

DIVERSITÉ BIOLOGIQUE – POPULATIONS – ÉCOSYSTÈMES ET ÉVOLUTION

Michel BOULETTEAU
Président

Stéphane Aulagnier
Jérôme Casas
Christiane Denys
Jean-Pierre Feral
Jean-Pierre Gattuso
Nicole Gautier
Janine Gibert
Joël Guiot
François Houllier
Jacob Koella
Henri Milhomme
Patrick Monfort
Brigitte Moreteau
Gilles Pinay
Bernard Riera
Jacqueline Shykoff
Marc Thery
Michel Veuille
Marc Vianey-Liaud
Françoise Weiss-Bertay

Cette synthèse présente les principales questions émergentes dans le domaine de la section 30. Les identifier est essentiel pour organiser les nouveaux espaces interdisciplinaires, créer des structures et réseaux de recherche, prévoir des plateaux techniques. L'expression « biodiversité » est un terme simple pour désigner un champ scientifique très large couvrant des échelles biologiques, spatiales et temporelles très différentes. Ces échelles s'étendent du génome à la biosphère, en passant par l'individu, l'espèce, la population, le peuplement et les écosystèmes. Elles englobent aussi bien la dynamique explosive des populations invasives ou des nouvelles bactéries pathogènes que l'évolution spécifique. Elles vont des phénomènes élémentaires de coopération entre les gènes, aux interactions entre les partenaires d'une symbiose ou d'une association parasitaire, et jusqu'aux interactions complexes au sein des peuplements et des écosystèmes. Ces recherches émanent des sciences de la vie, mais ouvrent sur les sciences de l'univers, les sciences de l'homme et de la société, l'ingénierie et la chimie.

Nous ne reprendrons pas ici la liste de toutes ces questions qui sont au centre du champ scientifique et qui sont bien présentées par ailleurs, en particulier dans le Projet d'Établissement du CNRS (février 2002) et le Contrat d'Action Pluriannuel CNRS-État (mars 2002). Ce rapport se concentrera sur quelques faits

saillants qui induisent aujourd'hui des besoins essentiels pour la recherche :

– besoin d'une recherche pluri- et interdisciplinaire : c'est en développant des équipes, des plate-formes techniques, des zones atelier et des enseignements pluridisciplinaires, qu'on pourra réellement faire interagir les disciplines et répondre aux grandes questions actuelles ;

– besoin d'une recherche intégrée : en débouchant sur la compréhension de mécanismes fondamentaux, ces recherches répondent aux attentes sociétales et sont la clé des innovations, processus et expertises qui devront être valorisés soit en interne, soit en partenariat.

1 – LA NOUVELLE LECTURE MOLÉCULAIRE DE LA DIVERSITÉ BIOLOGIQUE

La biologie moléculaire a apporté une contribution majeure à notre connaissance de la biodiversité sous trois aspects : sa description, la compréhension de ses mécanismes d'évolution, l'interprétation de ses adaptations.

1.1 DESCRIPTION MOLÉCULAIRE DE LA DIVERSITÉ DU VIVANT

Les méthodes descriptives ont fait plus que révéler la généalogie du vivant et le diviser en *Archaea*, *Eubacteria* et Eucaryotes. Elles consacrent l'importance des microorganismes. La possibilité de révéler directement l'ADN dans les écosystèmes nous affranchit de l'étude des seules bactéries cultivables au laboratoire. À peine 1 % des bactéries l'étaient. Les 99 % restants nous sont connus par des méthodes moléculaires, en passe de devenir des techniques de routine en écologie microbienne du sol et des océans.

Mais nous sommes encore loin de donner un sens à cette diversité : que devient la notion d'espèce, quand les deux génomes séquencés d'*Escherichia coli* diffèrent par 1387 gènes ? Qu'en est-il quand la génomique comparative révèle des transferts de gènes incessants entre les endosymbiontes ou endoparasites et leurs hôtes ? Décrire l'histoire du vivant, c'est aussi retracer l'histoire des mécanismes de développement menant aux organismes actuels. L'*évo-dévo* (évolution du développement) est devenue une branche majeure de la biologie des organismes, révélant les bifurcations de l'évolution telle qu'elle s'est produite chez les ancêtres des métazoaires à symétrie bilatérale dont nous sommes issus. Ces recherches bénéficient de nouvelles techniques d'analyse permettant d'étudier le développement d'espèces non-modèles (méthodes de *knock-out*, surexpression, etc.).

1.2 MÉCANISMES D'ÉVOLUTION DU GÉNOME

La théorie « neutraliste » des années 1970 disait que le polymorphisme moléculaire se constituait pendant des milliers de générations et pourrait nous renseigner sur le passé des espèces. Une mise à jour théorique permettant d'interpréter l'immense réserve d'information du polymorphisme de l'ADN est la théorie de la coalescence, imaginée indépendamment par trois auteurs, Kingman, Hudson et Tajima, en 1982-1983. Son application exige des généticiens de nouvelles compétences en mathématiques et en calcul numérique. Elle prédit les perturbations de distribution des polymorphismes neutres sous l'effet conjoint des mutations délétères (*background selection*) de la fixation récente d'allèles avantageux (balayage sélectif), et de la dynamique des populations (*bottlenecks*, structuration, expansion). Une nouvelle discipline, la génomique des populations, étudie la signature moléculaire de l'histoire évolutive. Ces recherches seront déterminantes demain en génétique humaine

pour caractériser les loci intervenant dans les maladies multifactorielles, et en biologie de la conservation pour suivre les espèces menacées ou invasives.

1.3 GÉNOME ET ÉVOLUTION DU PHÉNOTYPE

La biologie évolutive repose sur la distinction entre les causes proches (les mécanismes de développement qui produisent le phénotype d'un individu) et les causes ultimes (l'origine évolutive de ce phénotype). Aucune théorie n'existe encore à leur jonction pour expliquer l'évolution du phénotype, mais nous disposons peut-être enfin de moyens d'investigation dans ce domaine. La cartographie génétique assistée par marqueur (étude des « QTL »), d'abord développée chez les organismes faisant l'objet de recherches finalisées, permet de caractériser les gènes-clés déterminant un trait. L'installation de plates-formes protéomiques devrait maintenant permettre aux évolutionnistes d'étudier les normes de réaction, les traits d'histoire de vie et le vieillissement dans des systèmes modèles de biologie des populations. La France est en retard dans ce domaine où ces approches se développent et sont à encourager.

2 – LES SYSTÈMES MICROBIENS

Les recherches récentes sur la biologie et la génétique des micro-organismes amènent à réévaluer leur rôle dans l'organisation, le fonctionnement et l'évolution de la plupart des écosystèmes. Trois phénomènes nouveaux motivent ces recherches :

Le maintien, l'émergence ou la ré-émergence de pathogènes remettent en cause l'idée

que l'homme pouvait les contenir. Les exemples sont nombreux et les conséquences graves : épidémies bactériennes et virales, contaminations alimentaires, maladies nosocomiales, zoonoses, épizooties, phytobactérioses, polyrésistances aux antibiotiques, etc.

Les modifications des écosystèmes aquatiques et terrestres par les micro-organismes. Il s'agit d'espèces invasives, d'efflorescences de micro-organismes photosynthétiques toxiques, ou de rejets de pathogènes dans l'eau. Le sol est aussi un réservoir potentiel qui participe à la propagation des micro-organismes quand les conditions sont favorables. La plasticité génomique est associée à l'importance des transferts horizontaux et à l'émergence de clones hypermutateurs et de populations adaptées.

La biodiversité insoupçonnée de la microflore du sol et des océans représente un grand potentiel de valorisation, par exemple pour la production d'antibiotiques, la culture de cyanobactéries unicellulaires fixatrices d'azote ou de bactéries photosynthétiques anoxygéniques pour le développement durable. De même, les feuilles hébergent une microflore dont certains membres conditionnent la biologie de la plante et la qualité des denrées végétales qu'il faut conserver ou améliorer.

Le fonctionnement des systèmes microbiens doit impérativement être enseigné et étudié de manière intégrée pour mieux modéliser le fonctionnement des écosystèmes, prédire les risques de contamination et répondre aux préoccupations collectives sur les relations entre l'environnement et la santé.

3 – L'ÉVOLUTION ET LA SANTÉ

L'essor de la bactériologie et de la génomique s'accompagne paradoxalement de la montée du problème de l'évolution des souches pathogènes. C'est un enjeu nouveau qui a certes des conséquences cruciales pour la santé, mais

qui s'avère aussi d'un grand intérêt en recherche fondamentale, car les microorganismes sont pourvus d'un dynamisme évolutif incomparable. La collaboration entre médecins et biologistes des populations est indispensable, tant pour intégrer la dimension évolutive à l'approche médicale que pour tester des hypothèses de recherche de grand intérêt sur des systèmes expérimentaux précieux.

Ces recherches nécessairement interdisciplinaires sont prometteuses pour traiter de l'évolution de la résistance aux médicaments, de la virulence et de l'immunité face aux parasitoses. De même, l'interprétation des symptômes pathologiques en tant que réponses à des pressions de sélection naturelle devrait permettre de les traiter plus efficacement. Certains symptômes ont en effet évolué comme des mécanismes de défense (i.e. les diarrhées et vomissements qui permettent d'éliminer toxines et parasites, la fièvre qui est un sous-produit accidentel de la défense immunitaire) qu'il ne faut pas atténuer sous peine d'accroître la gravité de l'infection. La prise en compte des conflits d'intérêt, par exemple entre mâle et femelle ou entre mère et enfant, permettrait de mieux comprendre les anomalies de la reproduction et de la santé. L'application à la médecine des hypothèses de compromis (*trade-off*) qui constituent la base de la théorie de l'évolution peut aussi contribuer à gérer plus efficacement certains problèmes de santé comme la sénescence ou le paludisme. Le projet « génome humain » qui multiplie l'identification de fonctions génétiques devrait mettre à jour de nombreux compromis qui seront à interpréter avec les concepts de la biologie évolutive.

4 – BIODIVERSITÉ ET CHANGEMENTS GLOBAUX

Les changements globaux qui affectent l'environnement combinent les effets des fluctuations climatiques naturelles et ceux de l'activité humaine. L'augmentation des gaz à effet de serre, des aérosols, des polluants, et

la destruction ou la fragmentation des milieux naturels par l'anthropisation croissante ont des effets directs sur le fonctionnement de tous les écosystèmes terrestres et aquatiques. Ces modifications d'origine naturelle mais surtout artificielle ont de graves conséquences sur la diversité génétique, spécifique, et fonctionnelle des organismes qui conditionnent le fonctionnement de la biosphère. Les enjeux sont là aussi considérables. La perte de biodiversité peut non seulement altérer le fonctionnement des communautés et des écosystèmes, mais aussi représenter la perte d'un héritage irremplaçable potentiellement utile à la santé et au développement durable.

Une question majeure est celle des liens entre diversité spécifique et fonctionnement des écosystèmes, qui doit fournir les connaissances nécessaires à l'évaluation des impacts sociaux et économiques sur le long terme. Les recherches sur le terrain et au laboratoire constituent la base incontournable de ces travaux. Des systèmes expérimentaux de grande envergure, des communautés reproduites en « écotrons » permettent de préciser les relations entre la diversité spécifique et la productivité des écosystèmes. Enfin la modélisation des écosystèmes actuels et passés doit accompagner les recherches en systématique, génétique, écologie, biologie des populations, biologie évolutive, écophysiologie, éthologie et écologie du comportement, et conditionne l'élaboration des mesures de protection des milieux et des espèces menacés. La bioprospection doit mieux tirer parti des multiples processus adaptatifs développés par les plantes et les animaux en conditions naturelles. Pour leur extrême biodiversité ou leur fort taux d'endémisme et d'espèces menacées, les forêts tropicales de Guyane et des départements, territoires et collectivités d'outre-mer constituent en ce sens des sites ateliers prioritaires.

Il apparaît primordial de définir des méthodes qui permettront d'évaluer les conséquences des changements globaux sur les processus biologiques à différentes échelles d'espace et de temps. Les modèles du fonctionnement des écosystèmes doivent notamment inclure les changements de l'uti-

lisation des terres, les rétroactions végétation/atmosphère/sol, le rôle des organismes marins dans les échanges gazeux à l'interface océan-atmosphère, les effets du climat sur les cycles biogéochimiques et les processus de rétroaction. À l'échelle des espèces, des populations et des peuplements, il faut également développer l'étude des relations causales entre les perturbations naturelles et anthropiques, les modifications des paramètres physiques et trophiques, et la diversité spécifique. Cela doit permettre de comprendre et de prévoir les réponses des organismes aux modifications de l'environnement, non seulement par les approches d'écophysiologie expérimentale, mais aussi en prenant en compte les processus de mutation et d'adaptation du génome. Les techniques analytiques et les capteurs qui mesurent les paramètres diagnostics de l'environnement doivent se développer sur le long terme avec la surveillance de l'océan, de l'atmosphère, des surfaces continentales et de la biosphère.

5 – PERTURBATIONS ET RISQUES ÉCOLOGIQUES

C'est au cours des années 80-90 que l'on a réalisé que l'incidence du développement de l'humanité sur l'ensemble des écosystèmes ne pouvait plus être ignorée. L'environnement et le développement durable sont devenus des enjeux sociaux et politiques majeurs. Le développement des recherches est nécessaire à l'appréciation et à la prévision des conséquences de l'évolution du climat et de l'érosion de la biodiversité, à l'aide à la gestion concertée des eaux et des sols, c'est à dire à leur préservation qualitative et quantitative à long terme, ainsi qu'à la gestion de la mer et des zones littorales qui constituent des zones économiques très dynamiques. Quelques exemples des risques écologiques :

L'augmentation récente du nombre d'espèces marines cultivées et le passage à des

élevages intensifs font de l'aquaculture marine un pollueur potentiel. Si certaines conséquences comme l'eutrophisation ou l'enrichissement des sédiments sont relativement connues, d'autres ne sont pas évaluées ni même prises en compte malgré leur impact prévisible sur le milieu et sur la santé humaine. Il s'agit par exemple des effets de l'augmentation des flagellés et des cyanobactéries, des rejets massifs d'antibiotiques ou d'autres produits, et de la dispersion dans les océans d'individus sélectionnés voire transformés.

La transgénèse est désormais utilisée de façon privilégiée pour modifier les lignées domestiques, voire pour développer de nouveaux critères de domestication des espèces : résistance aux pathogènes ou aux milieux extrêmes, propriétés agronomiques ou zootechniques, qui répondent aux impératifs sociaux actuels (commerciaux, médicaux, ou de qualité). L'introduction d'espèces génétiquement modifiées peut cependant perturber les écosystèmes naturels et nuire à l'homme par ses effets toxiques potentiels et par ses conséquences sur l'environnement. Les enjeux économiques énormes et les financements privés incitent à créer de nouveaux OGM. Mais rares sont les sources financières pour explorer les conséquences de leur dissémination dans l'environnement. Un institut public comme le CNRS dispose de toutes les compétences nécessaires pour étudier ces conséquences dans l'intérêt de l'ensemble de la société.

Les introductions d'espèces animales et végétales sont la seconde cause d'appauvrissement de la biodiversité après la destruction des habitats. Elles induisent de profondes modifications de la dynamique des communautés et du fonctionnement des écosystèmes. Elles peuvent entraîner de nombreuses nuisances pour l'Homme et causer des préjudices économiques considérables. Les enjeux scientifiques concernent les mécanismes qui sous-tendent les phénomènes invasifs (profil et stratégie biodémographique de l'envahisseur, compétition interspécifique), le développement de méthodes et de modèles de prédiction et de gestion des phénomènes invasifs.

6 – CONCLUSION

En conclusion, il est clair que les recherches dans ce domaine constituent un enjeu scientifique majeur, aussi bien en Sciences de la Vie que dans les domaines des Sciences de l'Environnement et des Sciences de l'Homme. En effet, l'Évolution biologique est maintenant reconnue comme une des premières questions que se pose l'Humanité. Comprendre comment la vie est apparue, évoluée, s'organise, s'adapte, et colonise tous les milieux, est une question centrale qui fait appel à de nombreux champs disciplinaires et techno-

logiques qu'elle fertilise à son tour et même contribue à justifier. Par ailleurs, la prise de conscience de l'importance des enjeux sociaux en matière d'Environnement rend incontournable l'étude fonctionnelle approfondie des assemblages biologiques actuels et passés, et de leurs interactions avec les paramètres physico-chimiques et les structurations des milieux. Enfin l'Homme, qu'on le considère comme organisme, comme société, ou comme exploitant et gestionnaire de la planète, est confronté à toutes les échelles à des questions de complexité croissante, et se trouve de fait au centre d'un débat qui est devenu vital pour lui, et qu'il ne peut plus ignorer.

ANNEXE

LISTE DES ACRONYMES

ADN	Acide Désoxyribonucléique
OGM	Organismes génétiquement modifiés
QTL	Quantitative Traits Loci