèces sauvages ou cultivées de façon classique. Ils sont soumis à la "sélection naturelle" : si donc on fabrique un OGM qui, dans un environnement donné comportant tels types de prédateurs, jouit d'un avantage reproductif, cet OGM supplantera les organismes qui n'ont pas le même avantage que lui. C'est vrai des OGM comme de tous les organismes vivants : ils coopèrent avec leur environnement mais sont aussi en guerre avec d'autres êtres vivants.

C'est pourquoi on ne peut pas prendre à l'égard des questions agricoles des positions idéologiques. Dès lors que l'on croit que la "sélection naturelle" ressemble à la "sélection artificielle" que les agriculteurs pratiquent depuis des millénaires, on doit juger au cas par cas les avantages et les inconvénients d'introduire sur telle terre telle variété, ou d'utiliser tels types d'engrais, chimiques ou biologiques.

Le principe de précaution s'applique, mais de façon comparative. En effet, en agriculture, depuis toujours, on doit se protéger contre divers ennemis : l'humidité, le gel, la sécheresse, les prédateurs, etc. Il n'y a donc pas d'un côté une nature qui serait bonne et, de l'autre, des artifices humains qui seraient mauvais : l'agriculture, l'élevage, la médecine, l'enseignement, la politique, etc. sont des pratiques humaines inventées pour obtenir certains avantages et se prémunir contre certains dangers. Les biotechnologies ne font pas exception. Elles constituent l'étape contemporaine d'une histoire millénaire.

Conclusion : pertinence des biotechnologies. Les biotechnologies concernent l'ordre vivant : en tant que techniques, ce sont des actions, c'est-à-dire des processus causals ; en tant que "technologies", ces actions sont censées reposer sur des connaissances scientifiques qui servent aussi à les valider. Les biotechnologies impliquent donc que la science puisse, au moins partiellement, représenter fidèlement des processus naturels, c'est-à-dire des enchaînements causals. À ce titre, elles relèvent d'une conception réaliste de la science. Dans cette perspective, les processus naturels ne sont pas "mystérieux" : ils sont intelligibles parce qu'ils ne diffèrent pas foncièrement des techniques humaines.

Tester la pertinence d'une biotechnologie, c'est comparer ses avantages et ses inconvénients à d'autres types d'action possible : par exemple, en agriculture, comparer l'usage de telle variété de plante avec telle autre ; ou l'emploi d'engrais et de pesticides chimiques avec le recours à des procédés partiellement ou exclusivement biologiques de lutte contre les prédateurs. En médecine, tester une biotechnologie, c'est s'assurer par une série d'essais, par exemple, que l'insuline humaine fabriquée à partir d'un OGM (une levure génétiquement modifiée) a les mêmes propriétés que l'insuline fabriquée par l'organisme humain. Enfin, on commence à savoir produire des variétés de plantes génétiquement modifiées qui combinent valeur nutritive et utilité médicale (par exemple un riz obtenu par biotechnologie peut réduire le risque de cécité infantile).

Les biotechnologies ne se limitent pas à la création d'OGM : elles couvrent un champ en constante extension. En revanche, la transgénèse est pour elles un instrument indispensable, car elle aide à mieux spécifier l'action des gènes dans les organismes vivants obtenus par l'agriculture classique ou par des technologies plus récentes.

Les biotechnologies s'inscrivent dans une histoire qui débute à l'époque néolithique, quand l'humanité commence à substituer à la cueillette et à la chasse la domestication des plantes et des animaux. Elles exigent, comme les autres entreprises humaines, l'alliance difficile de l'audace et de la prudence.

6. Qu'en est-il pour la France ?

6.1. Quels sont les impacts des divers aspects de l'activité humaine (démographie, urbanisation, transports, agriculture, industrie, etc.) sur la biodiversité en France ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

L'exemple des poissons d'eau douce illustre parfaitement la diversité des impacts de l'activité humaine sur un milieu naturel. Selon un état des lieux récent, 15 espèces de poissons d'eau douce sont menacées de disparition sur les 69 espèces présentes sur notre territoire métropolitain³⁶. Ces 15 espèces sont classées dans les catégories : "en danger critique", "en danger" et "vulnérables" (Tableau).

³⁶ Liste rouge des espèces menacées en France (2009). Comité français de l'UICN et Muséum national d'Histoire naturelle, en partenariat avec la Société française d'ichtyologie et l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques.

Tableau : Distribution des 69 espèces de poissons d'eau douce de France métropolitaine selon les catégories de la Liste rouge de l'Union Internationale de Conservation de la Nature (d'après la liste rouge des espèces menacées en France, 2009).

Catégorie	Nombre
Éteinte	2
Éteinte en métropole	2
En danger critique d'extinction (CR)	4
En danger (EN)	2
Vulnérable (VU)	9
Quasi menacée	6
Préoccupation mineure	22
Données insuffisantes	22

Ces catégories s'appuient sur cinq critères assez simples, portant par exemple sur la taille de la population de l'espèce, la diminution de cette taille, l'étendue de l'aire de répartition de l'espèce, la réduction ou la fragmentation de cette étendue. Les espèces menacées (VU, EN et CR) retiennent particulièrement l'attention car le glissement d'une catégorie à l'autre témoigne de l'amélioration ou de la dégradation des milieux aquatiques, ainsi que de l'urgence des mesures à prendre. Si rien n'est tenté pour les sauvegarder, les espèces en VU auraient 10 chances sur 100 de disparaître dans les cent années à venir, les espèces en EN auraient 20 chances sur 100 de disparaître dans les 20 années à venir, et les espèces en CR auraient 50 chances sur 100 de disparaître dans les cinq années à venir³⁷.

Quant aux impacts, ils peuvent varier d'un lieu à l'autre. Ici, l'extraction des granulats détruit des secteurs à galets ou à graviers, sièges privilégiés de la reproduction des lamproies de rivière (espèce "vulnérable") et des sofies (espèce "quasi menacée"). Ailleurs, l'assèchement des zones humides affecte l'habitat des loches d'étang (espèce "en danger"), ou le drainage des prairies humides réduit la durée des périodes de crue, altérant les conditions favorables à la reproduction des brochets (espèce "vulnérable"). Partout, la pollution attente à la qualité des eaux douces, affectant particulièrement deux espèces "en danger critique d'extinction" : l'anguille européenne, aux défenses immunitaires fragilisées par de nombreux polluants et pesticides ; le chabot du Lez, à la fécondité affectée par divers polluants d'origine agricole. Tous ces impacts affectent également de grands migrateurs amphihalins – saumon atlantique, lamproie de rivière, esturgeon européen, anguille européenne –

³⁷ Begon M., Townsend C.R., Harper C.R. (2007) Ecology 4^{ème} édition

qui réalisent une partie de leur cycle de vie en mer et une autre en rivière, où de multiples barrages s'opposent à leurs déplacements³⁸.

Quelques espèces menacées résument la multiplicité des activités humaines susceptibles d'appauvrir la biodiversité des eaux continentales en France³⁹. L'esturgeon européen, *Acipenser sturio* (CR), longtemps victime d'une pêche intensive, a vu son habitat naturel détruit par extraction de granulats. Sa grande taille lui interdit d'emprunter les passes à poissons traditionnelles pour franchir les barrages, et sa maturité sexuelle tardive (environ 10 ans pour les mâles et 15 ans pour les femelles) complique le renouvellement de ses populations. L'anguille européenne, *Anguilla anguilla* (CR), est confrontée à une pêche excessive aggravée par le braconnage de ses alevins (les civelles), s'ajoutant aux barrages, aux bouchons vaseux des estuaires, aux polluants et pesticides, au parasitisme transmis par d'autres poissons d'aquaculture. L'apron du Rhône, *Zingel asper* (CR), est mis en danger critique d'extinction par le remaniement du lit des cours d'eau, les pollutions, les barrages qui isolent ses populations, entraînant une perte progressive de diversité génétique. Le brochet, *Esox lucius* (VU) régresse en de nombreux cours d'eau en raison de l'assèchement des zones humides – prairies inondées, marais et bras morts des rivières – nécessaires à sa reproduction : le drainage agricole et l'arasement des haies ont raccourci la durée d'inondation de ces zones, tandis que l'endiguement les a déconnectées du lit majeur des cours d'eau. L'espèce est aussi fragilisée par la pollution des eaux, la présence de barrages et une pêche excessive.

Il semble donc bien difficile de séparer les divers aspects de l'activité humaine : la démographie, l'urbanisation, les transports, l'agriculture, l'industrie, additionnent leurs effets pour appauvrir la biodiversité. Cette conjugaison des impacts frappe particulièrement des écosystèmes tels que les estuaires qui, à l'interface entre les eaux douces et les eaux marines, subissent les pressions d'activités qui se développent en amont comme en aval, et s'ajoutent aux activités portuaires, touristiques et halieutiques. Tel est le cas du vaste estuaire de la Gironde, modifié par la réduction des débits de la Garonne et de ses affluents, ainsi que par l'aménagement d'un chenal de navigation, avec dragages et remblais immergés. D'où une pénétration de l'estuaire par les eaux marines et une transformation de sa faune au cours des trente dernières années. D'où aussi la question du choix d'une biodiversité accompagnant un projet commun pour cet estuaire⁴⁰.

Quel que soit le milieu considéré, estuarien ou autre, la recherche de tels projets communs, débattus et partagés, est la seule réponse durable aux impacts multiples et variés des activités humaines sur la biodiversité en France.

³⁸ Rochard E. *Evolution des poissons migrateurs et impacts anthropiques*. Colloque Hydroécologie de Bordeaux, 17-18 novembre 2009.

³⁹ Liste rouge des espèces menacées en France (2009), op. cit.

⁴⁰ Boët Ph., Béguer M., Delpéch C., Girardin M., Lepage M. *L'estuaire de la Gironde face au changement global*. Colloque Hydroécologie de Bordeaux, 17-18 novembre 2009.

6.1. Quels sont les impacts des divers aspects de l'activité humaine (démographie, urbanisation, transports, agriculture, industrie, etc.) sur la biodiversité en France ? (suite)

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

Les sources d'impact de l'homme sur la biodiversité peuvent être schématiquement classées en trois grands types : a) l'exploitation directe b) les changements d'utilisation des sols et autres changements d'usage c) les changements climatiques.

L'exploitation directe d'êtres vivants participe à l'érosion de la biodiversité en France, en métropole comme outre-mer. La surexploitation des poissons marins comme le thon rouge est ainsi patente et bien connue. La France a dû aussi lutter contre des pêches illicites à la légine autour des îles Kerguelen. La situation de la chasse est hétérogène : bonne gestion et augmentation marquée des effectifs des grands herbivores, chasse au gibier d'eau peinant à être réellement "durable". La surprenante absence de législation de la chasse en Guyane (où l'on peut donc chasser à toute saison et toute heure !) a également des conséquences inévitables sur son immense biodiversité.

Mais l'emprise des activités humaines sur l'espace et les changements d'usage sont actuellement, de façon incontestable, la source principale d'érosion de la biodiversité en métropole. Les plaines (bassin parisien, couloir rhodanien, Aquitaine) sont presque entièrement livrées à l'agriculture intensive et aux transports. Les espaces réservoirs de biodiversité y sont considérablement amenuisés et fragmentés. Dans une économie fondée sur un principe de croissance et peu habituée à intégrer des coûts à long terme, une autoroute sera plus "naturellement" implantée dans des forêts que dans un vignoble d'appellation. La planète perd environ 1% des milieux naturels chaque année et la France ne fait donc pas exception, malgré la déprise agricole, notamment dans le Massif Central. Certains milieux d'une grande originalité – comme les steppes des "coussouls" de Crau - ont ainsi virtuellement disparu. Les zones humides ont été largement détruites au cours des dernières décennies. Les lois "montagne" ou "littoral", pensées comme outils de gestion de l'espace, sont constamment l'objet de tentatives de contournement. Cependant le conservatoire du littoral et des espaces lacustres, associant les élus à une démarche de conservation, joue un rôle considérable dans la conservation d'espaces propices à la biodiversité. Face à un grignotage sans réel ralentissement et qui semble inéluctable, il faut aussi saluer l'activisme et l'efficacité des actions de conservation des associations de protection de la nature.

L'impact déjà ancien de l'agriculture s'aggrave avec une intensification de plus en plus marquée. Les oiseaux communs ont perdu près de 30 % de leurs effectifs en une quinzaine d'années. La fragmentation et l'artificialisation des milieux induisent une vague marquée d'extinctions locales, concernant en particulier des espèces spécialistes. De nombreux cas sont bien documentés chez les vertébrés, ressources "faiblement renouvelables" et donc sensibles, qui jouent un rôle d'avertisseur. De nombreux exemples d'intensification agricole ont un impact écosystémique. Le développement de l'élevage hors-sol, basé sur une complémentation voire une nourriture entièrement apportée de l'extérieur, connaît ainsi son extrême avec les

élevages de porc en Bretagne : les rejets de nitrates importés induisent en bout de chaîne des proliférations d'algues vertes nuisibles et coûteuses à endiguer. Cette pollution est à la charge des collectivités locales et de l'Etat, et le principe pollueur-payeur n'est donc clairement pas appliqué.

Le changement climatique a d'ores et déjà induit en métropole des glissements sensibles de la distribution des espèces vers le nord ou en altitude, d'une ampleur jusqu'à présent modérée du fait d'une forte inertie des communautés végétales et animales. Dans les environnements extrêmes des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) se reproduisent des dizaines de millions de couples d'oiseaux de mer. Leur accès aux ressources alimentaires dépend très fortement de conditions océanographiques en rapide changement, et certaines de ces populations sont actuellement considérablement fragilisées. Combiné avec le transport, le changement climatique augmente aussi le risque d'invasions biologiques, comme celle de "l'herbe de la pampa", déjà envahissante en Catalogne espagnole et par endroits dans le sud de la France. Ce problème concerne aussi divers agents pathogènes et la dynamique des "maladies émergentes" est l'objet d'une recherche active.

En résumé les interactions entre changements d'usage et changements climatiques sont donc d'ores et déjà à l'œuvre en France comme ailleurs. Minimiser leur impact sur la biodiversité et les services écosystémiques réclame une action multiforme et vigoureuse.

6.2. Que pouvons-nous faire en France ? Dans quelles régions commencer ? Avec quels objectifs, quels programmes, quels calendriers ?

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

Quels modes d'action privilégier ? En se restreignant à la métropole, pour les trois types d'impacts sur la biodiversité (exploitation directe, changements d'utilisations des sols et "changements d'usage" comme le développement des transports, changements climatiques), les réponses sont diversifiées.

En ce qui concerne l'exploitation directe, intentionnelle ou accidentelle, la loi de protection de la Nature de 1976 - et l'action tenace du milieu associatif - ont donné un élan général pour la flore et la faune terrestres, et permis des remises à niveau significatives de la biodiversité. Pour la chasse, notamment celle au gibier d'eau, les directives européennes donnent un cadre à appliquer pleinement dans les années qui viennent. La surexploitation des ressources marines reste problématique et devra évoluer.

Pour ce qui concerne les impacts des changements d'usage sur la biodiversité, trois domaines semblent prioritaires : la gestion des espaces, l'agriculture, les transports. Un regard particulier doit être porté sur les milieux méditerranéens et de montagne, qui sont, notamment par comparaison avec d'autres milieux tempérés, des "points chauds" porteurs d'une forte biodiversité.

Les zones protégées en France sont l'objet de trop de remises en cause, dans un grignotage généralisé des espaces porteurs de biodiversité. La reformulation récente

de la loi sur les parcs nationaux peut permettre de créer des parcs plus aisément que précédemment, comme le projet en cours des Calanques près de Marseille. Mais, en même temps, cette reformulation abaisse les standards des parcs nationaux français en dessous des standards internationaux, avec des conséquences potentiellement néfastes pour ces parcs et en terme d'exemplarité. Des standards moins discutables et une homogénéisation des autres statuts de protection seraient probablement utiles.

Mais les zones non protégées sont l'objet d'enjeux au moins aussi importants, de deux ordres : la politique de l'espace et les activités dans ces espaces.

Les études d'impacts, projet d'aménagement par projet, pour utiles qu'elles soient, ne servent qu'à accompagner la diminution et la fragmentation des surfaces porteuses de biodiversité, sans contribuer à une vue d'ensemble. Les discussions sur les "trames vertes et bleues" dans le cadre du "Grenelle de l'environnement" répondent cependant au constat alarmant de fragmentation des milieux, surtout en plaine. Ces débats, s'ils sont poursuivis, poseront clairement le problème de l'emprise croissante de l'urbanisation diffuse et des infrastructures de transport en surface comme en "linéaire". Parallèlement, il serait souhaitable de redonner leur plein sens aux lois "montagne" et "littoral", pour éviter des tentatives incessantes de contournement.

Face à ces enjeux, le succès de la politique d'acquisitions de zones principalement côtières par le conservatoire du littoral et des espaces lacustres justifierait de créer un conservatoire équivalent pour l'intérieur des terres.

Pour ce qui est de l'utilisation des espaces, un réexamen des politiques agricoles et forestières semble inéluctable. L'érosion de la biodiversité (par exemple la raréfaction des oiseaux prédateurs des ravageurs et celle des pollinisateurs) risque d'engendrer un cercle vicieux d'intensification agricole. Le recours aux OGM, avec des risques potentiels mal connus de transferts "horizontaux" de gènes à des plantes sauvages et d'apparition rapide de formes de résistance chez les ravageurs, ne serait qu'une composante supplémentaire de cette intensification. L'aquaculture reste également à maîtriser en termes d'impacts sur la biodiversité.

La politique touristique mérite aussi réexamen, par exemple pour les stations de ski, la France disposant déjà du plus grand parc mondial. Le recours généralisé aux canons à neige pose des problèmes de consommation d'énergie, de ressources en eau, d'érosion des sols, avec en corollaire des impacts multiples sur la biodiversité.

Comme les changements climatiques sont porteurs de graves défis pour la biodiversité, en eux-mêmes et par leurs multiples interactions avec les changements d'usage, toutes les mesures de minimisation des rejets de CO₂ et d'atténuation des effets des changements climatiques auront des effets positifs sur la biodiversité. Le problème du transport routier s'inscrit dans ce volet.

Parallèlement à la lutte contre le changement climatique, la priorité semble donc être de repenser la gestion de l'espace en métropole. C'est une remise en cause profonde de notre mode de développement qui ne peut être acceptable que parallèlement à une quantification approfondie des services écosystémiques, pour redonner un sens aux mots "développement durable", fortement mis à mal en peu d'années.

Le débat démocratique sur les questions d'environnement ne fait donc que commencer : les sciences de la biodiversité sont prêtes à y apporter leur contribution.

6.3. Par quels indicateurs peut-on suivre la dynamique de la biodiversité et les effets des mesures prises pour la protéger en France ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

Les indicateurs rendent compte d'ensembles plus vastes, souvent mal connus, à partir d'un nombre limité d'entités facilement observables. Les progrès réalisés en ce domaine permettent aujourd'hui de porter un diagnostic sur l'état et le devenir de la biodiversité : outils de décision, les indicateurs de biodiversité aident les gestionnaires de l'environnement ; outils de concertation, ils facilitent une gestion collective des interactions entre nature et société. Ils permettent en effet de clarifier les enjeux, d'articuler les représentations, de coordonner les actions de conservation, de faire évoluer les comportements individuels.

Il s'ensuit que les indicateurs doivent "parler" à leurs utilisateurs, s'adapter à leurs représentations, faciliter l'émergence de dynamiques d'apprentissage ; ils doivent aussi les aider à anticiper les avènements possibles. Tout indicateur de biodiversité doit en fait satisfaire deux exigences quelque peu contradictoires : d'une part, rendre compte d'écosystèmes comprenant de nombreux groupes fonctionnels interconnectés, aux variations d'abondance fort différentes ; d'autre part, évaluer et suivre l'état de ces écosystèmes pour livrer une information aussi claire et concise que possible, au moyen d'indices faciles à interpréter. Un indicateur d'abondance comme le Red List Indice (RLI) peut ainsi décrire la dynamique de la biodiversité à partir de la variation des statuts – "vulnérable", "en danger", "en danger critique" – de la liste rouge de l'Union Mondiale pour la Nature.

Au début des années 2000, la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) identifiait 236 indicateurs de biodiversité et l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE), 382 indicateurs potentiels dont 280 utilisés⁴¹. Un effort de concision et d'harmonisation, le *SEBI – Streamlining European 2010 Biodiversity Indicators* –, a conduit à proposer une liste de 26 indicateurs de biodiversité pour l'Europe (Tableau). La stratégie nationale française s'est alignée sur cette liste en l'adaptant d'une part à la France métropolitaine et d'autre part à la France d'Outre Mer⁴²

⁴¹ Levrel H. 2007. *Quels indicateurs pour la biodiversité ?* Les cahiers de l'IFB.

⁴² Chevassus au Louis B. et al. 2009. *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique.* Centre d'Analyses stratégiques www.strategie.gouv.fr

Tableau . Les indicateurs de biodiversité du SEBI (Conseil de la Stratégie Paneuropéenne de la Diversité Biologique et Paysagère (2006) : la biodiversité en Europe, rationalisation des indicateurs européens de la biodiversité pour 2010, 10 p.)

Thèmes	Indicateurs génériques	Indicateurs proposés par le SEBI 2010
Etat et évolution des éléments constitutifs de la diversité biologique	Evolution de l'abondance et de la répartition de certaines espèces	1a. indice paneuropéen des oiseaux communs 1b. papillons européens
	Modification de l'état des espèces menacées et/ou protégées	2. indice liste rouge de l'UICN pour les espèces européennes 3. changement de statut des espèces d'intérêt européen
	Evolution de certains biomes, écosystèmes et habitats	4. évolution de l'étendue et de la composition de certains écosystèmes européens 5. changement de statut d'habitats d'intérêt européen
	Tendance de la diversité génétique des animaux domestiques	6. nombre et races par pays
	Etendue des aires protégées	7. tendances concernant la création d'aires protégées 8. sites classés selon les directives Habitats et Oiseaux
Menaces qui pèsent sur la diversité biologique	Dépôts d'azote	9. dépassement de la charge critique pour l'azote
	Populations et coûts des espèces exotiques envahissantes	10. nombre total d'espèces invasives en Europe
	Incidence du changement climatique sur la biodiversité	11. indicateurs d'abondance d'espèces
Intégrité de l'écosystème et biens et services qu'il fournit	Indice trophique marin	12. indice trophique marin des mers européennes
	Connectivité/fragmentation des écosystèmes	13. évolution des couverts et de la distribution des aires naturelles 14. statut et tendance de la fragmentation des rivières
	Qualité de l'eau et des écosystèmes aquatiques	15. matières organiques dans les eaux de transition, côtières et marines 16. qualité des eaux douces
Usages durables	Zones forestières, agricoles, de pêche et aquacoles gérées durablement	17. accroissement des stocks 18. bois mort 19. balance d'azote 20. systèmes agricoles gérés durablement 21. nombre de pêcheries sous le seuil de renouvellement biologique 22. qualité des eaux des effluents
	Empreinte écologique des pays européens	23. empreinte écologique des pays européens
Accès et partage des bénéfices	Pourcentage de brevets européens fondés sur les ressources génétiques	24. pourcentage de brevets européens fondés sur les ressources génétiques
Transfert et usages des ressources	Fonds pour la biodiversité	25. financement pour la biodiversité
Opinion publique	Prise de conscience publique et participation	26. nombre de visites dans les réserves naturelles

Parmi les indicateurs retenus par le SEBI, ceux concernant les populations d'oiseaux communs ont été particulièrement développés en France. Ils le sont à partir de la base de données STOC (Suivi temporel des oiseaux communs) alimentée par des informations telles que l'abondance, la distribution, la diversité, la fécondité, la survie des populations et des communautés d'oiseaux communs – informations obtenues grâce à un réseau d'observateurs répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain.

Ces oiseaux communs, environ 120 espèces, permettent d'évaluer efficacement le fonctionnement des écosystèmes : ils sont abondants, sensibles à l'état de santé des écosystèmes car situés à des niveaux élevés des chaînes alimentaires, faciles à interpréter car les causes de leur déclin sont relativement bien connues. De plus, la taille de leurs populations répercute très rapidement les changements environnementaux, qu'il est dès lors possible de suivre pratiquement d'une année à l'autre.

Les oiseaux communs sont également bien connus du grand public et leurs variations d'abondance représentent quelque chose de concret vis-à-vis des services qu'ils peuvent rendre comme prédateurs d'espèces nuisibles dans les champs, comme agents de dispersion des graines, sans oublier leur intérêt pour les naturalistes amateurs. D'après le Muséum National d'Histoire Naturelle, les populations d'oiseaux communs auraient régressé de 14% en France, entre 1989 et 2001. Sur 89 espèces prises en compte, 27 sont en déclin, 14 à surveiller, 40 stables et 8 en augmentation⁴³. Les oiseaux communs permettent encore d'évaluer l'impact du changement climatique sur la biodiversité à partir des glissements de leurs aires de distribution vers le nord et de l'avancement de leurs périodes de ponte. Les variations de leurs populations ont mis en évidence un déclin général des espèces spécialistes en Europe, particulièrement des "oiseaux agricoles". De même, l'index thermique des communautés d'oiseaux a montré que le nombre d'espèces méridionales a nettement augmenté sur l'ensemble du territoire français au cours des vingt dernières années⁴⁴.

Il faut souligner l'importance de l'exploration naturaliste dans l'élaboration d'indicateurs de biodiversité. Cette exploration s'appuie sur des réseaux d'observateurs bénévoles susceptibles d'apporter des données suffisamment nombreuses et représentatives des divers milieux naturels. Les plantes, les papillons et les oiseaux figurent parmi les groupes les plus utilisés à cet égard.

Cependant, l'élaboration d'indicateurs de biodiversité suppose un renouveau de la taxonomie traditionnelle, discipline délaissée depuis plusieurs années, indispensable pourtant à l'amélioration de nos connaissances sur la biodiversité des milieux vivants. Actuellement, les espèces disparaissent plus vite qu'on n'arrive à les identifier : au rythme de 10 000 espèces supplémentaires identifiées chaque année, on connaîtra cinq millions d'espèces en 2300, c'est-à-dire entre la moitié et le sixième des espèces supposées exister. De nouveaux instruments d'investigation et d'analyse s'avèrent donc nécessaires, voire de nouveaux concepts de classification reposant sur les relations phylogénétiques entre les espèces et sur les relations fonctionnelles de ces espèces avec leur milieu.

⁴³ <http://www.mnhn.fr/mnhn/crbpo/index.html>

⁴⁴ Devictor V., Julliard R., Couvet D. et Jiguet F. (2008), "Birds are tracking climate warming, but not fast enough", *Proc. R. Soc. B* (doi:10.1098/rspb.2008.0878) Published online.

Parmi ces instruments d'investigation et d'analyse, l'intérêt des indicateurs d'abondance et de distribution d'espèces sélectionnées (oiseaux communs, papillons communs, etc.) se confirme au fil des recherches. La prise en compte de divers niveaux trophiques peut aussi permettre de mieux apprécier la fonctionnalité des écosystèmes ou leur capacité de résilience⁴⁵. Et des "indicateurs d'interactions" peuvent permettre d'appréhender les interactions existant entre les dynamiques de la biodiversité et celles d'ordre socioéconomique⁴⁶. Des améliorations sont aussi à attendre du côté des "indicateurs de risque", afin de préciser le degré de vulnérabilité aux perturbations des populations, espèces ou écosystèmes, et le domaine de validité spatiale de tout indicateur utilisé pour suivre l'évolution de la biodiversité.

6.4. Quel est le rôle des espaces protégés (parcs nationaux, conservatoires botaniques, jardins zoologiques et botaniques, aires marines) dans la conservation de la biodiversité en France ?

Christian Dumas (Membre de l'Académie des sciences)

La curiosité, un certain goût pour collectionner des plantes et des animaux, et une perception plus ou moins bien définie de la nécessité de les protéger, sont à l'origine de la création des jardins botaniques et zoologiques. L'envie de collectionner des objets considérés comme étranges et relevant des trois règnes : animal, végétal, minéral, a probablement toujours existé. Cette pratique s'est peu à peu formalisée aux XVI^e et XVII^e siècles dans les cabinets de curiosités, ancêtres historiques des muséums. Lors des grandes explorations du XVI^e jusqu'au XIX^e siècle, la découverte d'animaux et de végétaux totalement inconnus a suscité intérêt et engouement pour leur identification, leur classification et enfin leur biologie. C'est l'âge d'or de la botanique et de la zoologie et l'époque de grands noms comme Linné au XVIII^e siècle, inventeur de la dénomination scientifique binomiale (un nom de genre suivi d'un nom d'espèce en latin pour caractériser tout organisme biologique) et un des premiers grands classificateurs, ou comme Darwin au XIX^e siècle, père de la théorie dite de l'évolution. C'est durant cette période que se sont développés la plupart des jardins botaniques dans le monde pour montrer au public les richesses rapportées par ces explorateurs.

L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN) a récemment inscrit sur une *Liste Rouge* : 47 677 espèces à fort risque d'extinction incluant 12% d'oiseaux, 21% de mammifères, 30% d'amphibiens, 27% de coraux et 35% de conifères et cycadales. La France fait partie des 10 pays hébergeant le plus d'espèces menacées. Selon l'*Index Planète Vivante*, 30 à 40% des espèces sauvages auraient subi un fort déclin depuis 1970, notamment celles des mangroves (écosystèmes des bords des lagunes tropicales riches en palétuviers) et celles formant des herbiers marins sièges d'une faune très riche et diversifiée. L'ensemble des études sur la biodiversité rapportées dans un article de 2010 publié par la revue *Nature*, conduisent à estimer les pertes économiques annuelles liées à la

⁴⁵ Couvet D., Jiguet F., Julliard R. et Levrel H. (2007), "Observatoires et indicateurs de biodiversité", Working Paper.

⁴⁶ Levrel H. (2007) op cit.

destruction de la biodiversité à des valeurs considérables qui dépassent l'entendement : de 1,35 à 3,1 trillions de dollars ! Les chiffres concernant la destruction de la forêt tropicale, de l'ordre de 6 millions d'hectares chaque année, sont peut-être plus parlants mais tout aussi inquiétants ! Nous n'avons pas de telles données pour la biodiversité à l'échelle de notre territoire mais les échelles de valeurs doivent être du même ordre.

A quoi servent les jardins et conservatoires botaniques en France ? Le plus ancien jardin botanique français a été créé en 1593, à Montpellier, suivi de nombreux autres. L'organisation internationale des jardins botaniques, *Botanic Gardens Conservation International* (BGCI), fondée en 1987, s'intéresse aux problèmes de conservation de plantes sauvages et compte plus de 500 jardins dans le monde répartis dans plus de 100 pays. En France, il y a une ambiguïté liée à la création, en 1975, des conservatoires botaniques nationaux, aujourd'hui au nombre de 12, incluant ceux des territoires d'outre-mer ; ils dépendent pour certains du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, des collectivités territoriales, ou ont, pour d'autres, de statuts variés comme celui de syndicats mixtes. Ils sont, depuis 2000, regroupés au sein d'une Fédération. Leur rôle est inscrit dans leur nom : conservatoires . Ce sont des organismes autonomes chargés, en particulier, de dresser l'inventaire de la flore de leur région, de développer des stratégies pour protéger et conserver les espèces en danger - espèces classées suivant le degré estimé de risque de disparition -, d'informer et d'éduquer le public, et bien entendu de fournir une expertise aux établissements publics et autres collectivités territoriales. Ceci distingue, en France, les conservatoires des jardins botaniques. Ces derniers, selon le BGCI, devraient avoir trois missions : éducation à la biodiversité, conservation et recherche. En France, pratiquement tous les jardins, sauf ceux du Muséum d'Histoire Naturelle, de Montpellier, Strasbourg et Grenoble avec son jardin alpin du Lautaret, sont municipaux avec comme corollaire l'absence presque totale de lien avec l'université et la recherche, à la différence de jardins de référence au niveau mondial comme ceux de Kew (près de Londres), Genève ou Berlin en Europe, ou encore ceux de New York et Saint-Louis aux Etats-Unis. Ces derniers ont leurs chercheurs, leurs laboratoires et leurs publications scientifiques. Les conservatoires botaniques nationaux auraient pu pallier cette lacune propre aux jardins municipaux français. C'est, en partie seulement, réalisé : la multiplicité des structures, des gouvernances, des missions plus ou moins bien définies, des moyens limités en personnels scientifiques qualifiés, et l'absence de structures de recherche, entretiennent un certain flou d'ensemble et ne contribuent pas à l'efficacité de la botanique française. Le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN), autre établissement public et autre gouvernance, avec des herbiers d'une richesse incommensurable, et du personnel très qualifié, a aussi un rôle à jouer dans la conservation.

En conclusion, malgré beaucoup de compétences et de passion chez les botanistes professionnels qui travaillent dans les jardins ou les conservatoires botaniques français, et les amateurs qui leur sont associés, le bilan global est assez modeste comparé aux travaux des grands jardins mondiaux qui servent de référence. Les conservatoires, et *pro parte* certains jardins, ont néanmoins une action assez efficace au niveau du référencement des espèces ou des zones à protéger ou à conserver. Après des politiques, les ONG jouent également un rôle particulier dans le domaine de la conservation et de la protection de la biodiversité, comme on l'a vu dans un récent Grenelle de l'environnement. Mais il y a une différence entre l'approche

scientifique d'un conservatoire ou d'une société botanique composée de spécialistes et le militantisme de ces ONG dont la compétence scientifique n'est pas toujours avérée. On le constate surtout dans le pragmatisme de leurs approches et dans les solutions, quelquefois extrêmes, qu'elles proposent.

6.5. Les problèmes se posent-ils avec la même acuité en France métropolitaine et outre-mer ?

Jean-Dominique Lebreton (Membre de l'Académie des sciences)

L'érosion de la biodiversité en France ne concerne pas que la métropole. Outre-mer, on peut distinguer deux grands domaines : a) les zones intertropicales comme la Guyane ou la Nouvelle-Calédonie, b) les Terres Australes et Antarctiques.

Dans les deux cas, il s'agit souvent d'îles dont les flores et faunes sont particulièrement sensibles, car elles ont évolué de façon isolée du reste du monde vivant, c'est-à-dire avec un fort développement d'adaptations locales, souvent en l'absence de prédateurs, et une exposition restreinte à des agents pathogènes. Parmi les oiseaux, la perte de la capacité à voler, mais aussi l'absence de toute agressivité, est ainsi fréquente chez les espèces insulaires, et les rend fortement vulnérables.

Dans les zones intertropicales, la lutte contre l'érosion de la biodiversité est à la fois nécessaire en elle-même, puisque la France y est dépositaire d'une part importante de la biodiversité planétaire, mais aussi par sa valeur d'exemplarité vis-à-vis des pays du Sud. La sauvegarde des grands monuments s'appuie nécessairement sur une certaine richesse économique : les pays développés ont eu historiquement un rôle moteur. De la même façon, la France ne peut guère être plus exigeante en termes de biodiversité avec un pays du Sud qu'avec elle-même.

A ce double égard, la mise en œuvre d'une législation de la chasse en Guyane est une priorité. La gestion de l'espace et des usages est fondamentale à long terme. La création du Parc National de Guyane, avec un cœur de 2 millions d'hectares, est heureusement venue compenser la création de la grande retenue de Petit-Saut, création qui n'a certainement pas poussé pour autant les autres pays de la zone amazonienne à la sagesse en ce qui concerne la déforestation. Mais en Guyane, le problème de l'orpaillage (collecte d'or) et des troubles et pollutions qu'il induit, reste à traiter.

Dans les îles, par exemple à La Réunion, les problèmes d'espèces invasives sont aigus. Les tentatives de lutte biologique, comme celle contre la "vigne marronne", une ronce asiatique introduite et envahissante qui appauvrit fortement la végétation indigène aux basses altitudes, sont encourageantes, mais comportent toujours le risque d'effets secondaires imprévus.

Enfin, la France a une responsabilité particulière en ce qui concerne les récifs coralliens dans les archipels du Pacifique puisque ces récifs abritent une diversité en nombres d'espèces et formes de vies étonnantes : ce sont chez des poissons coralliens vivant en groupe qu'une femelle change de sexe si le mâle du groupe disparaît... Le blanchiment des coraux, dû à la fois à l'augmentation d'acidité des

eaux induite par la croissance de la teneur en CO₂ de l'atmosphère et à l'augmentation de température, est porteur à terme de menaces considérables d'appauvrissement.

Dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), les efforts de destruction des espèces allochtones, dont les rats, ont déjà permis des réinstallations de colonies d'oiseaux de mer sur certains îlots. Sur l'île d'Amsterdam, 58 km², une forte réduction du nombre de bovins introduits et leur parcage ont permis, en limitant le dérangement sur les nids, de sauver l'albatros d'Amsterdam. Cet oiseau de trois mètres d'envergure, découvert en 1982, ne niche que sur cette île et ne compte que quelques dizaines de couples. Mais les solutions trop évidentes, comme l'introduction à Kerguelen de chats pour lutter contre les rats, ont presque toujours dans ces écosystèmes simplifiés des effets imprévus, aucune co-évolution n'ayant adapté les différents partenaires les uns aux autres. Le transport et l'introduction de végétaux et d'animaux contribuent donc à appauvrir et homogénéiser la biodiversité même dans des environnements extrêmes et dans les endroits les plus reculés de la planète.

Les changements climatiques commencent à faire sentir leurs effets, notamment en perturbant les distances d'approvisionnement en mer d'oiseaux et de mammifères marins comme l'éléphant de mer, et donc en modifiant leur reproduction et leur mortalité.

A côté de causes locales d'appauvrissement de la biodiversité, les exemples des récifs coralliens et des oiseaux de mer des TAAF montrent bien le rôle des phénomènes à l'échelle planétaire. Face à l'érosion de la biodiversité, la lutte contre l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂, contre les changements climatiques, et contre les transports d'organismes vivants, sont donc tout aussi importants outre-mer qu'en métropole.

6.6. Qu'est-ce que la trame verte et la trame bleue ?

Henri Décamps (Membre de l'Académie des sciences)

La fragmentation des habitats des espèces végétales et animales est une cause majeure de la diminution de la biodiversité. La trame verte et bleue vise à combattre cette fragmentation par un aménagement du territoire en termes de réseaux écologiques. A cette fin, le Grenelle de l'Environnement a chargé un comité opérationnel de définir par quelles voies, par quels moyens et dans quelles conditions mettre en œuvre une trame verte et bleue en France : verte comme les haies, bords de routes et bosquets ; bleue comme les cours d'eau, mares et zones humides. Ces divers éléments font partie des "matrices paysagères" rurales et urbaines.

L'enjeu majeur est d'établir des continuités – sous forme de corridors ou de pas japonais – permettant aux espèces de circuler entre habitats favorables plus ou moins éloignés. Ce maillage de l'espace implique trois niveaux territoriaux : les communes, les régions et l'Etat. Il s'appuie sur un "schéma régional de cohérence écologique", basé sur une cartographie au 1 : 5000^{ème}, affinée au niveau local, par exemple dans le cadre des plans locaux d'urbanisme et des projets d'infrastructure.

Une dizaine d'expériences "pilotes" en France et en Europe ont été réalisées en vue d'établir ces schémas régionaux de cohérence écologique à l'horizon 2012. Un gros travail méthodologique s'avère indispensable et, dans son rapport du 14 mars 2008, le comité opérationnel soulignait la nécessité de s'appuyer sur les avancées scientifiques en matière de biologie de la conservation.

En fait, l'idée de trame verte et bleue tire son origine de notions développées en biologie de la conservation et en écologie du paysage dans les années 1980. Parmi ces notions figurent celles de fragmentation, de connectivité, de corridors écologiques, ainsi que la théorie des métapopulations. Il est utile de rappeler comment ces notions sont apparues pour bien comprendre l'intérêt et les limites de la trame verte et bleue.

En 1984, dans un ouvrage intitulé "la forêt fragmentée", le biologiste Larry D. Harris attirait l'attention sur les conséquences de la fragmentation du couvert forestier en Grande Bretagne⁴⁷. Commencée avec les débuts de l'agriculture il y a environ 5 000 ans, cette fragmentation a largement contribué à la disparition d'espèces telles que l'ours brun, le sanglier, le loup, le coq de bruyère, l'autour. En de nombreuses régions, ce phénomène de fragmentation a transformé d'anciennes régions forestières en zones de bosquets disséminés dans des zones cultivées. Au-delà des forêts, il a aussi affecté des prairies et des zones humides, transformant des aires relativement vastes d'habitats naturels en ensembles d'îlots de plus en plus petits et isolés les uns des autres. Il a aussi affecté de nombreux cours d'eau sur tous les continents, à la suite de la construction de barrages plus ou moins infranchissables par les poissons migrateurs.

La fragmentation des habitats naturels conduit à une subdivision des populations : chaque fragment abrite une population locale formée d'individus qui interagissent plus étroitement entre eux qu'avec les individus des populations des autres fragments. A la limite, certaines populations locales peuvent s'isoler et évoluer indépendamment des autres populations locales, par exemple lorsque l'espèce en question se déplace difficilement. Plus les fragments sont petits, isolés et faiblement peuplés, plus leurs populations sont susceptibles de disparaître sous l'effet d'aléas démographiques ou environnementaux, un hiver rigoureux anéantissant par exemple les populations en certains fragments.

Deux modèles expliquent la survie des populations subdivisées. Dans le premier modèle, "continent-île", une population "source", suffisamment importante, renfloue les autres populations "puits", plus fragiles, par migration d'individus passant de la source aux puits. Dans un second modèle, "métapopulations", toute population locale peut alternativement se comporter en "source" ou en "puits", et l'ensemble survivre sous l'effet de processus de natalité et de mortalité combinés à des processus de migration entre fragments locaux. Une métapopulation apparaît ainsi comme une population de populations locales qui s'éteignent et s'allument indépendamment les unes des autres, comme clignotent certaines guirlandes électriques dans les vitrines de Noël. Ce modèle théorique, proposé par l'Américain Robert Levins en 1969, a été brillamment analysé par le Finlandais Ilkka Hanski à propos d'un ensemble de populations de méliée du plantain, une espèce de papillon. D'autres dynamiques de

⁴⁷ Harris L.D., *The fragmented forest*. The University of Chicago Press, 1984.

type métapopulation ont été ensuite décrites pour bien d'autres espèces animales et végétales⁴⁸.

La persistance d'une métapopulation suppose donc que des individus puissent migrer entre des fragments d'habitats plus ou moins isolés les uns des autres. Or, ces migrations sont favorisées par la présence de corridors écologiques : zones riveraines le long des cours d'eau, réseaux de haies dans les bocages, alignements d'arbres... Les passerelles construites au-dessus des autoroutes ou les tunnels au-dessous, font aussi office de corridors écologiques, de même que certaines structures linéaires beaucoup plus étendues pour les déplacements des lynx par exemple. Bien entendu, les dimensions des corridors varient selon les espèces considérées : insectes, batraciens, petits rongeurs, oiseaux, grands mammifères sauvages.

La présence de corridors renforce la connectivité d'un paysage, c'est-à-dire son aptitude, pour une espèce donnée, à faciliter les déplacements entre les fragments d'un habitat dispersé. Ainsi, dans la campagne canadienne des environs de Toronto, les haies reliant les bosquets isolés permettent-elles aux campagnols à pattes blanches de recoloniser les bosquets les plus exposés aux rigueurs de l'hiver. On doit cependant s'interroger sur la probabilité pour un individu de passer d'un bosquet à l'autre : cet individu trouvera-t-il le corridor ? Choisira-t-il de s'y engager ? Réussira-t-il à le parcourir ? Ne sera-t-il pas la proie d'espèces vivant dans les espaces agricoles environnants ?

Car si les corridors ont des avantages, ils ont aussi des inconvénients. Les réseaux de haies, les zones boisées riveraines le long des cours d'eau, les bordures de route et autres structures linéaires permettent mille cheminements dans un habitat fragmenté. Mais ces mêmes structures peuvent se révéler trop étroites, trop interrompues ou trop longues, et donc mettre en péril les espèces qui les utilisent. Elles peuvent aussi faciliter la dissémination d'espèces envahissantes, de maladies, de parasites. On a ainsi démontré que si la création de corridors boisés avait rétabli les flux de gènes entre des populations écossaises et anglaises d'écureuils roux, elle avait aussi propagé un virus lourd de menace pour ces mêmes populations.

La mise en connexion d'habitats fragmentés demande donc réflexion et son succès dépend d'une connaissance approfondie des comportements, des préférences et des traits d'histoire de vie des espèces à protéger, ainsi que de la dynamique de leurs habitats. L'élaboration d'une trame verte et bleue apparaît comme une démarche prometteuse dans l'aménagement des territoires. Mais cette démarche implique tout un processus de concertation, de mise en cohérence des politiques urbaines, agricoles et écologiques. Elle implique aussi des compensations économiques, des modalités d'application... Elle doit pouvoir s'appuyer sur de nouvelles connaissances tant en ce qui concerne les sciences de la nature que les sciences humaines, sociales et comportementales.

⁴⁸ Hanski I. (2001) *Metapopulation ecology*. Oxford University Press.