

# LA BIODIVERSITE : UN NOUVEAU REGARD SUR LA DIVERSITE DU VIVANT

**Bernard Chevassus–au–Louis**

*Directeur de recherches à L'INRA*

**LECON INAUGURALE DU GROUPE ESA,**

**ANGERS, 27 septembre 2006**

<b>I. L'immensité : la nouvelle frontière. ....</b>	<b>1</b>
<i>I.1. Un inventaire très partiel.....</i>	<i>2</i>
<i>I.2. Le défi de la classification « naturelle ».....</i>	<i>2</i>
<i>I.3. La « matière noire » de la biodiversité : les microorganismes.....</i>	<i>3</i>
<b>II. La complexité : les multiples niveaux d'organisation. ....</b>	<b>4</b>
<i>II.1. La diversité intra spécifique.....</i>	<i>4</i>
<i>II.2. La diversité supra-spécifique. ....</i>	<i>7</i>
<i>II.3. Le défi d'une vision intégrée.....</i>	<i>10</i>
<b>III. L'utilité : des fonctions méconnues.....</b>	<b>11</b>
<i>III.1. Les arguments « classiques ».....</i>	<i>11</i>
<i>III.2. Biodiversité et innovation : la biomimétique.....</i>	<i>12</i>
<i>III.3. Biodiversité et services écologiques.....</i>	<i>13</i>
<i>III.4. Biodiversité et vigilance : les bioindicateurs.....</i>	<i>14</i>
<b>IV. La stabilité : une dynamique permanente.....</b>	<b>15</b>
<b>V. La fragilité : la "crise de la biodiversité".....</b>	<b>17</b>
<i>III-1. Les extinctions passées et actuelles. ....</i>	<i>18</i>
<i>III.2. Les causes de l'érosion de la biodiversité. ....</i>	<i>20</i>
<i>III.3. Les perspectives du changement climatique. ....</i>	<i>23</i>
<b>Conclusion.....</b>	<b>26</b>

*Le terme "biodiversité", aujourd'hui si courant, n'a pourtant été introduit qu'en 1986 par l'entomologiste américain Edward O. Wilson<sup>1</sup>, en substitution de la notion de "diversité biologique" utilisée jusqu'alors. Le succès de ce néologisme tient à notre avis au fait qu'il a symbolisé l'émergence et la convergence de nouvelles visions de cette diversité du vivant, aboutissant globalement à proposer un « nouveau regard » sur cette diversité. Ce nouveau regard met en lumière cinq aspects principaux :*

- *son immensité, insoupçonnée jusqu'alors ;*
- *sa complexité, liée à ses différents niveaux d'organisation et à leurs interactions ;*
- *sa stabilité, qui ne doit pas être conçue comme un équilibre statique mais s'inscrit dans une dynamique permanente ;*
- *son utilité, à travers l'ensemble des « services écologiques » qu'elle apporte ;*
- *sa fragilité enfin, avec la prise de conscience des impacts humains, souvent irréversibles, sur des ressources que l'on croyait, parce que vivantes, inépuisables.*

*C'est autour de ces cinq notions que nous allons organiser cet exposé.*

## **I. L'immensité : la nouvelle frontière.**

Le recensement systématique des espèces animales commence pour l'essentiel au 18<sup>e</sup> siècle. La date de 1758, publication par Linné de la dixième édition de *Systema Naturae*<sup>2</sup>, est souvent considérée comme le point de départ des inventaires d'aujourd'hui, basés sur des principes de nomenclature universellement acceptés : Linné y décrit 6 000 espèces végétales et 4 400 espèces animales, dont près du tiers (1 335) sont des vertébrés. Cependant, à l'aube du 19<sup>e</sup> siècle, l'inventaire est encore restreint. La seule expédition de Nicolas Baudin vers l'Australie (1800 – 1804)<sup>3</sup> rapporte plusieurs milliers d'espèces animales nouvelles, en particulier de nombreux invertébrés marins<sup>4</sup> Les multiples explorations qui suivirent, liées en grande partie à l'expansion coloniale des grandes puissances européennes, ont conduit au chiffre actuel d'environ 350 000 espèces végétales et 1,3 millions d'espèces animales recensées, au sein desquelles les vertébrés ne représentent plus que 4%. S'y ajoutent quelques dizaines de milliers de microorganismes pour aboutir à l'estimation d'environ 1,7 million d'espèces vivantes connues.

Cependant, en dépit de ces efforts de générations de naturalistes, cet inventaire est aujourd'hui considéré comme extrêmement partiel et, en outre, biaisé par rapport à la réalité.

---

<sup>1</sup> Selon Wilson, ce terme lui aurait en fait été suggéré par l'éditeur de son ouvrage (Postel-Vinay, 2000).

<sup>2</sup> Le suédois Carl Linnæus (1707 – 1778), ennobli en 1792 sous le nom de Carl von Linné, a consacré sa vie de naturaliste à recenser et dénommer précisément toutes les espèces animales et végétales, devenant ainsi la père de la systématique moderne ; son œuvre majeure, *Systema Naturae*, connaît de nombreuses éditions successives à partir de 1735, et ce n'est qu'à la 10<sup>e</sup> édition de 1758 qu'il y généralise le système de nomenclature à deux noms (en général d'origine latine) définissant de façon universelle successivement le genre et l'espèce ; il a en particulier écrit : « Si tu ignores le nom des choses, même leur connaissance disparaît ».

Nb : cette note, ainsi que la plupart des notes de bas de page explicatives qui suivent, sont largement inspirées de l'encyclopédie Wikipedia : [www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)

<sup>3</sup> Nicolas Thomas Baudin (1754-1803), marin français, a commandé à partir de 1800 ce qui fut l'un des plus grands voyages scientifiques de tous les temps avec les deux bateaux Le Géographe et Le Naturaliste qui embarquaient vers l'Australie neuf zoologistes et botanistes ; il mourut de tuberculose pendant la voyage, mais les survivants rapportèrent des dizaines de milliers de spécimens de plantes inconnues, 2 500 échantillons de minéraux, 12 cartons de notes, observations et carnets de voyages, 1 500 esquisses et peintures.

<sup>4</sup> Nous utiliserons ce terme « invertébrés » par commodité, même si cet ensemble n'est plus considéré comme un regroupement pertinent en termes évolutifs.

## **I.1. Un inventaire très partiel**

Au milieu des années soixante-dix, l'opinion majoritaire chez les biologistes était que cet inventaire de la biodiversité était, pour l'essentiel, réalisé. Cette opinion a sans doute conduit à considérer que la taxonomie et la systématique<sup>5</sup> n'étaient plus des disciplines d'avenir et que les chercheurs encore actifs dans ce domaine suffiraient à achever ce recensement.

Le développement de nouveaux outils d'exploration, plus ou moins sophistiqués, est venu bouleverser cette vision. Parmi ces outils, on peut citer des méthodes d'inventaire exhaustif comme le "fogging" (projection d'insecticides sur l'ensemble du feuillage d'un arbre, permettant de récolter la quasi-totalité de la faune présente) ou les outils de plongée profonde qui ont permis d'explorer le plancher océanique, et en particulier ce qui vit autour de ses sources hydrothermales.

De ce fait, si la découverte de nouveaux mammifères ou oiseaux est maintenant limitée à quelques espèces par an, les autres groupes animaux, et en particulier les invertébrés, continuent à fournir une moisson annuelle de plus de 10 000 espèces nouvelles, soit un taux d'enrichissement -variable selon les groupes- de l'ordre de 0,9% par an. Les estimations du nombre d'espèces restant à décrire sont, pour la plupart des groupes d'invertébrés, de l'ordre de cinq à dix fois supérieures à celle du nombre des espèces découvertes.

Il en est de même chez les végétaux, pour lesquelles les végétaux supérieurs sont considérés comme connus dans leur grande majorité, alors que d'autres groupes comme les algues restent pour l'essentiel à inventorier.

L'estimation du nombre d'espèces encore à découvrir ne peut par définition se faire que par des approches indirectes et ne fournit que des ordres de grandeur. Ainsi, en extrapolant la relation qui relie, pour des espèces visibles à l'œil nu, la taille des individus et le nombre d'espèces connues correspondant à cette taille, on estime actuellement entre 10 et 50 millions le nombre total d'espèces, dont l'essentiel serait constitué d'espèces de taille inférieure ou égale au millimètre. Le terme "nouvelle frontière" a donc été proposé pour rendre compte de ce constat d'une vision encore extrêmement partielle et biaisée de la biodiversité.

Sur ces bases, si l'on retient une estimation relativement prudente d'environ 10 millions d'espèces, on est conduit à considérer, au rythme actuel des inventaires, qu'il faudra encore plusieurs siècles pour s'approcher d'une vision exhaustive de cette biodiversité. D'où un premier enjeu : comment définir et mettre en œuvre, sur des périodes suffisamment longues, des stratégies pertinentes d'inventaire ?

## **I.2. Le défi de la classification « naturelle »**

De manière sans doute plus discrète mais tout aussi importante s'est produite, à la fin du 20<sup>e</sup> siècle, une autre révolution conceptuelle : celle relative à la classification du vivant. En proposant de sélectionner, parmi tous les caractères permettant de juger de la ressemblance entre les espèces, ceux qui ont une véritable signification évolutive, Willy Hennig<sup>6</sup> a introduit

---

<sup>5</sup> Ces deux notions sont très proches : la taxonomie décrit les organismes vivants et les regroupe en entités appelées taxons (famille, genre, espèces, etc.) ; la systématique a pour objet de dénombrer et de classer ces taxons dans un certain ordre ; elle est à la fois une méthode et un résultat.

<sup>6</sup> Willy Hennig (1913-1976), biologiste allemand, a proposé une nouvelle classification dite « phylogénétique » fondée sur ce que des êtres vivants ont en commun (au niveau morphologique comme au niveau moléculaire), et non pas, en première

à la fin des années soixante une nouvelle méthode qui remet en cause une bonne part des classements précédents. Cette approche a conduit notamment à démanteler certains groupes de vertébrés « classiques », comme les poissons ou les reptiles, qui apparaissent dorénavant comme membres de plusieurs lignées distinctes.

On pourrait considérer que cette ambition de développer des classifications rendant compte aussi précisément que possible de l'histoire évolutive des espèces n'est qu'un exercice purement académique et n'a guère d'incidences pratiques. C'est pourtant une vision opposée qu'il convient d'avoir de ces enjeux : repérer des espèces évolutivement proches, c'est par exemple préciser dans un complexe d'espèces d'insectes celles qui peuvent transmettre ou non un parasite donné ; c'est également permettre la recherche de molécules bioactives chez des espèces proches, lorsqu'une propriété a été identifiée chez une espèce difficilement exploitable ; c'est, aussi, gérer de manière plus durable des stratégies de lutte contre les insectes ravageurs, en définissant précisément l'aire extension des espèces.

### I. 3. La « matière noire » de la biodiversité : les microorganismes

A cette diversité, déjà considérable, des « êtres organisés »<sup>7</sup> s'ajoute en outre une « matière noire » infiniment moins connue, à savoir celle des unicellaires et surtout des bactéries<sup>8</sup>. Sur la base de leur contenu en azote et phosphore, on estime que ces bactéries représenteraient 90% de la matière vivante. Leur rôle dans le fonctionnement des grands cycles bio-géo-chimiques serait donc considérable. Pour ne prendre qu'un exemple, on a découvert en 1988 dans le plancton océanique une bactérie de moins d'un millième de millimètre (micron), *prochlorococcus*, qui serait responsable à elle seule de plus de la moitié de la production de plancton de l'océan et serait donc l'espèce utilisant la photosynthèse à la fois la plus petite et la plus abondante de la planète.

Il est vraisemblable que le nombre de ces espèces<sup>9</sup> est très supérieur à celui des êtres organisés : on avance actuellement le chiffre de 1 à 10 milliards, à comparer aux 6 000 espèces aujourd'hui identifiées.

Enfin, si l'on regarde la diversité entre ces espèces, en se basant par exemple sur le degré de ressemblance des séquences de certains ARN<sup>10</sup>, il apparaît que l'ensemble des organismes pluricellulaires, des champignons à l'homme, est étonnamment homogène au regard de la diversité microbienne. Cette grande diversité des microorganismes résulte sans doute à la fois de leur très grande ancienneté évolutive et de leur très rapide multiplication.

On observe en outre une très grande diversité fonctionnelle, par exemple dans des aptitudes originales à dégrader des produits variés dans des conditions physico-chimiques parfois extrêmes (températures, salinité, teneur en oxygène du milieu). D'où un intérêt extrêmement fort des entreprises de biotechnologie pour l'exploration de cette diversité microbienne<sup>11</sup>. En effet, on dispose aujourd'hui de méthodes de biologie moléculaire qui

---

instance, sur ce qu'ils n'ont pas (on évitera alors « invertébrés ») ou sur ce qu'ils font (on évitera alors « vivipares », « fousseurs »). Elle regroupe les êtres vivants sur les ressemblances qui sont évolutivement innovantes.

<sup>7</sup> Organisés : constitués d'ensemble de cellules « eucaryotes », c'est-à-dire possédant un vrai noyau.

<sup>8</sup> Unicellaires et bactéries, dites « procaryotes » car sans noyau véritable.

<sup>9</sup> Nous ne discuterons pas ici la question difficile de la définition d'une espèce bactérienne...

<sup>10</sup> Les ARN, acides ribonucléiques sont de molécules proches de l'ADN et permettent notamment, dans une cellule, de transmettre l'information à l'extérieur du noyau, et de synthétiser des protéines à partir de ces informations.

<sup>11</sup> La fondation de Craig Venter, l'un des pionniers du séquençage du génome humain, explore ainsi les fonds océaniques pour constituer une collection originale de peuplements bactériens et caractériser leurs propriétés.

permettent de s'affranchir de la nécessité de cultiver les bactéries pour pouvoir les étudier. Cette fraction cultivable ne représentait qu'une faible proportion des espèces présentes dans un écosystème – moins de 1% sans doute – et n'était sans doute pas représentative, les espèces tolérantes à l'oxygène étant par exemple surreprésentées. Ces nouvelles possibilités expliquent le lancement récent de nombreux programmes de séquençage de « métagénomés » bactériens (ensemble des génomes des différentes espèces présentes dans un écosystème), comme ceux de la flore digestive humaine ou de la station d'épuration d'Evry.

En conclusion de ce premier volet, on perçoit donc le caractère extrêmement partiel et biaisé de notre perception actuelle de la biodiversité, basée essentiellement sur des espèces observables à l'œil nu, elles-mêmes connues de manière très limitée, et donc la nécessité d'intégrer ce changement de vision dans les stratégies de conservation.

## **II. La complexité : les multiples niveaux d'organisation.**

A ce défi de l'inventaire des espèces est venu se surajouter une conviction de plus en plus forte des biologistes : la description de la diversité spécifique ne constituait qu'une des dimensions de la description et de la compréhension de la biodiversité et d'autres niveaux d'organisation devaient être pris en compte.

Cette idée n'est apparue que progressivement ; ce n'est qu'en 1992 qu'Eugène Odum<sup>12</sup> proposait l'idée que « *la biodiversité devait inclure la diversité génétique et la diversité paysagère* ». En outre, cette présentation – désormais classique – en trois niveaux mérite, comme nous allons le voir, d'être discutée et affinée.

### **II.1. La diversité intra spécifique**

A ce niveau, on évoque le plus souvent la question de la diversité génétique mais il convient de considérer également un concept plus large, celui de diversité phénotypique<sup>13</sup>. En effet, les traits acquis par un individu au cours de son développement et de sa vie, qu'ils résultent d'influences génétiques ou environnementales, gouvernent de fait sa valeur sélective - et donc les capacités de survie et d'adaptation de l'espèce - ainsi que son rôle dans l'écosystème : un jeune chêne, un arbre adulte et un tronc mort sont des entités écologiquement différentes et l'on reconnaît aujourd'hui l'intérêt de prendre en compte cette diversité dans la gestion d'un massif forestier. Un même génotype, par exemple un clone de peupliers ou de souris, pourra donc exprimer une diversité non négligeable, au niveau du phénotype.

En outre, on sait maintenant que, chez les vertébrés supérieurs, des comportements acquis peuvent se transmettre « culturellement » de manière verticale (de la mère à l'enfant, par apprentissage) ou horizontale (par imitation par les congénères) et permettre une adaptation beaucoup plus rapide de la population que les mécanismes de sélection darwinienne. Ainsi, les oiseaux possèdent des « dialectes » locaux transmis par imitation mais souvent très stables, qui peuvent jouer un rôle dans les interactions entre populations

---

<sup>12</sup> Eugène Odum, scientifique américain (1913-2002), est un des pionniers de l'écologie de l'écosystème.

<sup>13</sup> Si le génotype est le caractère héréditaire d'un individu, lié à ses gènes, le phénotype désigne ce qui est effectivement exprimé et observable sur l'individu. Dans certains cas, le phénotype (par exemple le sexe ou le groupe sanguin d'un mammifère) dépend étroitement des gènes mais le plus souvent (par exemple pour la taille, l'importance des réserves, la fécondité d'un animal ou d'une plante), de nombreux facteurs de l'environnement vont influencer sur le développement d'un individu et un même génotype pourra conduire à des phénotypes très divers.

différentes, même génétiquement proches. C'est pourquoi la prise en compte de ces différentes facettes de la diversité entre individus apparaît indispensable.

Cette diversité intra spécifique a longtemps, à notre avis, été sous-estimée et ceci pour au moins deux raisons :

- La première est conceptuelle : dans la conception de l'espèce développée par Linné, l'important est de décrire les "types", supposés refléter l'œuvre du Créateur. La célèbre maxime de Linné « *Deus creavit, Linnaeus disposuit* » exprime explicitement ce point de vue. Les variations autour de ce type permettent éventuellement de définir la part d'aléa dans la réalisation de ce type (on parle souvent "d'erreur standard" pour désigner ce qui est en fait un écart-type), mais ne recèlent pas d'informations pertinentes.
- La seconde est pratique : à la différence des espèces domestiques pour lesquelles existent de nombreuses races et variétés ayant des caractères de coloration ou de morphologie très variés, les espèces sauvages apparaissent, à l'examen visuel, constituées d'individus très similaires. D'où l'idée qu'en l'absence d'intervention humaine, les "mutants" étaient rares dans les populations naturelles. Les ouvrages de biologie des populations des années soixante témoignent de ces débats et les premiers généticiens durent longtemps s'appuyer sur un nombre restreint de modèles (la mouche du vinaigre dite drosophile, les escargots du genre *cepea*, etc.).

Citons à nouveau Linné, qui résume ces deux notions dans « *Systema Naturae* » (1737) : « *Toutes les espèces tiennent leur origine de leur souche, en première instance, de la main même du Créateur Tout-Puissant, car l'Auteur de la Nature, en créant les espèces, imposa à ses créatures une loi éternelle de reproduction et de multiplication dans les limites de leur propre type. En fait, et dans bien des cas, il leur accorde le pouvoir de jouer avec leur aspect extérieur, mais jamais celui de passer d'une espèce dans l'autre ; d'où les deux sortes de différences existant entre les plantes : l'une étant la différence vraie, la diversité née de la main sage du Tout-Puissant, mais l'autre la variation de la coquille extérieure due au caprice de la Nature. Qu'un jardin soit ensemencé de mille graines différentes, que le jardinier mette un soin constant à y cultiver des formes anormales et, en quelques années, le jardin comprendra 6 000 variétés que le commun des botanistes nomme espèces. Et ainsi, je distingue les variétés du Créateur Tout-Puissant, qui sont les vraies, des variétés anormales du jardinier. Je considère les premières de la plus grande importance à cause de leur Auteur, je rejette les autres à cause de leurs auteurs. Les premières persistent et ont persisté depuis le début du monde, les autres, étant des monstruosité, ne peuvent revendiquer qu'une vie brève* ».

Il a fallu attendre la fin des années 60, et surtout 80<sup>14</sup>, pour constater que la variation intra spécifique était générale et concernait au moins autant les espèces sauvages que les espèces domestiques.

Il apparaît donc désormais nécessaire de décrire et de prendre en compte l'organisation de cette diversité génétique intra spécifique. Trois niveaux principaux sont à distinguer :

- La variation entre les *populations*, cette notion de population étant plus ou moins aisée à établir. En effet, certaines espèces, comme les espèces aquatiques lacustres, sont réparties en groupes géographiquement disjoints ; d'autres, comme la plupart

---

<sup>14</sup> Années 60, avec l'introduction de méthodes simples d'étude du polymorphisme des protéines par électrophorèse ; années 80, avec l'accès direct à la variation de l'ADN nucléaire ou mitochondrial.

des oiseaux ou les poissons marins, présentent une répartition sans discontinuité biogéographique évidente. L'analyse génétique va donc révéler des situations variées, allant de populations très différenciées – et n'ayant donc que très peu d'échanges avec les populations voisines – à des ensembles dans lesquels la probabilité d'accouplement est la même entre tous les individus de l'espèce. Entre ces deux extrêmes, la notion de "métapopulation" désigne un ensemble de populations présentant une certaine différenciation – due à une reproduction préférentielle à l'intérieur de la population – mais ayant un taux d'échanges génétiques non négligeable entre les populations. Si l'on prend l'exemple du saumon atlantique, on distingue deux grandes métapopulations représentant respectivement les populations européennes et nord-américaines, au sein desquelles la variation entre les populations sera plus limitée.

- La variation entre les *individus* à l'intérieur de chaque population, qui pourra varier d'une population à l'autre en fonction de divers paramètres, en particulier le degré d'isolement et l'effectif de la population.
- La variation à l'intérieur de chaque individu, c'est-à-dire la diversité des allèles de chaque gène de l'individu<sup>15</sup>.

Au sein d'une population, la répartition de la diversité entre et à l'intérieur de chaque individu dépendra en particulier du mode de reproduction. Ainsi, chez les plantes se reproduisant préférentiellement par autofécondation (comme le blé, les haricots), la variation intra individuelle sera faible et celle entre individus forte. Ce sera l'inverse pour des espèces ou les individus échangent largement leur pollen (comme le maïs ou le colza). L'homme a pu jouer sur ce phénomène pour créer, par exemple dans le cas des maïs hybrides, des populations constituées d'individus possédant une forte diversité intra individuelle – et donc une bonne capacité d'adaptation – mais tous génétiquement identiques, d'où parfois une grande vulnérabilité à certains ravageurs.

Une telle description de l'organisation de la diversité intra spécifique sera nécessaire à la gestion rationnelle de l'espèce, qu'il s'agisse d'interventions directes (réintroduction d'individus, définition de prélèvements autorisés) ou indirectes (modification des habitats, fractionnement par un équipement infranchissable). Divers exemples plus ou moins médiatisés (origine des ours introduits dans les Pyrénées, repeuplement de la Loire en saumons...), ont montré la pénétration progressive de ces concepts chez les gestionnaires, mais aussi les besoins de recherches complémentaires pour mieux fonder les décisions de gestion. Pour ne prendre qu'un exemple, à partir de quel degré de différenciation génétique entre deux populations convient-il de déconseiller d'introduire des individus de l'une dans l'autre (cas des ours "slovènes" ou des saumons "canadiens") ? La réponse est loin d'être consensuelle entre les experts.

Dans le cas des espèces domestiques, la prise de conscience de l'intérêt de préserver à long terme la diversité génétique a conduit également à des recherches actives pour définir des pratiques de sélection efficaces mais prenant mieux en compte cet objectif. Cette

---

<sup>15</sup> On nomme allèle une variante donnée d'un gène au sein d'une espèce (exemple : dans le cas d'un gène codant pour la couleur d'une fleur, l'un des allèles peut coder pour la couleur jaune, un autre pour le blanc, etc.). Nous nous bornons ici à évoquer la variation génétique mais, comme indiqué précédemment pour la variation entre les individus, il existe un autre aspect de la variation intra individuelle, constitué par la diversité des cellules et la capacité, à partir d'un même génome, de générer des adaptations et des organes ayant des fonctions spécifiques, comme dans le cas de la différenciation cellulaire ou de la réponse immunitaire. Ce rôle de la biodiversité au sein de chaque organisme est rarement mis en avant alors qu'il est constitutif de tous les organismes pluricellulaires.

intégration des objectifs d'amélioration génétique et de conservation de la biodiversité peut en effet se révéler plus durable que des stratégies « dissociées » visant à mettre en place des opérations spécifiques de conservation des ressources génétiques, ou au moins complémentaire de ces opérations.

S'y ajoute en outre, comme indiqué au début de cette partie, la nécessité d'intégrer dans cette description les traits acquis par des individus au cours de leur développement, qui pourront également influencer grandement sur leur capacité d'adaptation à un nouveau milieu et d'intégration à une nouvelle population. Indiquons enfin que, même chez les espèces ne faisant pas l'objet d'intervention humaines intentionnelles, le suivi temporel de la diversité intra spécifique peut se révéler un outil précieux pour suivre des évolutions que la simple analyse démographique ne détecte pas (par exemple, une réduction du nombre de reproducteurs « efficaces », c'est-à-dire contribuant effectivement à la génération suivante). Cette approche est d'autant plus précieuse lorsque les données démographiques ne sont pas disponibles. On a pu ainsi montrer que les populations de bison américain avaient subi une réduction forte de leurs effectifs il y a plus de 20.000 ans, bien avant la période d'exploitation intensive du 19<sup>e</sup> siècle, cette réduction résultant sans doute des changements climatiques.

## II.2. La diversité supra-spécifique.

C'est un lieu commun de constater que toutes les espèces ne sont pas présentes partout. Elles forment donc localement des associations originales, les biocénoses<sup>16</sup>, contribuant, en interaction avec les caractéristiques du milieu physique, à des écosystèmes ayant des propriétés spécifiques<sup>17</sup>.

Cette diversité écosystémique est répartie de manière extrêmement inégale sur la planète, avec une concentration d'écosystèmes riches en biodiversité dans un nombre restreint de lieux, les fameux "points chauds", pour la plupart en zone intertropicale.

Du fait de notre connaissance limitée des espèces évoquées dans la première partie, on peut s'interroger sur la véritable nature de ces "points chauds" : une connaissance plus exhaustive ne révélerait-elle pas d'autres points chauds ou, au contraire, une distribution plus homogène de la biodiversité ?

Plusieurs arguments militent cependant en faveur de la réalité de ce phénomène. Tout d'abord, il apparaît que, pour des groupes relativement bien connus (plantes, vertébrés), on observe de bonnes corrélations entre leur richesse spécifique dans différents milieux. Une forte biodiversité d'un groupe serait donc prédictive d'une biodiversité plus générale. Au-delà de ces relations statistiques, l'analyse écologique montre souvent que "la biodiversité appelle la biodiversité", autrement dit que la richesse en espèce d'un groupe donné induit une richesse corrélative d'un groupe ayant des interactions écologiques avec lui. On peut citer l'exemple du mont Nimba (Guinée) : la grande richesse en figuiers (31 espèces recensées) s'accompagne d'une grande diversité d'insectes inféodés au fruit du figuier pour leur reproduction (113 espèces recensées), alors qu'il n'y a que quelques espèces dans ces deux groupes sur le

---

<sup>16</sup> Une biocénose est un ensemble d'êtres vivants de toutes espèces, végétales et animales, coexistant dans un espace défini (le biotope), et qui offre les conditions extérieures nécessaires à leur vie. Un biotope et une biocénose constituent un écosystème. En agriculture, le champ cultivé et son environnement immédiat sont définis comme un « agroécosystème ».

<sup>17</sup> Par propriétés spécifiques, on entendra la manière dont se déroulent de grands cycles bio-géo-chimiques (eau, carbone, azote...), mais aussi des propriétés fonctionnelles comme la productivité, la résistance (capacité de rester stable vis-à-vis d'une perturbation) ou la résilience (capacité de revenir à l'état actuel après une perturbation...).

pourtour méditerranéen. De même, la grande richesse spécifique des poissons de Nouvelle Calédonie va de pair avec une très grande diversité des parasites branchiaux de ces espèces.

Le second argument est que ces zones ont souvent une histoire qui explique la richesse et l'originalité de leur biodiversité. On peut citer le pourtour méditerranéen, qui a servi de refuge à de nombreuses espèces animales et végétales lors des dernières glaciations et qui a conservé une biodiversité beaucoup plus riche que les zones plus nordiques de l'Europe, recolonisées plus récemment à partir de ces refuges. On peut citer également les grandes îles isolées du continent, comme Madagascar ou la Nouvelle Calédonie, qui ont permis le développement d'une biodiversité originale, détectable dans des groupes aussi divers que les primates, les poissons, les mollusques ou les végétaux<sup>18</sup>.

Si elle est réelle, cette diversité des écosystèmes mérite-t-elle pour autant protection ? Cette question peut apparaître surprenante, voire choquante pour les défenseurs de la biodiversité. Elle mérite cependant d'être examinée, ne serait-ce que parce qu'elle est, de fait, posée à chaque fois que des activités humaines conduisent à modifier, voire à faire disparaître des écosystèmes. Nous n'évoquons ici que deux aspects de ce débat.

Le premier est celui du caractère irréversible de la perte d'un écosystème. On pourrait en effet considérer que, dès lors que des espèces sont présentes dans une vaste zone biogéographique, il serait, au moins théoriquement, possible de reconstituer un écosystème en regroupant des individus des différentes espèces constitutives, prélevés en un autre lieu. On peut faire l'analogie avec la diversité des couleurs, infinie mais pouvant toujours être obtenue à partir de trois couleurs fondamentales. Outre son caractère peu réaliste (il faudrait connaître de manière exhaustive la composition de la biocénose et nous avons vu dans la première partie combien nous en sommes loin), cette hypothèse néglige le fait que, dans un écosystème, les individus d'une espèce donnée peuvent avoir évolué sous la pression du milieu ou des autres espèces et peuvent présenter de ce fait des caractéristiques originales, propres à cet écosystème.

Cette co-adaptation des espèces oblige donc à considérer un écosystème comme une entité "émergente", dont les propriétés ne peuvent être entièrement déduites de celles des espèces qui le composent. Ce phénomène est particulièrement net dans le cas des agents pathogènes et de leurs hôtes : transférée dans un autre écosystème, une même espèce animale ou végétale peut se révéler sensible à un agent pathogène qu'elle tolérerait dans son écosystème d'origine. Inversement, la virulence d'une pathologie vis-à-vis d'un même hôte peut se révéler plus forte lorsqu'il est transféré dans un autre écosystème. Cette dimension "émergente" des propriétés d'un écosystème constitue donc un argument fort en faveur de leur préservation.

Le second aspect du débat est relatif au caractère "indispensable" de toutes les espèces présentes au sein d'un écosystème. Autrement dit, existe-t-il dans un écosystème une hiérarchie des espèces, certaines apparaissant nécessaires et d'autres "facultatives". Cette interrogation est alimentée en particulier par les études des distributions d'abondance des espèces au sein d'un écosystème, qui soulignent souvent le grand nombre d'espèces "rares", c'est-à-dire représentées par un petit nombre d'individus. Cette surabondance des espèces rares est estimée par l'écart à des distributions simples<sup>19</sup> et donne lieu à deux types d'interprétation :

---

<sup>18</sup> Nous renvoyons le lecteur aux nombreuses monographies publiées par le Muséum d'histoire naturelle dans ce domaine. Voir en particulier le site [www.mnhn.fr/publication/memoire/memoire.html](http://www.mnhn.fr/publication/memoire/memoire.html)

<sup>19</sup> Distribution de type normale ou lognormale.

- La première considère qu'il existe deux catégories d'espèces, les unes abondantes et résidentes, constitutives de l'écosystème, et les autres, rares et "facultatifs", c'est-à-dire pouvant disparaître sans affecter le fonctionnement de l'écosystème.
- La seconde cherche à expliquer ces distributions par une théorie globale, valable pour toutes les espèces. Cependant, même si elle ne distingue pas deux catégories d'espèces, cette théorie demeure "neutraliste" et considère les espèces comme des entités indépendantes dont la présence ou l'absence sera régie par des paramètres propres à chacune et non influencés par les autres espèces de la biocénose. Elle ne recourt pas aux hypothèses du caractère nécessaire de la présence des espèces dans l'écosystème et de leur interdépendance éventuelle, qui demeure des questions ouvertes.

Pour comprendre la portée de cette interrogation, il faut rappeler que l'intérêt d'une biodiversité élevée -à ses différents niveaux d'organisation- ne peut être considéré comme une évidence et constitue au contraire une problématique ancienne mais encore très active des recherches en écologie, tant sur le plan théorique qu'expérimental. On peut résumer les principaux éléments de ce débat autour des points suivants :

- Au-delà de l'inventaire systématique des espèces, l'écologie fonctionnelle propose de regrouper les espèces en « groupes fonctionnels », ensemble d'espèces qui jouent un rôle similaire dans les processus écologiques (détritivores, herbivores, prédateurs, etc.). Ainsi, chez les plantes, la caractérisation des espèces par un ensemble de « traits » (hauteur, taille et longévité des feuilles, mode de dispersion des graines, mode de reproduction, etc.) permet de caractériser un peuplement végétal sans recourir à un inventaire systématique exhaustif et de prédire dans une certaine mesure sa vulnérabilité à des changements de l'environnement. Ces groupes fonctionnels peuvent comprendre des espèces très éloignées sur le plan systématique, d'où l'intérêt déjà souligné de bien connaître la biologie des organismes pour opérer ces regroupements. Or, au sein d'un groupe fonctionnel, il pourrait exister des phénomènes de redondance, autrement dit l'augmentation du nombre d'espèces, au delà d'un seuil minimum, ne jouerait plus de rôle dans les performances de l'écosystème.
- La manière dont les espèces sont reliées entre elles par rapport à une fonction donnée, c'est-à-dire la géométrie du réseau, joue un rôle sans doute plus important que le nombre d'espèces qu'il englobe. On montre par exemple que si la distribution des connections est aléatoire, l'augmentation du nombre de connections entre espèces peut conduire à une transition vers un état instable en cas de perturbations. Par contre, lorsque seules certaines espèces "clé de voûte" sont fortement connectées à un grand nombre d'autres espèces, cette géométrie favoriserait la résistance de ce réseau aux perturbations.

Pour terminer cette présentation des différents niveaux d'organisation de la biodiversité, il faut mentionner que l'écologie s'est intéressée, depuis une vingtaine d'années, à des niveaux d'organisation plus large, regroupant divers écosystèmes -forêts, prairies, champs cultivés, rivières et lacs- dans des ensembles géographiques plus vastes. Cette « écologie du paysage » se donne comme objectif de comprendre comment la répartition spatiale de cette mosaïque d'écosystèmes -en termes de tailles, de formes, de connections entre eux- détermine certains aspects de la structure et de la dynamique de la biodiversité. Elle s'intéresse en particulier aux espèces animales susceptibles de fréquenter différents écosystèmes au cours de

leur cycle biologique, mais aussi à d'autres propriétés fonctionnelles de ces paysages, comme la conservation de l'eau, des sols ou le devenir des polluants.

A partir de la combinaison des mêmes écosystèmes, on peut donc aboutir à une très grande variété de paysages aux propriétés spécifiques, d'où l'intérêt d'intégrer ce niveau de description comme un des niveaux pertinents de description et de préservation de la biodiversité.

### **II.3. Le défi d'une vision intégrée**

De la diversité individuelle, voire intra-individuelle, à celle des paysages, la biodiversité se décline donc en de multiples niveaux d'organisation interconnectés, mais dont les propriétés ne se déduisent pas de la seule connaissance de leurs entités constitutives. Chaque niveau possède donc des propriétés originales, émergentes, qui vont à leur tour influencer sur les propriétés des autres niveaux.

En outre, l'interaction entre ces différents niveaux d'organisation ne se fait pas sur un mode strictement hiérarchique et « emboîté » : sur un plan génétique, un individu contribuera à la dynamique de sa population mais en même temps, en tant qu'individu, il interagira directement -et non via sa population- avec des individus d'autres espèces et pourra donc influencer sur la diversité spécifique ; de même, une population d'une seule espèce pourra parfois jouer un rôle décisif vis-à-vis des propriétés d'un écosystème<sup>20</sup>, voire contribuer fortement à la structure d'un paysage, comme les colonies de termites dans la savane africaine.

Cette question des interdépendances, des rétroactions positives ou négatives entre ces différents niveaux d'organisation est à notre avis fondamentale pour élaborer une vision globale et intégrée de la biodiversité. Par exemple, une variation de la diversité spécifique induit-elle une variation de la diversité génétique au sein des espèces ? Dans ce cas, ces deux variations se compensent-elles ou, au contraire, se cumulent-elles ? De même, nous nous sommes interrogé sur le lien éventuel entre la diversité spécifique et les propriétés fonctionnelles d'un écosystème ; nous avons vu également comment le mode de reproduction pouvait moduler la répartition de la diversité génétique inter et intra-individuelle et nous venons d'évoquer le rôle que pouvait jouer la structure des paysages dans le maintien de la diversité spécifique.

Nous sommes cependant très loin d'avoir intégré l'ensemble de ces connaissances dans un modèle global, d'autant plus qu'un certain cloisonnement demeure encore aujourd'hui entre les recherches à ces différents niveaux d'organisation : la diversité intra-spécifique est le fief des biologistes des populations, les systématiens se concentrent sur la diversité spécifique, les niveaux supra-spécifiques étant surtout investis par des écologues.

Apporter des réponses à de telles questions, réponses qui pourraient d'ailleurs ne pas être univoques, constitue un enjeu majeur pour la recherche. Ces réponses devront être élaborées dans un cadre pluridisciplinaire, impliquant généticiens et biologistes des populations, démographes, géographes, systématiens, écologistes, etc. et permettront de mieux fonder des stratégies de préservation de la biodiversité.

Indiquons enfin que ces réponses, quelles qu'elles soient, ne saurait dicter les décisions. Le fait de protéger ou non une espèce, une population ou un écosystème peut faire intervenir bien d'autres considérations légitimes que l'analyse de leur rôle écologique : éthiques,

---

<sup>20</sup> Nous avons évoqué le cas de la bactérie *prochlorococcus*, responsable à elle seule de la majorité de la production océanique.

politiques, socioéconomiques, etc., mais il importe dans ce cas que ces considérations soient explicitées, si l'on veut éviter une instrumentalisation de l'écologie scientifique.

### **III. L'utilité : des fonctions méconnues**

Face au défi d'inventorier et de préserver un ensemble aussi vaste et complexe, la question de l'utilité de la biodiversité est souvent posée. Nous présenterons tout d'abord les arguments les plus fréquemment échangés, pour nous attacher ensuite à montrer que les aspects les plus importants ne sont peut-être pas ceux qui retiennent immédiatement l'attention.

#### **III.1. Les arguments « classiques ».**

Confrontée à cette question de l'utilité, les défenseurs de la biodiversité développent le plus souvent deux types d'argumentaires.

Le premier est de dénoncer cette vision « utilitariste » et de souligner que d'autres raisons, éthiques, esthétiques, culturelles, suffisent à justifier leur attitude. Ainsi, l'introduction du concept de « patrimoine naturel » permet de relier explicitement la protection de la nature à celle des œuvres de l'homme -tableaux, musiques, monuments- qui, on en conviendra, n'est pas fondée sur une vision strictement utilitariste. De même, la référence à d'autres cadres éthiques<sup>21</sup> qu'un simple anthropocentrisme permet de s'interroger sur les fondements du droit que l'homme s'attribue de perturber la nature et de faire disparaître, volontairement ou involontairement, des espèces.

Le second registre consiste, à l'inverse, à rentrer dans cette logique d'utilitarisme immédiat et à montrer tout ce que la connaissance et l'utilisation de la biodiversité a permis à l'homme de faire depuis ses origines. Le fait que l'agriculture et l'alimentation européenne soit en grande partie fondée sur des espèces collectées dans l'ensemble de la planète est connu mais constitue dans ce contexte un argument fort : les trois symboles de l'identité française, le pain, le vin et le fromage<sup>22</sup> sont issus d'espèces qui n'étaient pas présentes sur notre territoire au néolithique ; de même, plusieurs emblèmes de l'alimentation méditerranéenne -tomates, poivrons, aubergines- n'ont rejoint qu'assez récemment cette région. On peut aussi faire remarquer que les bateaux qui ont permis d'explorer le monde et d'en rapporter toutes ces espèces sont eux-mêmes issus d'une utilisation pertinente de la biodiversité : diversité des essences d'arbres pour la coque (en chêne), les mâts (en sapin), les poulies (en buis), les avirons (en hêtre), les affûts de canon (en orme) ; diversité des fibres textiles pour les cordages, les voiles, le calfatage, etc.

Enfin, l'utilisation par l'homme des propriétés pharmacologiques des plantes a sans doute été souvent cruciale pour sa survie et cet inventaire est aujourd'hui loin d'être terminé : de l'aspirine issue du saule blanc à des anti-tumoraux récents comme la vinblastine (issue de la pervenche de Madagascar) ou le taxotère (issu de l'if américain). Cette quête s'élargit

---

<sup>21</sup> Nous renvoyons pour une présentation de ces différentes éthiques de la protection de la nature à notre article : B. Chevassus-au-Louis, R. Barbault et P. Blandin, 2004. « Que décider ? Comment ? Vers une stratégie nationale de recherche sur la biodiversité pour un développement durable ». In : « Biodiversité et changements globaux. Enjeux de société et défis pour la recherche ». Sous la direction de Barbault R. et Chevassus-au-Louis B., pp. 192-223. Ed. ADPF, Ministère des Affaires étrangères, Isbn 2-914935-27-7.

<sup>22</sup> Dans le cas des bovins, l'auroch était présent en Europe occidentale mais ne semble pas avoir été domestiqué. Les bovins domestiques auraient été introduits du Proche-Orient (Vigne, 2004).

aujourd'hui aux invertébrés marins : c'est par exemple à partir de l'étude d'une éponge qu'a été élaborée une molécule antivirale comme l'AZT.

Cependant, il nous semble important d'insister ici sur trois autres aspects de la biodiversité, moins connus mais à notre avis encore plus essentiels pour l'avenir : son rôle comme source d'innovation, sa contribution à des fonctions « non-marchandes » et, enfin, son rôle de sentinelle face aux pollutions.

## II.2. Biodiversité et innovation : la biomimétique

Observer la nature pour en tirer des innovations utiles n'est pas une idée nouvelle : Léonard de Vinci par exemple était un zéléateur emblématique de ce principe, qui a sans doute permis à l'homme certaines de ces avancées majeures : aurions-nous rêvé de conquérir les airs sans la contemplation, depuis des millénaires, du merveilleux ballet des oiseaux ? Aurions-nous muni nos pieds de palmes pour explorer les océans sans l'observation des oiseaux aquatiques ?

Quelques exemples récents vont nous permettre de montrer combien ce principe peut se révéler également fécond pour l'avenir.

Le premier est relatif aux nouveaux matériaux : on connaît l'histoire et le succès du Velcro, dont les crochets sont imités de ceux de plantes comme la badiane et fournissent un système d'accrochage à la fois rapide, solide et réversible. Un exemple plus récent est celui d'un scarabée du désert de Namibie, *Onymacris unguicularis*. Dans ce milieu extrême, cet insecte réussit, grâce à la structure très particulière de la surface de ses élytres<sup>23</sup>, à condenser la faible humidité matinale pour en tirer l'eau nécessaire à sa subsistance. La constitution de tissus reproduisant ces structures est envisagée pour améliorer l'efficacité des filets à brouillard, actuellement utilisés dans des zones de faible pluviométrie, comme la côte pacifique de l'Amérique du Sud, pour fournir de l'eau potable aux villages isolés.

Le second aspect est celui de la locomotion dans divers milieux : ainsi, une analyse hydrodynamique de l'immense nageoire de la baleine à bosse, bordée de gros tubercules irréguliers, a montré que cette morphologie a priori surprenante était beaucoup plus efficace que des structures lisses dans certains types d'écoulements, observation ouvrant des perspectives intéressantes pour des engins comme les voiliers de compétition. Autre exemple dans le domaine de la robotique, la création de machines reproduisant la marche sur six pattes des insectes a montré que ce mode de locomotion pouvait dans certains milieux être plus intéressant que les roues ou la marche bipède ou quadrupède des mammifères. Enfin, la fabrication de « nanodrones », avion sans pilote de la taille d'un gros insecte, amène à tenter de comprendre et reproduire le vol de la libellule, qui peut alternativement être en vol stationnaire ou se déplacer rapidement (on y parvient aujourd'hui à condition que le nanodrone demeure relié à un fil, ce qui montre le chemin restant à parcourir).

Nous terminerons<sup>24</sup> par un aspect qui nous est cher, celui des sociétés de robots et de l'intelligence répartie. En effet, les premiers robots étaient conçus de manière anthropocentrique, c'est-à-dire comme des individualités autonomes qui devaient pouvoir capter, traiter et explorer les informations à partir de leurs ressources propres. C'est d'ailleurs

<sup>23</sup> Les élytres sont les ailes antérieures, durcies, qui recouvrent au repos les ailes postérieures de certains insectes à la façon d'un étui. Le nom des coléoptères vient d'ailleurs du latin *coleus*, étui.

<sup>24</sup> Nous invitons le lecteur intéressé par cet immense domaine à interroger un moteur de recherche autour des termes « biomimetics » ou « bionics ».

l'image que les films de science-fiction ont contribué à populariser<sup>25</sup>. Cette conception s'est heurtée à un certain nombre de limites, dès lors que l'on cherchait à augmenter les capacités de ces robots : en particulier, lorsqu'il s'agissait d'évoluer dans un environnement mal connu et hostile (exploration spatiale, installations nucléaires, villes après un séisme, etc.), la taille et le coût de ces robots constituait souvent un facteur limitant. Or, il existe un autre type d'intelligence -définie ici comme la capacité d'analyser une situation et d'en déduire un comportement approprié- que ce modèle « concentré » et individuel qui est le nôtre : c'est celui des insectes sociaux, fourmis, abeilles, termites, etc. Dans ce cas, l'intelligence de chaque individu est relativement restreinte : il ne capte que des signaux locaux et ne peut réaliser qu'un traitement sommaire de ces informations. Par contre, il échange en permanence, à travers des messages chimiques, tactiles ou visuels, les informations qu'il capte avec divers congénères et contribue ainsi à une « intelligence répartie », qui permet à une colonie de localiser et d'exploiter rapidement une ressource alimentaire, de déplacer son couvain en cas de danger ou de neutraliser un agresseur. C'est sur ce principe que se sont développées les « sociétés de robots », constituées d'un grand nombre de petits robots, peu coûteux et n'ayant que de faibles capacités, mais interconnectés. Une telle configuration présente en particulier l'intérêt d'être robuste par rapport aux perturbations, la disparition de quelques unités dans des environnements hostiles ne diminuant pas l'intelligence collective de l'ensemble.

### III.3. Biodiversité et services écologiques

Les arguments relatifs à la fourniture d'aliments, de matériaux ou de médicaments ont en commun le fait qu'il s'agit de biens pouvant être mis sur le marché et dont la « valeur » peut donc être estimée par un prix. Or, il existe d'autres fonctions liées à la biodiversité qui ne font pas l'objet d'échanges marchands mais qui n'en sont pas moins importantes : régulation du climat et de la composition de l'atmosphère, fixation des sols permettant de limiter l'érosion, épuration de l'eau, pollinisation des cultures<sup>26</sup>, recyclage de la matière organique<sup>27</sup>, fourniture d'espèces pouvant réguler les ravageurs, etc.

On regroupe sous le terme de « services écologiques » ces différentes fonctions et, depuis une dizaine d'années, des économistes essayent d'estimer par diverses méthodes la valeur de ces différents services : on peut par exemple calculer la perte de productivité des cultures si la pollinisation par les insectes venait à diminuer ou le coût du traitement des eaux si l'épuration naturelle cessait de fonctionner. Une première estimation globale de l'ensemble de ces services a fourni le chiffre impressionnant de 33 000 milliards de dollars par an, soit presque le double du PNB mondial. La nature produirait en fait deux fois plus que l'ensemble des activités humaines !

Mais ce travail a surtout souligné que la part des biens marchands (essentiellement nourriture et matériaux) dans cet ensemble n'était que d'environ 7%, autrement dit que ces services écologiques gratuits, dont nous n'avons souvent pas conscience, était en fait la partie majeure de l'utilité de la biodiversité.

---

<sup>25</sup> Voir par exemple R2D2 et Z6PO dans « La guerre des étoiles ».

<sup>26</sup> Cette seule fonction de pollinisation par les insectes a été estimée aux USA à 15 milliards de dollars en l'an 2000.

<sup>27</sup> Par exemple, l'introduction des bovins en Australie a buté sur l'absence de bousiers capables de traiter les bouses de vache, les espèces locales étant spécialisées dans le traitement des excréments des kangourous. Il a donc fallu importer des bousiers européens pour éviter la stérilisation des pâturages. La valeur du travail de ces bousiers est estimée à 2 milliards de dollars par an.

Parmi ces services qui apportent plus de « valeur » que la production d'aliments et de matériaux, la régénération de l'oxygène de l'air, la fourniture et la régulation de l'eau, l'épuration, etc. ! Sans oublier d'autres services, moins « chers » que les premiers, mais tout aussi indispensables : régulation du climat, pollinisation, formation des sols, etc. Et que dire du « service » récréatif et culturel ? S'il fallait un jour tout produire nous-mêmes, quel niveau de vie aurions nous ?

C'est dire ce que les perturbations accélérées d'une biodiversité qui nous est encore largement inconnue peuvent représenter de dangers tout aussi inconnus. En la matière une plus grande prudence s'impose.

### **III.4. Biodiversité et vigilance : les bioindicateurs**

Les activités humaines conduisent à libérer dans l'environnement un nombre sans cesse croissant de substances chimiques. Certaines, comme les nitrates et les phosphates, sont, hélas, en concentration importante dans de nombreux milieux aquatiques et peuvent être facilement suivis par des méthodes physicochimiques simples et peu coûteuses. Même si des efforts importants sont encore à accomplir, on peut espérer que ces « macropolluants » seront à l'avenir de mieux en mieux contrôlés.

La situation est très différente dans le cas des « micropolluants », substances présentes à faible concentration mais de plus en plus nombreuses et, en outre, chimiquement très diverses. On cite souvent le chiffre de 100 000 molécules différentes produites par l'homme et susceptibles de se retrouver dans l'environnement et 350 molécules nouvelles seraient produites chaque année. Outre cette diversité, leur dosage est souvent coûteux et leurs effets biologiques mal connus. En effet, seules certaines molécules sont soumises à une obligation d'évaluation a priori de leurs effets toxicologiques<sup>28</sup> et, même dans ce cas, les tests sont réalisés sur un nombre restreint d'espèces et pendant des périodes relativement courtes. En outre, alors que pour des molécules « classiques » on observe une relation assez simple entre les doses et les effets biologiques -augmentation régulière de l'effet en fonction de la dose-, qui permet donc de fixer simplement des limites admissibles de concentration, les courbes de réponse des micropolluants sont souvent plus complexes, avec par exemple des relations en « U inversé », c'est-à-dire des effets biologiques maximaux pour des concentrations faibles ou moyennes. De ce fait, la définition de doses admissibles à partir de l'extrapolation des effets observés à des doses élevées devient délicate. Enfin, la question complexe des interactions éventuelles entre toutes ces molécules (ou leurs produits de dégradation) et des effets à long terme de ces mélanges ne peut à l'évidence être abordée par ces tests a priori.

C'est pourquoi le suivi de certaines composantes de la biodiversité peut jouer un rôle utile, car il permet une double intégration : l'intégration des effets conjoints des différentes substances et l'intégration dans le temps de ces effets, ce que des dosages chimiques ponctuels ne permettent pas. On peut citer comme exemples récents la réduction des populations de bulots de la mer du Nord, du fait d'anomalies de leurs organes génitaux, attribuées finalement aux peintures antisalissures des bateaux, le déclin de la population des alligators de Floride, du fait d'une pollution au DDT causant une réduction de la taille du

---

<sup>28</sup> C'est tout le débat actuel autour du programme REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals - enregistrement, évaluation, autorisation et restrictions relatifs aux substances chimiques) de l'Union européenne, qui vise à mettre en place un système global d'évaluation et de suivi pour toutes les molécules dont la production serait supérieure à un certain seuil.

pénis ou enfin le développement de poissons intersexués en Grande-Bretagne et en France, sous l'effet de polluants mimant les hormones stéroïdes.

Même si la perturbation d'une fonction physiologique chez une espèce donnée ne constitue pas forcément une indication d'un risque pour l'homme, ce rôle de « sentinelle » que peut jouer la biodiversité peut à l'avenir se révéler précieux, en fournissant des signaux d'alerte globaux qu'il conviendra ensuite d'analyser plus finement.

#### **IV. La stabilité : une dynamique permanente**

Le contexte de l'étude de la biodiversité a profondément changé depuis le début du 18<sup>e</sup> siècle. Il s'agissait alors d'étudier une situation supposée stable, de visiter l'œuvre du Créateur, et d'en récolter les bienfaits. Ainsi, lorsque Louis XIV envoie en 1700 le botaniste Joseph Pitton de Tournefort en expédition au Levant, ce dernier ne manque pas de gravir le mont Ararat, à la recherche d'éventuels restes de l'Arche de Noé.

La découverte des faunes disparues, puis les hypothèses transformistes du 19<sup>e</sup> siècle, n'ont finalement que peu modifié ce point de vue, dès lors que les espèces apparaissaient, à l'échelle humaine, des entités stables<sup>29</sup>. En outre, le fait d'attribuer la disparition des faunes passées à des événements cataclysmiques (déluges, météorites géantes,...) pouvait conforter l'idée qu'entre ces événements rarissimes, les écosystèmes étaient des états d'équilibre stable au sens dynamique du terme, c'est-à-dire pouvant revenir à cet état d'équilibre après des perturbations éventuelles.

L'un des grands changements conceptuels de la fin du 20<sup>e</sup> siècle a été à notre avis l'abandon -ou du moins la relativisation- de cette notion d'état d'équilibre en biologie et en écologie. Cette évolution résulte à la fois d'observations empiriques et de progrès conceptuels.

Sur le plan empirique, l'observation fine des écosystèmes et de leur histoire a conduit à mettre en évidence le caractère souvent contingent de leur état à un instant donné, résultant de phénomènes historiques (arrivées ou disparitions d'espèces, "catastrophes" plus ou moins périodiques, impacts durables des environnements passés, etc.). Ainsi, le faible nombre d'espèces de poissons dans les eaux douces des pays d'Europe du Nord (une quarantaine en moyenne), qui contraste avec la grande diversité des pays méditerranéens (par exemple près de 100 espèces en Grèce et plus de 150 espèces en Turquie) s'explique essentiellement par le rôle de refuge qu'a joué le sud de l'Europe lors des dernières glaciations et reflète donc une dynamique de recolonisation qui est peut-être encore en cours. De même, la structuration complexe actuelle des peuplements de chênes blancs européens, ensemble comprenant huit espèces, ne peut se comprendre qu'en retraçant les routes de migration depuis la fin de la dernière glaciation, mais aussi les importantes interventions humaines sur ces peuplements. De ce fait, un état observé d'un écosystème, même considéré comme "naturel", ne peut être considéré sans prudence comme un "état de référence" qu'il convient de préserver ou, en cas de perturbations humaine ou naturelle, de "restaurer".

Toujours sur un plan empirique, de nombreuses opérations de protection ou de restauration visant en particulier à diminuer l'impact anthropique ont montré leurs limites, avec notamment la disparition d'espèces inféodées, souvent de manière complexe, aux activités humaines. Le narcisse des Glénans est un exemple emblématique de cette difficulté. Cette espèce endémique était menacée par la surexploitation (arrachage des bulbes) et a été

---

<sup>29</sup> La fameuse étude par Cuvier des momies d'ibis des tombes de Thèbes, en tous points semblables aux ibis actuels, même si elle ne constitue pas, comme le souhaitait Cuvier, un argument contre le transformisme, illustre cette vision.

classée parmi les espèces protégées par le Convention de Berne de 1979. Mais il est apparu que sa persistance n'était possible que si la fauche ou le pâturage des moutons maintenaient une prairie rase, d'où la nécessité d'encourager ces pratiques. En outre, le développement excessif des goélands, eux-mêmes protégés, conduit à un enrichissement du sol en azote qui semble préjudiciable à cette plante. On peut d'ailleurs étendre cette observation à de nombreuses plantes de prairies (orchidées, flore alpine), qui dépendent fortement du maintien d'une pelouse pâturée.

Sur un plan conceptuel, les progrès de la modélisation et la possibilité de suivre le comportement pas à pas d'un système -au lieu d'être seulement à même de décrire et de calculer son éventuel état final- ont montré combien des équilibres stables ne constituaient que des cas très particuliers d'évolution de systèmes. Des modèles de comportements fluctuants plus ou moins périodiques, voire chaotiques, ont été développés par la dynamique des populations et des peuplements. Ils ont montré en particulier qu'il n'était pas nécessaire de rechercher systématiquement l'influence d'un facteur environnemental majeur pour expliquer une évolution importante d'un écosystème. En effet, des phénomènes non-linéaires (effets de seuils, points critiques, etc.) peuvent conduire à deux évolutions très différentes pour deux systèmes initialement similaires. Popularisée par René Thom<sup>30</sup> avec la notion mathématique de « catastrophe », cette nouvelle vision s'est peu à peu étendue à de nombreux domaines des sciences, en particulier de la biologie.

De manière moins radicale, ces approches ont permis également de montrer que le temps nécessaire pour atteindre un nouvel équilibre stable était souvent très supérieur à la durée de stabilité des paramètres biologiques ou écologiques déterminants. De ce fait, l'état d'équilibre, même s'il existe, apparaît comme une abstraction sans grande pertinence concrète.

En outre, la manière de considérer les perturbations a elle-même changé, dès lors qu'il est apparu que des événements comme les incendies, les inondations, les tornades, étaient nécessaires à la régénération ou à la dissémination de certaines espèces, qui disparaissaient donc dans des milieux trop « protégés ». La décision de ne plus lutter contre les incendies dans les parcs nationaux américains, sauf en cas de danger pour les populations, illustre bien cette nouvelle perception du rôle parfois bénéfique des perturbations<sup>31</sup>. Certains ont même proposé de s'inspirer du mode d'action des incendies pour développer des pratiques durables d'exploitation des forêts : c'est le concept de « sylviculture simulée », qui constitue donc un autre exemple de biomimétisme !

Cet intérêt pour les perturbations temporelles s'est accompagné d'une prise en compte croissante de l'hétérogénéité spatiale. Comme nous l'avons vu, le passage du concept d'écosystème, considéré comme homogène en tout point, à celui de paysage, constitué de multiples discontinuités susceptibles de moduler la structure de la biodiversité, est une évolution forte et assez récente de la pensée écologique. Se dégage donc peu à peu une vision selon laquelle l'hétérogénéité spatio-temporelle d'un milieu serait le moteur d'une dynamique permanente, elle-même nécessaire au maintien et à l'évolution de la biodiversité.

---

<sup>30</sup> René Thom (1923-2002), mathématicien français, fondateur de la théorie des catastrophes à partir de 1968, avait reçu auparavant la médaille Field dès 1958 pour des travaux antérieurs sur la topologie.

<sup>31</sup> On se gardera bien sûr de généraliser cette observation à l'ensemble des perturbations, en particulier celles dues aux activités humaines.

Cette nouvelle vision rompt avec une longue tradition de l'écologie : la notion de « climax », terme désignant la structure d'équilibre -en termes de composition et d'abondance relative des espèces- d'une communauté végétale a été un concept majeur tout au long du 20<sup>e</sup> siècle. Confronté à l'observation de perturbations naturelles récurrentes des communautés au niveau local empêchant d'atteindre cet état d'équilibre, certains théoriciens ont réintroduit la notion d'équilibre au niveau du « paysage » (ensemble des unités écologiques interconnectées d'une région) en dénommant « métaclimax » l'équilibre dynamique entre ce paysage et un régime de perturbation supposé stable à cette échelle.

Cette nouvelle perspective amène donc à considérer la situation instantanée d'une population, d'une espèce ou d'un écosystème non pas comme un état stable et optimum mais comme un point sur une trajectoire, qui peut n'être elle-même que l'une des trajectoires possibles. De ce fait, la notion de gestion durable prend une connotation très différente de celle relative aux ressources non renouvelables, (pétrole, minerais, etc.), pour lesquelles elle implique essentiellement une gestion économe permettant aux générations futures d'accéder à ces ressources. Dans le cas de la biodiversité, la question devient celle de « l'adaptabilité durable », à savoir l'identification des composantes ou des processus d'un système écologique qu'il convient de préserver, renforcer, modifier pour que son évolution ne handicape pas, voire bénéficie aux générations futures. Conserver la nature, c'est donc d'abord lui conserver ses potentialités évolutives.

Un tel énoncé permet de mesurer l'ampleur du défi posé à la science : abandonner le concept de "l'équilibre harmonieux des écosystèmes", c'est accepter de soumettre à un examen critique l'état d'un écosystème, c'est-à-dire reconnaître la possible légitimité d'une certain nombre de pratiques (introduction ou éradication d'espèces, modification des habitats, etc.) jugées jusqu'alors regrettables, car "modifiant l'équilibre" ou ne visant pas à revenir à un état de référence antérieur. Mais en même temps, il importe de reconnaître que ce nouveau paradigme « tout est perturbation » n'est pas non plus exempt de connotation idéologique et peut conduire, à l'extrême, à une « déconstruction » de la nature nous dédouanant de toute éthique environnementale.

De manière plus fondamentale, cette prise en compte de la dimension historique et contingente des écosystèmes est parfois refusée par certains chercheurs travaillant sur la biodiversité, car susceptible d'affaiblir le statut scientifique de leurs études : la description, même détaillée, d'évènements uniques, non reproductibles, est souvent considérée comme ne permettant guère la découverte de lois de portée générale.

## **V. La fragilité : la "crise de la biodiversité".**

Même si, comme nous venons de le voir, les écosystèmes sont des ensembles en évolution permanente, l'idée d'un certain équilibre global entre les entrées et les sorties, entre les apparitions et les disparitions d'espèces, était admise implicitement jusqu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle. En conséquence, les mouvements de « protection de la nature » se concentraient essentiellement sur des sites remarquables, choisis souvent sur des critères plus esthétiques que naturalistes, comme le mouvement des peintres de Barbizon, à l'origine de la création, en 1853, de la première aire protégée.

Le fait que la biodiversité pouvait être menacée, que des espèces disparaissaient à une vitesse très supérieure à celle présidant à l'évolution "naturelle", est donc pour l'essentiel un constat de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Nous évoquerons donc successivement les données disponibles sur cette vitesse actuelle d'extinction des espèces et d'érosion de la biodiversité,

les principales causes de cette érosion et, enfin, les conséquences possibles des changements climatiques prévus dans le siècle qui commence.

### III-1. Les extinctions passées et actuelles.

On attribue à Buffon<sup>32</sup> la première reconnaissance d'une espèce disparue, lorsqu'il écrit, en 1778 dans "*Les époques de la Nature*", à propos des ossements de mammouths : « *Je dois donc pouvoir prononcer avec fondement que cette très grande espèce animale est perdue* ». Ce qui était à l'époque une révolution conceptuelle est aujourd'hui une évidence : la quasi-totalité des espèces ayant peuplé notre planète a aujourd'hui disparu et les espèces considérées comme des "fossiles vivants" -le nautilaire, la lingule, la limule ou le coelacanthéne- ne peuvent être considérées sans réserves, malgré leur ressemblance morphologique, comme appartenant effectivement à la même espèce que leurs homologues fossiles de l'ère primaire.

Cette disparition des espèces n'est cependant pas régulière. Elle est en effet marquée par des "crises d'extinction", que l'on cherche à relier à des événements géologiques ou astronomiques majeurs. Cinq crises principales ont été aujourd'hui recensées au cours des 500 derniers millions d'années, dont la dernière, la plus médiatisée mais peut-être pas la plus forte, est celle de la fin de l'ère secondaire, avec en particulier la fin des dinosaures.

Outre cette fluctuation temporelle, il semble exister une variation de la "durée de vie" des espèces, que certains auteurs cherchent à relier à des traits de vie particulier de ces espèces : les espèces de grande taille, prédatrices ou symbiotiques, seraient ainsi plus vulnérables que des espèces de bas niveau dans la chaîne alimentaire ou de petite taille.

Ces estimations de durée de vie moyenne de espèces au cours des temps géologiques sont entachées d'une très forte incertitude, liée notamment à l'imprécision de la notion d'espèce pour des groupes fossiles et à la sur-représentation des espèces ayant eu une longue durée de vie. Certains<sup>33</sup> estiment que 18% seulement des genres ont été observés et que leur durée de vie moyenne n'est pas de 4 millions d'années -valeur calculée pour les seuls genres observés- mais d'environ 220 000 ans. Ces travaux permettent cependant d'avancer un ordre de grandeur de quelques millions d'années (on cite souvent le chiffre de 5) pour les espèces animales, avec des valeurs plus fortes pour les invertébrés que pour les vertébrés et les plantes.

L'estimation actuelle du taux de disparition des espèces est plus aisée à obtenir, même si elle ne concerne qu'un petit nombre de groupes. L'homme a en effet pu observer des disparitions d'espèces, souvent concomitantes de sa colonisation des milieux, comme la disparition des oiseaux non volants des îles du Pacifique et de l'Océan Indien, dont le Dodo, oiseau coureur de l'île Maurice, disparu au milieu du 18<sup>e</sup> siècle<sup>34</sup>, constitue l'exemple emblématique. Si elle a commencé il y a plusieurs siècles, cette disparition des espèces est difficile à chiffrer précisément avant le 20<sup>e</sup> siècle, du fait du caractère lacunaire des

---

<sup>32</sup> Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), naturaliste, mathématicien, biologiste, cosmologiste et écrivain français est surtout célèbre pour son œuvre majeure, « L'Histoire naturelle, générale et particulière », en 36 volumes parus de 1749 à 1789, dont huit après sa mort, grâce à Bernard Lacépède. Il y rassemble tout le savoir de l'époque dans le domaine des sciences naturelles. C'est dans cet ouvrage qu'il relève les ressemblances entre l'homme et le singe et la possibilité d'une généalogie commune. Ses théories ont influencé des générations de naturalistes, parmi lesquels notamment Lamarck et Darwin.

<sup>33</sup> Comme Hubbell (2001), qui réinterprète les données de Raup (1991) sur les invertébrés marins fossiles du primaire.

<sup>34</sup> Le dernier exemplaire serait mort sur un navire français entre 1735 et 1746. D'autres sources indiquent une disparition de l'île vers 1690.

informations antérieures. Par contre, on dispose d'informations précises pour le 20<sup>e</sup> siècle, en particulier pour les plantes et les vertébrés. En étudiant la répartition entre les différents groupes des quelques 500 espèces dont la disparition a été enregistrée et en comparant ces effectifs à ceux attendus pour une durée de vie "naturelle" des espèces de 1 à 10 millions d'années, il apparaît que l'érosion actuelle, de l'ordre de 0,1 à 1 % par siècle, est plusieurs dizaines, voire centaines de fois supérieure à l'érosion "naturelle" des périodes géologiques.

Une autre méthode, indirecte, est fondée sur la relation empirique entre la taille d'un habitat et le nombre d'espèces qu'il est susceptible d'abriter. Elle permet, connaissant le taux annuel de réduction d'un écosystème donné (par exemple les forêts tropicales d'Amazonie ou d'Asie du Sud-Est), d'en déduire le taux de disparition d'espèces associées à cet écosystème. Cette méthode fournit des estimations encore plus préoccupantes de la vitesse d'érosion de la biodiversité, de l'ordre de 0,1 à 0,3 % par an, c'est-à-dire 1000 à 10 000 fois supérieures aux taux d'extinction naturelle.

En outre, cette disparition des espèces n'est que le signe le plus visible des menaces pesant actuellement sur la biodiversité. Pour préciser l'analyse, l'Union Mondiale pour la Nature<sup>35</sup> a proposé plusieurs catégories, allant de "non menacée" à "critique"<sup>36</sup>. Cette classification, appliquée aux vertébrés, montre que l'ensemble des espèces considérées comme "menacées" ou "critiques" -et donc susceptibles de disparaître à court terme- est très supérieur à celui des espèces aujourd'hui éteintes, en particulier pour les amphibiens, les reptiles et les poissons. En outre, pour des groupes comme les oiseaux, suivis depuis 1988, la situation semble se dégrader, le nombre d'espèces dans les catégories "menacées" à divers titres étant en augmentation. Cette évolution est globalement estimée au niveau mondial par le « Red List Indice », qui a diminué de 16% de 1988 à 2004.

Une autre approche, basée sur les indicateurs d'abondance, a été développée sur les oiseaux nicheurs européens, en Grande Bretagne depuis 1970<sup>37</sup>, puis en France en 1988. Elle montre, sur une centaine d'espèces, la raréfaction des populations dans la plupart des milieux, en particulier les milieux agricoles : les 20 espèces britanniques inféodées à ces milieux ont vu, en trente ans, leurs effectifs baisser de 40%. En France, la baisse est de 25% depuis 1985.

Une approche similaire est celle du « Living Planet Index ». Cet index<sup>38</sup>, basé sur l'abondance numérique estimée de 3 000 populations représentant 1 100 espèces de vertébrés, est calculé depuis 1970. Il aurait, depuis cette date, baissé de 30% pour les espèces terrestres et marines et de 50% pour les espèces d'eau douce.

Soulignons enfin que l'essentiel des données porte sur la diversité des espèces. Les autres niveaux d'organisation évoqués dans la seconde partie, en particulier la diversité des populations et des individus au sein des espèces, ne fait l'objet que d'études ponctuelles, nombreuses, mais difficiles à relier dans la durée.

Quant à l'évolution de la diversité écosystémique, elle n'est observée qu'indirectement, à travers le suivi de l'extension de certains habitats, comme les zones humides ou les forêts. Un préalable à une étude des évolutions à l'échelle mondiale est sans doute la définition d'une

---

<sup>35</sup> Ex Union Internationale pour la Conservation de la Nature, U.I.C.N

<sup>36</sup> Voir le site [www.redlist.org](http://www.redlist.org)

<sup>37</sup> Voir le site de la Royal Society for the Protection of Birds : [www.rspb.org.uk](http://www.rspb.org.uk)

<sup>38</sup> Index développé conjointement par l'UNEP, Programme des Nations Unies pour l'Environnement et le WWF, World Wildlife Fund. Voir le site [www.worldwildlife.org/about/lpr2004.pdf](http://www.worldwildlife.org/about/lpr2004.pdf)

typologie des écosystèmes, à l'image de la base CORINE de l'Union Européenne<sup>39</sup> qui propose une classification basée sur les espèces végétales représentatives des différents habitats. Ces habitats sont décrits de manière détaillée dans les « Cahiers d'habitats », élaborés par le Muséum national d'Histoire naturelle<sup>40</sup>.

### **III.2. Les causes de l'érosion de la biodiversité.**

L'importance de l'érosion actuelle de la biodiversité conduit à l'évidence à incriminer les activités humaines, au sens large, dans cette évolution.

Le premier type d'activités que l'on peut légitimement interroger est l'exploitation directe de certaines espèces, en particulier des mammifères et des oiseaux, dont les caractéristiques biologiques (longue durée de vie, faible fécondité) limitent le surplus exploitable durablement. Les exemples des baleines, des éléphants, des bisons d'Amérique du Nord, des grands oiseaux non volants<sup>41</sup> attestent de la capacité de l'homme de réduire considérablement, voire de faire disparaître certaines espèces.

Plus récemment, cette question de la surexploitation s'est étendue aux autres vertébrés, en particulier aux poissons, alors que leur forte fécondité constituait a priori une caractéristique autorisant des taux de prélèvement élevés. Les pêches mondiales ont en effet progressé de manière considérable depuis les années cinquante : selon les statistiques de la FAO<sup>42</sup>, elles sont passées de moins de 20 millions de tonnes dans les années cinquante à plus de 90 millions de tonnes dans les années quatre-vingt dix.

Au cours des dix dernières années, la progression s'est poursuivie à un rythme plus lent, mais il est apparu que l'essentiel de cette croissance était due à une augmentation des captures chinoises, que certains biologistes ont été appelés à dénoncer comme peu vraisemblable. Ainsi corrigées, les statistiques montrent un lent déclin depuis le milieu des années quatre-vingt et l'on estime aujourd'hui que plus des trois quarts des stocks de poissons pêchés sont pleinement exploités ou surexploités. C'est en particulier le cas des stocks de poissons d'eaux profondes froides, comme le grenadier, mis en exploitation assez récemment grâce à de nouveaux engins de pêche. Abondants mais à renouvellement très lent, ces stocks se sont souvent effondrés en moins de deux décennies.

En outre, ces données quantitatives ont longtemps masqué des évolutions qualitatives préoccupantes, comme la réduction de la taille des individus, la modification progressive de la composition spécifique des communautés et une dérive des écosystèmes vers une majorité d'espèces de bas niveau dans la chaîne alimentaire. Ces phénomènes rendent problématique la restauration des stocks, même en cas d'arrêt de leur exploitation. On estime que cette faible perception de la dérive des écosystèmes est liée au fait que les biologistes des pêches ont souvent pris comme seule référence -considérée comme un état initial satisfaisant- la situation observée au début de leur carrière<sup>43</sup>.

---

<sup>39</sup> Voir le site [www.natura2000.espaces-naturels.fr](http://www.natura2000.espaces-naturels.fr)

<sup>40</sup> Disponibles sur <http://natura2000.environnement.gouv.fr/habitats/cahiers.html>

<sup>41</sup> Comme par exemple les Dodos de l'île Maurice, Genyornis australiens, Dinornis de Nouvelle Zélande, Silviornis de Nouvelle Calédonie, etc.

<sup>42</sup> Voir [www.fao.org](http://www.fao.org)

<sup>43</sup> C'est ce qu'il appelle le « syndrome de la dérive de la ligne de base », en anglais : « Shifting baseline syndrome ». Voir une présentation plus détaillée sur [www.oceanconservancy.org](http://www.oceanconservancy.org)

Sans nier l'impact de la surexploitation sur la raréfaction, voire la disparition de certaines espèces, l'attention des scientifiques s'est peu à peu déplacée sur d'autres causes, indirectes mais tout aussi -voire plus- déterminantes de réduction de la biodiversité : la destruction des habitats, d'une part, les introductions d'espèces d'autre part.

La destruction des habitats n'est souvent perçue que dans sa forme la plus radicale : déforestation, mise en place de barrages, assèchement de zones humides, etc. En fait, son effet se fait sentir dès que la taille d'un habitat commence à se restreindre. Ce phénomène a été modélisé dans le cadre de la théorie insulaire<sup>44</sup> : les grandes surfaces sont plus riches en espèces que les petites. C'est par exemple le cas des oiseaux nicheurs des îles méditerranéennes, dont le nombre d'espèces passe d'une vingtaine dans les petites îles à plus d'une centaine en Sicile ou en Sardaigne.

Le corollaire de cette approche est que la réduction des habitats conduit inéluctablement à une réduction de la biodiversité globale au sein de ces habitats, selon une loi exponentielle dite « Loi d'Arrhénius »<sup>45</sup>. On estime en l'appliquant qu'une réduction de la taille d'un habitat d'environ 10 % aboutit à une perte globale de biodiversité d'environ 3 %. Une réduction d'un habitat de 50 % n'induit une perte que de 20 %. C'est sur de tels modèles, qui fournissent des estimations de perte de la biodiversité beaucoup plus élevées que les recensements directs, que sont basées les analyses précédemment évoquées annonçant des valeurs d'érosion 1 000 à 10 000 fois supérieures à celles des rythmes naturels.

Indiquons cependant que ces modèles ne sont pas extrêmes, car ils supposent une possibilité de recolonisation de ces habitats réduits à partir de "refuges" continuant à abriter des différentes espèces. Si ces refuges disparaissent, autrement dit si les "îles" sont définitivement isolées, on doit considérer une relation de stricte proportionnalité entre la taille résiduelle des habitats et le nombre d'espèces abritées, ce qui augmente encore les estimations de la vitesse actuelle d'érosion de la biodiversité.

Une conséquence de cette relation de stricte proportionnalité est de remettre en question les stratégies de protection de la biodiversité basées sur des "réserves" (Parcs nationaux, réserves de biosphère, etc.). En effet, dans le modèle insulaire classique, un taux de mise en réserve limité, de l'ordre de 20 %, permettrait de conserver une fraction importante (plus de 60 %) de la biodiversité. Dans ce modèle proportionnel, cette fraction n'est que plus que de 20 %. D'où la nécessité d'une autre stratégie, intégrant la conservation de la biodiversité au sein de la nature "ordinaire", et donc une interaction avec les autres activités humaines.

Indiquons enfin que cette réduction des habitats peut prendre des formes beaucoup plus surnoises que leur disparition pure et simple. Ainsi, dans les milieux aquatiques, les obstacles physiques à la migration ou le comblement des substrats pierreux des zones amont des rivières par les sédiments argileux issus de l'érosion des sols agricoles rendent ces zones impropres à la reproduction de certains poissons comme les truites ou les saumons, alors que la qualité physico-chimique de l'eau ne semble pas affectée. Il en est de même des pollutions diverses, qui peuvent exclure de fait de nombreuses espèces de leurs habitats naturels. Ainsi, la moule perlière des rivières d'Europe *Margaritifera margaritifera*, qui représentait parfois

---

<sup>44</sup> De Mc Arthur et Wilson (1967), dont Alexander von Humbolt avait formulé dès 1807 l'un des principes.

<sup>45</sup> Du type  $N = CS^Z$  (S est la surface de l'habitat, N le nombre d'espèces, C et Z des constantes à ajuster selon le groupe d'espèces et les milieux). Svante August Arrhenius (1859-1927) chimiste suédois prix Nobel de chimie en 1903 a été l'un des plus ardents promoteurs de cette relation, même si l'on attribue la première publication dans ce domaine à une étude remontant à 1859 du botaniste anglais Hewett Cottrell Watson (1804-1881) sur les plantes de Grande-Bretagne ; il estima alors Z à 0,11.

des peuplements considérables et avait fourni au Moyen-Âge les perles de nombreux bijoux, a quasiment disparu au début du 20<sup>e</sup> siècle, dès que les teneurs en nitrates des eaux ont dépassé 1 mg/l, concentration néfaste à la reproduction de cette espèce<sup>46</sup>. Autre exemple, l'évolution précédemment évoquée des écosystèmes côtiers sous le double effet de la surexploitation des stocks et de l'impact des engins de pêche industrielle, en particulier les chaluts, sur les communautés aquatiques et leurs habitats : la modification de l'écosystème est telle que des mesures de réduction, voire de cessation de l'exploitation de certains stocks, comme la morue, ne se traduisent pas par une restauration des populations de ces espèces.

La seconde cause indirecte de l'érosion de la biodiversité est celle, qui peut sembler a priori paradoxale, de l'introduction d'espèces. Ce phénomène n'est, certes, pas nouveau : les grands mouvements des plaques océaniques -rencontre de l'Inde et de l'Eurasie, il y a 80 millions d'années, de l'Afrique et de l'Eurasie, il y a 17 millions d'années- ont certainement conduit à la mise en présence des faunes et flores de ces différents ensembles. Il a pris cependant depuis le néolithique, *a fortiori* au cours des deux derniers siècles, une ampleur inédite. Le taux d'invasions biologiques en France au cours de la période 1945-2002 serait 200 fois supérieur à celui estimé avant le 17<sup>e</sup> siècle !

La manière de considérer ces introductions d'espèces s'est en effet beaucoup modifiée au cours du temps, le 18<sup>e</sup> et, surtout, le 19<sup>e</sup> siècle étant marqués par une volonté délibérée « d'enrichissement » de notre flore et de notre faune : la Société Nationale d'Acclimatation<sup>47</sup>, dont est issue en droite ligne l'actuelle Société Nationale pour la Protection de la Nature<sup>48</sup>, attribuait chaque année un prix à une acclimatation réussie ! Ainsi, en 1874, cette société offrait un prix de 500 FF à la personne qui acclimaterait en France le saumon de Californie *Oncorhynchus tshawytscha* (Mazeaud, 1981). Ce n'est donc qu'assez récemment qu'une attitude plus critique s'est développée vis à vis de ces introductions.

En effet, si certaines de ces introductions s'intègrent dans les faunes et les flores locales sans avoir de conséquences négatives évidentes, comme l'extension du lapin en Europe du Nord et ont même contribué à augmenter la biodiversité locale, d'autres ont des conséquences clairement néfastes, en particulier dans les milieux insulaires. Ainsi, l'introduction de gastéropodes comme l'achatine (*Achatina fulcata*) dans les îles polynésiennes semble à l'origine de la disparition de nombreuses espèces autochtones et spécifiques de chacune de ces îles, comme les gastéropodes du genre *Partula*. De même, l'introduction en Europe de la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), ou de la crépidule (*Crepidula fornicata*) venant d'Amérique du Nord, conduit à des phénomènes de compétition trophique ou spatiale au détriment des espèces indigènes de mollusques bivalves, comme la coquille Saint-Jacques.

Un autre exemple, très controversé, est l'introduction dans les grands lacs africains comme le lac Victoria d'un poisson prédateur, la perche du Nil (*Lates niloticus*). Cette introduction aura en effet permis le développement d'une pêche industrielle prospère (pour certains...), mais aurait eu également des impacts très négatifs sur la faune piscicole endémique, particulièrement riche, de ces milieux.

---

<sup>46</sup> Rappelons que le niveau accepté pour la consommation humaine, et désormais atteint ou dépassé dans de nombreuses rivières et nappes souterraines, est de 50 mg/l.

<sup>47</sup> Fondée en 1854 par Geoffroy Saint-Hilaire, du Muséum, sous le nom de « Société Impériale Zoologique d'Acclimatation ».

<sup>48</sup> Elle n'a pris ce nom qu'en 1960, après s'être appelée un temps « Société Nationale d'Acclimatation et de Protection de la Nature ».

En outre, les introductions d'espèces peuvent conduire à favoriser la dispersion d'autres espèces, déjà présentes mais qui peuvent devenir invasives. Ainsi, l'invasion de nombreuses îles méditerranéennes par les « griffes-de-sorcière » (plante crassulante du genre *Carpobrotus*, originaire d'Afrique du Sud) serait liée à une dissémination des graines par les rats, lapins et chats, consommateurs des fruits. De même, les grandes épidémies de peste en Europe occidentale auraient été rendues possibles par l'extension de l'aire de répartition du rat noir à partir du Moyen-Orient dès l'époque romaine, avec adaptation du bacille de la peste à des puces endémiques européennes.

Enfin, même lorsque les introductions d'espèces conduisent dans un premier temps à augmenter la biodiversité locale ou régionale, c'est souvent à travers une « banalisation » des biocénoses (extension d'espèces cosmopolites) dont les conséquences à long terme sont difficiles à prédire.

Ces introductions d'espèces ne résultent en outre que rarement de politiques délibérées. Un aménagement comme le canal de Suez a conduit à l'implantation en Méditerranée orientale de près de 300 espèces issues de la mer Rouge. De leur côté, les pétroliers, qui ne peuvent pas naviguer à vide, remplissent leurs ballasts d'eau de mer pour le voyage de retour -12 milliards de tonnes sont ainsi transférées chaque année- et transfèrent en même temps d'un océan à l'autre des centaines d'espèces marines. Ce transport intempestif est sans doute à l'origine de l'introduction de très nombreuses espèces dans les zones côtières. C'est pourquoi les politiques ne visant qu'à limiter les introductions volontaires d'espèces sont sans doute insuffisantes pour faire face à cette "mondialisation" de la biodiversité.

### **III.3. Les perspectives du changement climatique.**

Quels sont les enjeux que représente le changement climatique annoncé au cours du 21<sup>e</sup> siècle et dont les prémisses se manifestent déjà, en particulier à travers l'avancement des dates de ponte ou des modifications des comportements migratoires des oiseaux ? On peut commencer cette réflexion par quatre constats :

- Les valeurs de réchauffement annoncées<sup>49</sup>, de l'ordre de 2 à 6 degrés en un siècle, sont sans commune mesure avec celles observées depuis 2000 ans et la rapidité de ces évolutions semble très supérieure aux vitesses de réchauffement qui peuvent avoir été calculées lors de la fin de la dernière période glaciaire.
- Quelles que soient la responsabilité de l'homme dans cette évolution et les mesures qui pourront être prises, le réchauffement va, du fait de la longue durée de vie des molécules de gaz carbonique dans l'atmosphère -environ un siècle-, se poursuivre au-delà du 21<sup>e</sup> siècle avant, éventuellement, de se stabiliser.
- Les évolutions de la température et de la pluviométrie ne seront pas homogènes sur la planète et se traduiront par une mosaïque de situations, en particulier dans la zone intertropicale, qui verra à la fois le développement des zones plus sèches (une grande partie de l'Amazonie, l'Afrique de l'Ouest) et de zones plus humides (la majorité de l'Asie du Sud-est). En outre, au-delà de ces évolutions moyennes des paramètres, l'augmentation de la fréquence et de l'ampleur des phénomènes extrêmes (tempêtes, sécheresses...) pourraient également caractériser ces changements globaux.

---

<sup>49</sup> Par exemple dans les rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/)

- Cette évolution des paramètres climatiques majeurs (température, pluviométrie) s'accompagnera d'autres modifications, elles aussi rapides, pouvant avoir des conséquences sur les écosystèmes : diminution du taux de calcification des organismes marins, montée -de l'ordre de 3 à 5 mm par an- du niveau des mers.

Par rapport à ces évolutions, que peut-on dire des capacités d'adaptation de la biodiversité ? Pour examiner cette question, il convient de distinguer différents niveaux de réponse, qui se différencient à la fois par la rapidité et par l'ampleur possible de l'adaptation qu'ils permettent.

Le premier niveau est celui des capacités d'adaptation individuelles, qui peuvent elles-mêmes se décomposer en deux processus distincts : l'adaptation physiologique, qui permet à une espèce animale de vivre dans une certaine plage de variation des paramètres environnementaux, et l'adaptation éco-éthologique<sup>50</sup>, qui verra l'animal rechercher un milieu plus favorable, soit en changeant de mode de vie (par exemple en passant d'une vie diurne à une vie nocturne), soit en migrant. Ce niveau permet a priori une adaptation relativement rapide. En ce qui concerne son ampleur, nous sommes amenés à souligner la faiblesse de nos connaissances et de nos capacités prédictives.

En effet, pour des raisons techniques et méthodologiques, les études ont souvent été réalisées dans des conditions simplifiées (individus isolés, variation d'un seul facteur de l'environnement) et sur un nombre restreint d'espèces, modèles de laboratoire ou souches animales domestiquées. En outre, pour affiner l'analyse, ces processus ont souvent été étudiés à des niveaux d'organisation plus simples -organe, cellules en culture, voire gènes isolés- sans que les questions d'intégration au niveau de « l'organisme entier » ne soient élucidées. A titre d'exemple, les cellules en culture d'une espèce animale donnée sont souvent sensibles à de nombreux virus auxquels l'espèce est totalement résistante. Il en résulte que, plus de deux siècles après la création du terme « biologie » par Lamarck<sup>51</sup>, les modalités de réponse de la plupart des espèces à des variations de leur environnement, et notamment les limites de cette capacité adaptative, sont relativement mal connues.

Autre difficulté, la nature souvent complexe des relations entre la variation d'un facteur de l'environnement et les perturbations ressenties par un individu rend souvent peu pertinentes des études expérimentales ne faisant varier qu'un seul paramètre « toutes choses égales par ailleurs ». Ainsi, on suspecte maintenant que le dépérissement des coraux sous l'effet du réchauffement climatique ne serait pas dû à une action directe de la température, mais à l'apport de microorganismes pathogènes sous l'effet de l'augmentation de la turbulence atmosphérique. On conçoit qu'un tel phénomène ne saurait être détecté dans une approche expérimentale de l'effet de la température sur la physiologie des algues symbiotiques des coraux ! De même, l'effet du réchauffement de l'eau sur la dynamique des peuplements piscicoles lacustres s'exprime à travers des modifications complexes de la chaîne de la nutrition pouvant favoriser, au moins temporairement, les espèces d'eaux froides. Autre exemple, l'augmentation de la vitesse de croissance des arbres avec l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique est attestée par de nombreuses études

<sup>50</sup> L'éthologie (du grec : ethos : mœurs et logos : étude/science) étudie le comportement animal.

<sup>51</sup> Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, chevalier de Lamarck, biologiste français (1744-1829) participe à la transformation du Jardin du Roi en Muséum d'histoire naturelle et y devient professeur de zoologie et de paléontologie. Il a passé plusieurs années à établir une classification raisonnée des animaux invertébrés. Il invente en 1802 le mot « biologie » pour désigner la science des êtres vivants. Ses principaux ouvrages : Philosophie zoologique (1809) et Histoire naturelle des animaux sans vertèbres (1815).

expérimentales en milieu contrôlé et devrait donc conduire à augmenter la capacité des forêts à capter une partie de ces émissions. Cependant, dans les forêts tropicales, le développement concomitant des lianes et autres plantes qui croissent sur les arbres pourrait paradoxalement réduire l'importance de la biomasse aérienne en déclenchant plus précocement la chute des arbres.

En outre, l'apparition d'événements brefs mais extrêmes peut avoir des conséquences majeures : le réchauffement pendant quelques semaines des eaux profondes de Méditerranée au cours de l'été 1999 a entraîné des mortalités massives d'invertébrés fixés comme les gorgones, même si la température moyenne annuelle n'avait pas été exceptionnelle.

Il est aujourd'hui possible, grâce aux progrès des capteurs, de la télédétection, de la micro-électronique et de la micro-informatique, de dépasser ces limites techniques ou méthodologiques et de recueillir des informations précises sur un animal sauvage évoluant dans son milieu naturel, parmi ses congénères et les autres espèces, ou d'étudier la physiologie d'un arbre au sein d'un peuplement forestier. Ces techniques permettent également de suivre un individu donné pendant une période longue et donc de disposer « d'histoires de vie » individuelles, plutôt que d'avoir des valeurs moyennes et discontinues sur un groupe. Elles donnent accès à la variabilité interindividuelle et temporelle des phénotypes, variabilité qui, pour évaluer le « potentiel adaptatif » d'une espèce, peut se révéler une donnée beaucoup plus pertinente que des valeurs moyennes, en particulier lorsque la distribution d'un caractère n'est pas statistiquement normale. Ainsi, on a pu montrer que la fraction migrante d'une population de rongeurs, potentiellement disséminatrice d'agents pathogènes, se distinguait des sédentaires par plusieurs paramètres démographiques et morphologiques. Il apparaît donc aujourd'hui techniquement possible -et scientifiquement souhaitable- de donner un nouvel élan à de telles recherches.

Le second niveau, qui pourra intervenir pour des perturbations plus importantes et suppléer aux limites des capacités d'adaptation individuelles, est celui de l'adaptation génétique, par les mécanismes de la sélection darwinienne. Sans nier l'importance de ce potentiel, qui s'est exprimé tout au long de l'histoire du vivant, nous soulignerons plusieurs points qui incitent à ne pas le surestimer pour les décennies à venir.

Le premier est l'inégalité des potentiels d'adaptation entre les espèces. Les espèces à forte fécondité et à faible durée de vie, comme la plupart des invertébrés ou les espèces végétales à cycle annuel, pourront réaliser en un siècle un grand nombre de générations et soumettre à la sélection naturelle un nombre considérable de génotypes inédits, issus de la recombinaison sexuée. Par contre, les espèces qui vivent longtemps, comme les grands mammifères ou les arbres, ne produiront en un siècle que quelques dizaines d'individus, dont une fraction importante ne pourra être éliminée sans compromettre l'avenir de l'espèce.

La seconde limite est liée à l'interaction entre les espèces soumises à la sélection naturelle. Une modification des traits de vie, croissance, régime alimentaire, précocité sexuelle, etc. d'une espèce peut en effet modifier sa « niche » de manière défavorable et limiter de ce fait ses capacités d'adaptation. Ainsi, la réduction de la taille et de l'âge à la maturation sexuelle des poissons marins soumis à une pêche sélective intensive peut modifier leur place dans la chaîne alimentaire et augmenter leur vulnérabilité à la prédation. Un autre aspect de ces interactions entre espèces est celui des multiples relations de dépendance pouvant associer des espèces et conditionner leur survie. On peut citer les flores digestives originales de très nombreux animaux, les algues symbiotiques des coraux, les champignons et bactéries associées aux racines des plantes et qui leurs permettent de puiser les éléments

minéraux du sol ou de l'atmosphère, les insectes pollinisateurs parfois indispensables à la reproduction de certaines plantes, etc. De ce fait, il faudra que puisse se produire une co-évolution de ces associations pour que les espèces concernées puissent se maintenir.

Le troisième niveau d'adaptation est celui des successions écologiques, à savoir le remplacement plus ou moins brutal d'une biocénose par une autre, plus adaptée, à travers la disparition de certaines espèces et le développement d'autres, déjà présentes ou colonisant le milieu. Il ne fait aucun doute que ces successions écologiques confèrent à la biodiversité une capacité d'adaptation quasi illimitée et peut être plus rapide que celle liée à l'adaptation génétique des espèces. L'observation de formes vivantes dans les milieux les plus extrêmes - fond des océans, milieux hyper-salins, glaces polaires, sources chaudes- est là pour nous en convaincre.

La question n'est donc pas "la biodiversité pourra-t-elle s'adapter ?", mais "les systèmes qui se mettront en place seront-ils favorables à la vie humaine ?". Le basculement rapide du Sahara, il y a environ 6 000 ans, d'un écosystème de type savane abritant des activités pastorales -comme en témoignent les fresques du Tassili- à un écosystème désertique riche en espèces présentant des adaptations remarquables à ce nouvel environnement mais peu propice à la vie humaine, est un exemple de ces successions écologiques défavorables qui pourront advenir. Un autre exemple est l'évolution que nous avons évoquée des écosystèmes océaniques surexploités vers des réseaux simplifiés, avec développement des populations de méduses et réduction de la taille et de l'abondance des poissons.

En résumé, on est amené à constater les nombreuses lacunes de notre compréhension des capacités et des modalités d'adaptation de la biodiversité, face à des perturbations qui s'annoncent majeures. Cela peut conduire à des visions très contrastées, allant d'une croyance forte dans la résilience de la biodiversité à des visions beaucoup plus sombres. Ainsi, une étude récente prenant en compte la réduction des habitats et les capacités d'adaptation des espèces ont estimé que le taux d'extinction pourrait atteindre, en 2050 et selon les scénarios climatiques, entre 15 à 37 % des espèces pour des groupes comme les papillons, les vertébrés et les plantes terrestres. Certains considèrent d'autre part, en se basant sur des données collectées en Grande-Bretagne au cours des dernières décennies, que l'hypothèse d'une plus grande résistance des insectes à ces phénomènes, comparativement aux plantes et aux oiseaux, ne peut être retenue.

## **Conclusion**

Le « nouveau regard » sur la diversité du vivant que nous avons présenté intègre en fait deux prises de conscience, à la fois distinctes et complémentaires, vis-à-vis des relations de l'homme et de la nature.

La première est celle d'une méconnaissance profonde d'une nature qui nous semblait familière mais dont la structure et le fonctionnement ne sont perçus de fait que d'une manière très partielle et, sans doute, biaisée, comme nous l'avons montré dans le cas des microorganismes.

La seconde est celle du rôle désormais prédominant de l'homme, à travers l'ensemble de ces actions, dans l'évolution de cette diversité du vivant en tous points de notre planète. L'homme, de fait, agit et agit dans l'inconnu.

Ce double constat rend donc caduque une vision linéaire conditionnant l'action à l'élaboration préalable de connaissances objectives et nous mène à promouvoir la notion de

« spirale d'apprentissage », dans laquelle les trois aspects de description, de compréhension et de gestion se développent simultanément et progressent de manière interactive.

Dans cette conception, les questions « que savons-nous ? » et « que voulons-nous ? » sont donc fortement imbriquées, d'où la nécessité impérative d'impliquer l'ensemble des acteurs dans cette démarche. « Socialiser » la biodiversité plutôt que de la sacrifier, c'est le pari -par certains aspects pascalien- de ce nouveau regard.

Puisqu'on m'a demandé de vous faire une « leçon », je me permets enfin de vous recommander de consacrer votre intelligence et votre énergie de professionnels à affronter de façon responsable trois défis qui me semblent fondamentaux pour la planète :

Le premier : tentez de concevoir des « agro-écosystèmes » plus durables, combinant les savoir-faire des agronomes et des écologues. Des systèmes qui exploitent certes les ressources des diversités intra et interspécifiques, mais mieux, en prenant en compte de façon raisonnée et respectueuse les immenses et très divers « services écologiques » que nous offre la nature.

Le deuxième : efforcez-vous de gérer la biodiversité de façon intégrée dans les activités les plus diverses auxquelles vous participerez (agriculture, transports, urbanisme, santé, etc.). Respectez en les limites biologiques : utilisation des surfaces nécessaires mais pas plus, gestion des espèces et des populations pour permettre la poursuite de l'évolution, intégration utile des « catastrophes », etc. Respectez en également les limites socio-économiques : la durabilité budgétaire, les interactions entre les diversités culturelles et biologiques, etc.

Et enfin le troisième, plus général : ne vous laissez pas tenter par l'arrogance et respectez au mieux l'inconnu. N'oubliez pas que ce que nous ne connaissons pas est beaucoup plus important que ce que nous maîtrisons ; il nous faudra des siècles pour simplement décrire ce qui existe, et dans le même temps nous détruisons ce que nous ne connaissons pas à vitesse accélérée. Pensez aux besoins des générations futures !