

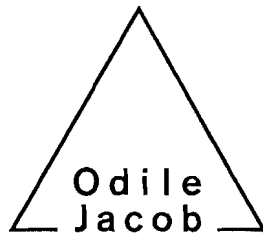
COLLÈGE DE FRANCE

sous la direction de

Jean-Pierre Changeux  
Jacques Reisse

Un monde  
meilleur  
pour tous

Colloque européen 2006



COLLÈGE DE FRANCE

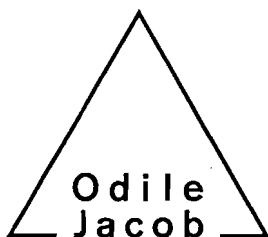
# Un monde meilleur pour tous

Projet réaliste ou rêve insensé ?

Colloque européen 2006

Sous la direction de  
**Jean-Pierre Changeux**  
et Jacques Reisse

Avec les contributions de  
Jean Barthélemy, André Berger, Gilles Boeuf, Arsène Burny,  
Mireille Delmas-Marty, Gilbert Hottois, Jacques Livage,  
Pierre de Maret, Thierry Pairault, Paul-F. Smets,  
Christine Tahon, Edwin Zaccai.



## Table

---

Ouverture par Jacques REISSE.....	7
--------------------------------------	---

### I

#### La Terre, la vie, la matière

Le réchauffement global et Kyoto en Europe par André BERGER.....	15
Quel avenir pour la biodiversité ? par Gilles BOEUF.....	47
Les matériaux : de l'art du feu à la chimie douce par Jacques LIVAGE.....	99

### II

#### Le développement durable

Le développement durable : un projet et ses résonances par Edwin ZACCAI.....	113
Développement et impacts industriels par Christine TAHON.....	127

Un urbanisme au service de la diversité culturelle et du développement durable par Jean BARTHÉLEMY.....	141
---	-----

## III

## Aspects de la mondialisation

Le défi africain par Pierre DE MARET.....	155
Les souliers rouges de l'économie chinoise par Thierry PAIRAULT.....	169
Humanisme juridique et mondialisation par Mireille DELMAS-MARTY.....	191

## IV

## Questions d'éthique

Gendarmes et valeurs par Paul-F. SMETS.....	205
Des souris et des hommes par Arsène BURNY.....	233
La philosophie à l'épreuve de la bioéthique par Gilbert HOTTOIS.....	237
Notes .....	251
Présentation des auteurs .....	273

« Un monde meilleur pour tous : projet réaliste ou rêve insensé ? »

Sous la Direction de J.P. Changeux et J. Reisse, 2008, pages 46-98, Odile Jacob, Paris.

## Quel avenir pour la Biodiversité ?

Gilles Boeuf, Laboratoire Arago, Observatoire Océanologique de Banyuls, UMR « Modèles en biologie cellulaire et évolutive », Université Pierre et Marie Curie-Paris 6/CNRS, et Réserve Naturelle de la Massane, Banyuls-sur-mer, France, gboeuf@obs-banyuls.fr

Le mot « biodiversité » (en anglais, *biodiversity*), contraction de « diversité biologique », a été créé en 1985 par l'écologue WG Rosen à l'occasion du *National Forum on Biodiversity* mis en place par la *Smithsonian Institution* et la *National Academy of Sciences* des Etats Unis puis utilisé par l'entomologiste américain EO Wilson à partir de 1986. Son sens peut être bien différemment interprété selon les situations ou les champs d'activités des différents usagers, qu'ils soient biologistes, systématiciens, écologues, agronomes, industriels, économistes, sociologues, politiques, philosophes, grand public... Ainsi, ce terme est souvent assimilé généralement à la diversité spécifique, c'est à dire l'ensemble des espèces vivantes, bactéries, protistes (unicellulaires), *fungi* (« champignons »), végétaux et animaux d'un milieu, par exemple une prairie tempérée, une forêt tropicale, une baie côtière, une source hydrothermale profonde, une falaise rocheuse, un mètre cube de terre végétale ou d'eau de mer au large, une grotte souterraine, un lac d'altitude, une surface de désert sableux... On parle de diversité biologique élevée ou faible d'un type spécifique d'écosystème. Mais en fait la biodiversité est bien plus que la seule diversité spécifique, incluant à la fois les espèces et leur abondance relative. Mais en pratique, l'espèce est commode d'utilisation, elle peut être assimilée à une sorte « d'unité de monnaie » identifiable et comptabilisable et donc aisée à utiliser.

### Qu'est ce que la biodiversité ?

Pour le biologiste, trois niveaux se distinguent, les diversités génétique, organismique et écologique (les gènes, les espèces, les écosystèmes). Si l'espèce est le niveau taxinomique privilégié (description et reconnaissance), l'*ultima ratio* de la diversité biologique, précise J Blondel (2005), est l'information génétique que contient chaque unité élémentaire de diversité, qu'il s'agisse d'un individu, d'une espèce ou d'une population. Ceci détermine son histoire, passée, présente et future. Même, cette histoire est déterminée par des processus qui sont eux-mêmes des composantes de la biodiversité. Et celle-ci, au sens large d'aujourd'hui, dépasse encore ce cadre (Purvis et Hector, 2000), nous le verrons au cours de ce chapitre. Le terme regroupe de nombreuses significations différentes et peut recouvrir des interprétations aussi diverses que la diversité biologique d'une forêt tropicale, les variations plus ou moins contrôlées d'un système agricole pour l'agriculteur ou d'un terroir pour le vigneron, un ensemble de ressources vivantes marines exploitables pour le pêcheur, la diversité des paysages ou des espèces charismatiques pour le grand public... Lévêque et Mounolou (2001) reconnaissent quatre grandes problématiques autour du terme « biodiversité ». Je me permettrai de les reclasser dans un ordre différent pour bien préciser les points scientifiques

d'une part, d'utilisation ou de gestion d'autre part : (1) l'étude des mécanismes biologiques fondamentaux permettant d'expliquer la diversité des espèces et leurs spécificités et nous obligeant à davantage « décortiquer » les mécanismes de la spéciation et de l'évolution, (2) les approches plus récentes et prometteuses en matière d'écologie fonctionnelle et de biocomplexité, incluant l'étude des flux de matière et d'énergie et les grands cycles biogéochimiques, (3) les travaux sur la nature « utile » pour l'humanité dans ses capacités à fournir des éléments nutritionnels, des substances à haute valeur ajoutée pour des médicaments, produits cosmétiques, des sondes moléculaires ou encore à offrir des modèles plus simples et originaux pour la recherche fondamentale et finalisée, afin de résoudre des questions agronomiques ou biomédicales (Boeuf, 2006, 2007) et enfin (4) la mise en place de stratégies de conservation pour préserver et maintenir un patrimoine naturel constituant un héritage naturellement attendu pour les générations futures. Dans un ouvrage plus récent (mars 2007), J Blondel redéfinit la biodiversité selon trois grands sens : (1) un concept abstrait désignant la « variété de la Vie », (2) une hiérarchie d'entités objectives organisées en systèmes en perpétuelle évolution, animés d'une dynamique et assurant des fonctions et (3) une construction sociale, économique, juridique et politique dont les enjeux relèvent de cette interaction avec les sociétés humaines.

C'est à partir du « Sommet de la Terre », organisé par les Nations Unies sur l'environnement et le développement, à Rio de Janeiro au Brésil en juin 1992, que le terme biodiversité est sorti des laboratoires du vivant et du sérail des biologistes pour partir à la conquête des sciences humaines et sociales, des médias, des politiques et du grand public. C'était la signature d'un engagement historique : la première Convention Internationale sur la Diversité Biologique, un traité conclu au niveau mondial (ratifié aujourd'hui par 188 pays, à l'exception notables des Etats-Unis d'Amérique) non seulement assurant la protection des espèces, mais aussi prenant en compte les écosystèmes, le patrimoine génétique et l'utilisation durable des ressources naturelles. Ce n'est pas un Traité au sens du Droit international, car la Convention n'a pas de caractère contraignant. La dernière rencontre des parties contractantes s'est à nouveau déroulée au Brésil, à Curitiba en mars 2006. La biodiversité fut encore à l'honneur lors du sommet mondial de Johannesburg sur le « développement durable » en septembre 2002, puis lors de la Conférence et de l'Appel de Paris en février 2007. La biodiversité a été rapidement associée à cette notion de développement durable (traduction pas très heureuse de l'anglais « *sustainable development* »), terme consacré par Madame Gro Harlem Brundtland, à l'époque Premier Ministre de Norvège et chargée par l'ONU de la *World Commission for Environment and Development* en 1987, et qui spécifie « *un développement qui satisfait les besoins de la génération présente tout en préservant pour les générations futures la possibilité de satisfaire les leurs* ». Nous serons passés du terrain biologique au terrain politique !

## Histoire de la Vie

A l'heure actuelle, plus de 70 % de la surface du globe sont recouverts par les mers et océans, qui représentent en surface 361 millions de km<sup>2</sup> (2,42 fois plus de mer que de terre). Ces masses océaniques développent un volume total de 1 370 millions de km<sup>3</sup> pour une profondeur moyenne de 3 800 m (> 90 % du volume disponible pour le vivant). Et pourtant la diversité spécifique reconnue dans les océans ne dépasse pas 15 % de l'ensemble des espèces vivantes actuelles décrites. Ceci peut être lié à deux raisons. La première c'est que les connaissances, surtout pour les zones profondes et pour les micro-organismes, bactéries et micro-algues, ne sont encore que très partielles (nous sous-estimons donc considérablement la

biodiversité océanique). Les nouveaux moyens, comme le couplage entre la cytométrie en flux (système de séparation et de tri de cellules) et les sondes moléculaires (mettant en évidence un organisme avec une grande spécificité), permettent la découverte d'une extraordinaire diversité biologique, absolument inattendue. Le « séquençage de mers » (C Venter, séquençage de tout l'ADN dans un volume d'eau de mer filtrée) va dans le même sens, les données obtenues apparaissant pour la plupart inconnues. Pour tous les procaryotes (cellules sans noyau, les bactéries par exemple) et les très petits eucaryotes (cellules à noyau, les levures par exemple), les approches moléculaires récentes (séquençage de l'ARN ribosomique 16S ou 18S entre autres) apportent chaque jour des connaissances étonnantes. Dans beaucoup d'études, les « monères » (procaryotes) ne sont pas comptabilisés dans les estimations de biodiversité, car leur inventaire est encore trop partiel et surtout les méthodes d'approche sont bien différentes (Fraser *et al.*, 2007) de celles mises en place pour les *Eukarya*. Par ailleurs, et c'est la seconde raison, il est aussi probable que les écosystèmes marins et le mode de vie dans un milieu continu (à travers la dispersion des gamètes et des stades larvaires) des espèces qui les peuplent, prédisposent moins à l'endémisme strict (espèces très localisées et vivant exclusivement en un lieu limité) que dans les biotopes terrestres. Il existe beaucoup plus de barrières et d'isolats favorables à la spéciation sur terre qu'en mer. Par ailleurs, les espèces de petite taille sont plus largement répandues (Finlay, 2002) que les grandes, plus sujettes à des barrières géographiques : ainsi les cyanobactéries, bactéries et petits eucaryotes trouvent-ils une distribution souvent universelle dans l'océan. Encore faudrait-il être certain de la qualité taxinomique de nos déterminations (espèces jumelles très proches) pour pouvoir totalement affirmer cela.

La formation de la Terre est datée à 4 600 millions d'années (MA). La Vie est apparue dans l'océan ancestral, finalement assez rapidement, après le refroidissement initial et la condensation des masses d'eau, vers environ 3 800 MA. C de Duve, Prix Nobel 1974, dit dans « Poussière de vie » en 1996, que la Terre était si idéalement positionnée par rapport au soleil que la vie ne pouvait pas ne pas y apparaître. Les plus anciennes roches sédimentaires connues (île d'Akilia, au Sud du Groenland) contenant du carbone d'origine biologique sont datées à 3 850 MA, mais ceci est encore controversé (Van Zullen *et al.*, 2002). Il faut imaginer la vie primitive très simple au début, à partir d'un monde à ARN et de protocellules (Maurel, 2003). Les gisements actuels de stromatolithes sont très précieux car ils contiennent dans leurs parties silicifiées les plus anciens fossiles de micro-organismes, des cyanobactéries. Celles-ci sont parties à la conquête généralisée des océans vers 3 400-3 200 MA, alors sans aucun oxygène atmosphérique. La photosynthèse, grâce aux pigments, produit de l'oxygène et des sucres à partir de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de lumière et serait apparue vers 3 500 MA. L'oxygène aurait commencé à diffuser hors du milieu aquatique dès 3 200 MA (Duursma et Boisson, 1994), mais c'est vers 2 300 Ma que nous décelons une augmentation importante d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère et l'océan superficiel (Fike *et al.*, 2007) puis ensuite vers 800-542 MA. La composition de l'atmosphère actuelle avec ses 21 % d'oxygène date d'environ 100 MA, au Crétacé.

Dans cet océan ancestral se sont produits des événements déterminants pour le vivant et la biodiversité : (1) l'apparition de la membrane nucléaire et du noyau individualisé (transition procaryote-eucaryote) vers 1 500 MA ; (2) la capture de cyanobactéries ambiantes qui deviendront des symbiotes et plus tard les organites de la cellule eucaryote, la mitochondrie et le plaste, avec leur propre petit ADN, respectivement vers 1 400 et 900 MA ; (3) l'apparition des pluricellulaires et métazoaires vers 800-900 MA. Certains aspects liés aux faits (1) et (2) sont encore controversés : le transfert latéral de gènes (chez les micro-organismes) et l'endosymbiose jouent un rôle fondamental mais quelles sont leur part respective dans l'évolution des génomes (Dagan et Martin, 2006) ? Il se produira aussi un fait exceptionnel,

dans cet océan premier, c'est l'apparition de la sexualité, qui se révélera si importante pour l'explosion de la biodiversité. La reproduction sexuée permet un brassage génétique créateur de nouveauté et d'une biodiversité sans précédent : tous les individus sont différents (Gouyon *et al.*, 1997). Une population pourvue de sexualité évolue beaucoup plus vite. De plus, la prévalence de la sexualité permet le développement de la « course aux armements » des parasites et de leurs hôtes (co-évolution et dialogue moléculaire ; Combes, 2001), le brassage génétique permettant à terme plus rapidement de « désarmer » le parasite et une sélection sexuelle, bien différente de la sélection naturelle (Dimijian, 2005).

La sortie des océans pour la vie métazoaire organisée se produira après l'explosion de Vie cambrienne (550 MA) et les premières formes végétales (premières plantes vasculaires au Silurien supérieur, vers 415 MA) et animales terrestres (arthropodes, vertébrés entre autres) laisseront des traces sur les continents (myriapodes, scorpions, dipneustes, rhipidistiens, *Ichthyostega*, vers 400 MA, au Dévonien). De très nombreuses nouvelles adaptations seront développées, autant par les végétaux que les animaux, le passage à la vie terrestre et à la respiration aérienne représentant un événement unique dans l'histoire de la Vie. Les différences sont fondamentales entre animaux aquatiques et terrestres. Les premiers tirent leur oxygène de l'eau par diffusion vers l'organisme profond pour les petites espèces (ou les stades larvaires) ou grâce à la branchie pour les plus grands. Un volume d'eau de mer en équilibre avec l'air contient environ 30 fois moins d'oxygène que le même volume d'air. Les respirateurs aquatiques ne peuvent développer une trop grande surface d'échange (essentiellement la branchie) à cause des dangers inhérents aux « flux » physiques osmotiques (eau et électrolytes), il perd son eau en mer, est « envahi » par l'eau en rivière, lorsqu'il existe un gradient. En fait un animal aquatique, tel un poisson par exemple, est constamment soumis à un délicat compromis, entre une surface maximale d'échange à développer pour aller capter l'oxygène dans un milieu pauvre et très changeant et par ailleurs une surface minimale pour éviter de graves déséquilibres hydro-minéraux (lois de l'osmose). Les animaux aquatiques excrètent de l'ammoniaque et, pour leur immense majorité, ne thermorégulent pas. Les animaux terrestres devront faire face aux rayonnements UV, à la déshydratation, à l'expression d'une pesanteur bien différente (nécessitant un squelette beaucoup plus lourd et résistant et la musculature associée), et devront trouver des produits d'excrétion différents, peu ou pas toxiques (acide urique, urée). Bien plus tard, au Trias, vers 210 MA, après la troisième grande crise d'extinction, les prémices de la thermorégulation se sont développées et trouveront leur efficacité optimale d'abord chez les grands dinosauriens, puis de façon plus perfectionnée chez les oiseaux et les mammifères. Le coût du contrôle de la température interne du corps est énorme mais les capacités d'adaptation et d'acclimatation des espèces qui en sont capables sont exceptionnelles. Un très bel exemple de retour à l'océan est le cas des Cétacés, qui ont débuté cette ré-acclimatation à la vie marine à partir de formes terrestres d'artiodactyles primitifs, proches de *Diacodexis*, puis amphibiens (comme *Pakicetus* ou *Ambulocetus* ...) vers 55-50 MA et chez lesquels les gigantesques formes actuelles (les plus grands animaux ayant peuplé la planète depuis les origines de la Vie et que l'homme a massacrés allègrement depuis 160 ans !) sont d'origine très récente.

Aujourd'hui 12 *phyla* (sur les 33 identifiés) sont exclusivement marins et n'ont jamais quitté l'océan (Echinodermes, Brachiopodes, Chaetognathes,...). Par contre, il n'existe que deux groupes (pas des *phyla*) exclusivement terrestres, les myriapodes et les amphibiens. Par ailleurs, les biomasses peuvent être considérables en mer, les seules bactéries de la couche de sub-surface de l'océan représentant à elles seules 10 % de toute la biomasse carbonée de la planète (Parkes *et al.*, 1994) ! L'environnement marin a donc joué un rôle déterminant dans l'histoire de la Vie et l'océan actuel garde son rôle primordial dans l'évolution de la vie et du climat.

On recherche aujourd'hui des traces de Vie « extraterrestre », en ciblant les efforts sur l'ADN, des acides aminés, l'ATP... sans oublier que la première molécule-clé du vivant, c'est ... l'eau. Tout être vivant est constitué d'eau, de quelques % pour les « plus secs », les graines de plantes par exemple, jusqu'à plus de 97 % pour certaines espèces aquatiques (entre autres, les algues, les méduses...). Le corps humain lui-même est constitué pour les deux tiers d'eau, plus de 70 % pour le nourrisson. L'eau, c'est la Vie : regardons une périphérie de désert chilien qui, en recevant des pluies tous les 10-12 ans (souvent en relation avec le jeu de l'oscillation sud-pacifique, « el Niño »), se couvre de fleurs (avec tout le cortège d'insectes qui va avec !) en quelques jours, et pour quelques semaines, et qui « repart » ensuite pour des années vers son aridité extrême. C'est cette fameuse flore « d'acheb » dont a si souvent parlé Théodore Monod au cours de ses expéditions au Sahara. Ceci est naturel mais l'homme peut aussi déclencher des explosions de vie en irriguant le désert.

La sortie de l'eau fut donc un événement réellement déterminant dans l'Histoire du Vivant. L'océan est salé, essentiellement par du chlorure de sodium, depuis très longtemps, et on parvient aujourd'hui à comprendre cette stabilité de la salinité : les milliards de tonnes de cations (calcium, potassium, magnésium, sodium...) apportés par les fleuves depuis qu'ils coulent sont compensées pour le calcium par le piégeage par les sédiments marins et la formation des calcaires, pour le potassium par l'adsorption des argiles. Magnésium et sodium sont retenus au niveau des dorsales océaniques (serpentinisation et argilisation des pyroxènes et olivines). Pour les anions, les bicarbonates sont en échange permanent avec l'atmosphère et la biosphère et pour les chlorures, ne « rentrant » dans aucun grand cycle biogéochimique, on pense aujourd'hui que le chlore fut l'un des éléments volatils originels, qu'il s'est dissout dans l'eau de mer initiale et qu'il y est resté (pas d'apport non plus par les fleuves aujourd'hui). Cette salinité actuelle, d'environ 35 psu (unité internationale de salinité, correspondant à 35 g de chlorure de sodium par litre), développe une osmolarité (pour « pression osmotique ») de 1050 mOsm.l<sup>-1</sup>. La vie marine a toujours dû compter avec cela et a développé une stratégie universelle de régulation isosmotique intracellulaire pour laquelle l'immense majorité (pour ne parler que des animaux) des espèces ont la même pression osmotique (milieu intérieur et intracellulaire) que celle de l'eau de mer. Une autre stratégie, apparue beaucoup plus tard avec certains crustacés, dénommée régulation anisosmotique extracellulaire, a permis de grandes capacités de migration et de changement de milieu, en maintenant une pression osmotique des cellules et fluides corporels dans une étroite fourchette (entre 300 et 400 mOsm.l<sup>-1</sup>, l'homme est à 302, soit environ 1/3 de celle de l'eau de mer), quelle que soit la salinité extérieure. En fait, on peut mourir déshydraté dans l'eau de mer, la présence de sels entraînant des flux d'eau de l'organisme vers le milieu extérieur à travers les surfaces d'échange en intime contact (sang-eau) avec l'eau salée, épithéliums de la bouche et la branchie (et les sels de l'eau de mer migrent dans l'autre sens). Les osmorégulateurs marins (les poissons osseux par exemple) ont dû mettre en place des stratégies de boisson permanente de l'eau de mer et d'excrétion des sels par la branchie, le rein s'avérant incapable d'assumer ce rôle. Aux réponses initiales, simples, pour lesquelles les milieux vivants correspondaient à la composition de l'eau de mer, se sont développées plus tard des stratégies de capacité de survie dans divers environnements osmotiques. Les animaux sont limités dans leur répartition géographique par des facteurs environnementaux dont l'un des plus importants est la nature osmotique en environnements aquatiques. La dispersion géographique, suivie d'un isolement génétique, est un mécanisme fondamental dans la spéciation. Sans la compétition des arthropodes et des vertébrés pour conquérir les environnements hostiles lors de la sortie des océans, avec la mise en place de mécanismes de régulation des compartiments extracellulaires, d'autres groupes se seraient diversifiés pour remplir les niches terrestres « vacantes » et le monde vivant serait bien différent de ce qu'il est aujourd'hui (Eckert *et al.*,

1999). Durant toute l'évolution en mer, la salinité (et par extension l'osmolarité) a joué un rôle déterminant dans les phénomènes d'adaptation, acclimatation et de spéciation, les barrières halines (« salées ») étant des éléments physiques importants. L'un des principaux problèmes posés par la vie terrestre est la conservation de l'eau et la lutte contre la déshydratation. Le rôle du rein est alors essentiel : penser au petit rat kangourou du désert, qui n'a jamais d'eau à boire à sa disposition et qui émet une urine « salée » comme 9 fois celle de l'eau de mer ! Pour sa part, la biodiversité « terrestre » explosera au Carbonifère à partir de 345 MA. Il se produira alors une extraordinaire nouveauté, l'apparition des ailes et du vol, chez une libellule.

## Comment apparaissent les espèces ?

La notion d'espèce, qui se voulait claire au début chez les végétaux et animaux « supérieurs », a été bien malmenée depuis, pour les déterminations d'invertébrés et surtout chez les champignons, petits eucaryotes et les procaryotes. Le statut de l'espèce est beaucoup moins évident aujourd'hui pour certains groupes comme les bactéries par exemple (Fraser *et al.*, 2007). La morphologie ou la biochimie de base ne sont pas utilisables et pour beaucoup de groupes, les outils moléculaires se sont révélés indispensables. Systématique et phylogénie modernes ne peuvent se concevoir sans des séquençages d'ADN (nucléaire ou mitochondrial). Nous disposons de plus en plus de génomes complets (191 en mars 2006, Ciccarelli *et al.*, 2006). Notre vision de l'arbre du Vivant (depuis les premières cellules vivantes initiales que nous évoquions antérieurement) a totalement changé depuis une vingtaine d'années et il ne se passe pas de semestre sans que la phylogénie « établie » ou l'histoire évolutive ne soit remise en question (Delsuc *et al.*, 2006 ; Bininda-Emonds *et al.*, 2007).

Les espèces peuvent apparaître par anagenèse, c'est-à-dire la transformation lente et très progressive d'une espèce en une autre au cours du temps. Ceci correspond à une succession de mutations favorables, à une accumulation de transformations génétiques adaptatives au cours du temps et assure la continuité évolutive de la Vie. C'est le gradualisme par opposition au ponctuationisme. Mais on ne peut confondre évolution et meilleure adaptation, la probabilité d'extinction demeurant identique au cours des temps géologiques (Le Guyader, 2005). Par ailleurs, l'idée « gradualiste » est beaucoup discutée par certains actuellement (à tort ?) et en fait l'évolution correspondrait à des processus de phases rapides suivies de longues stases durant lesquelles « rien ne se passe » (Le Guyader, 2005), ce seraient les « équilibres ponctués », proposés par Gould et Eldredge en 1993. La spéciation peut aussi se produire par cladogenèse, consistant en l'apparition d'une ou plusieurs espèces à partir d'une initiale par isolats, c'est la diversification du vivant, pouvant aller jusqu'aux radiations adaptatives spectaculaires comme dans le cas des « pinsons de Darwin » aux Galapagos (13 espèces actuelles à partir d'une initiale), d'autres oiseaux Drépanidés des îles Hawaï (39 espèces) ou encore des poissons Cichlidés (plusieurs centaines) des Grands Lacs africains comme les lacs Victoria ou Malawi. La spéciation peut être allopatrique, cas de loin le plus fréquent (avec dispersion et isolement géographique) ou sympatrique (au même endroit, souvent alors pour des raisons comportementales). Rosenzweig (1995) insiste sur trois modes de spéciation essentiels, la spéciation géographique (barrières géographiques, circonstances géographiques, isolation, séparation...), la spéciation par polyploïdie (gamètes diploïdes par exemple, banale chez les végétaux, mais aussi chez les animaux) beaucoup plus rapide que la géographique (nouvelle fonction pour des protéines dupliquées), et la spéciation par compétition (l'un des moteurs de la radiation adaptative ?) et émigration.

On peut estimer très globalement qu'une espèce d'une certaine taille se perpétue entre 2 et 10 millions d'années.

## Estimation de la biodiversité

L'une des questions essentielles aujourd'hui est de parvenir à une estimation objective de la diversité spécifique. Ce n'est pas un défi simple car tout évolue très vite et la destruction massive des milieux entraîne la disparition d'un nombre inconnu d'espèces. Par ailleurs une autre disparition alarmante est celle des « descripteurs humains » de cette diversité, que sont les systématiciens. Les évaluations actuelles des grands organismes scientifiques ne sont pas favorables à l'activité de descriptions d'espèces nouvellement découvertes ! Des groupes entiers n'ont plus de spécialistes en France ni même en Europe ou dans le monde. Et le travail est considérable, nous allons le voir. Pour les grandes espèces, il existe des groupes (oiseaux, papillons diurnes, « arbres »...) pour lesquels les « amateurs » peuvent jouer un rôle de premier plan (et l'ont toujours fait) mais une grande partie de la description de la biodiversité restera toujours l'apanage de chercheurs et enseignants, appartenant à des institutions ou organismes de recherche, soit en raison de la difficulté d'accès au matériel vivant (sources hydrothermales, grands fonds océaniques, canopée... par exemple) soit en raison du désintérêt pour les « choses petites et très difficiles », ou « pas belles ». Les grands organismes de recherche et Universités doivent aujourd'hui permettre à nouveau le travail de scientifiques dédiés à ces activités et spécialistes de groupes difficiles à déterminer. Bien entendu, il faut le faire avec les moyens modernes évoqués précédemment ce qui est encore moins à la portée des naturalistes amateurs. Mais ceux-ci sont aussi par ailleurs, au sein des « sociétés savantes », les dépositaires d'un immense savoir biologique sur la répartition des espèces, leur biologie et leur éthologie... dont on s'est trop privé jusqu'à présent.

K Von Linné, le père de la systématique « binominale » (nom latin en deux mots, le genre et l'espèce) dénombrait au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle environ 12 000 espèces vivantes, végétaux et animaux. Aujourd'hui, en ce début du XXI<sup>ème</sup> siècle, nous en sommes entre 1,75 et 1,8 millions d'espèces recensées et décrites (voir tableau 1). Et nous savons bien que nous sommes très loin du compte ! On décrit actuellement environ 16 000 nouvelles espèces par an (dont 10 % issues du milieu marin) : qui sait le nombre réel d'espèces présentes aujourd'hui ? Combien de temps nous faudra t-il encore pour « tout » décrire ? Comment ceci pourra t-il être mené à bien dans ce contexte actuel d'érosion dramatique de la diversité spécifique ? Quelles espèces ne seront jamais décrites alors qu'elles étaient encore là, avec nous, hier soir ou même encore ce matin ? Lesquelles décrirons-nous pour les voir irrémédiablement disparaître ?

Je renvoie le lecteur au texte de ce même volume de A Bergé sur le changement climatique. Il nous dit, c'est parti, le changement est là et s'emballe, c'est de toute façon maintenant trop tard pour l'empêcher. Mais plus nous tardons à prendre les bonnes décisions et surtout à mettre en œuvre les bonnes actions (réduire les émissions de gaz à effets de serre) et plus nos « descendants payeront » pendant longtemps. Un article, publié par Thomas *et al* dans *Nature* en janvier 2004, avance qu'un million d'espèces va disparaître à l'horizon 2050 (nous n'en connaissons pas encore 2 millions aujourd'hui !) à cause de l'augmentation de la température globale et de ses effets associés. Le tableau 1 fournit une estimation des espèces encore présentes que j'ai reprise de différents auteurs. La fourchette peut être gigantesque, entre 7 et 100 millions ? Gordon et Spicer en 1998 disaient 14 millions ? R May (1992) évoque 7 millions (sans les procaryotes). C'est bien entendu l'ordre de grandeur qui est intéressant. Si nous estimons que vivent aujourd'hui entre 1,5 et 2 % de toutes les espèces qui ont peuplé la planète depuis les toutes premières origines, la Vie aurait ainsi pu diversifier largement plus d'un milliard d'espèces sur 4 milliards d'années !

Tableau 1 : Espèces recensées et « probables » (Adapté de Gaston et Spicer, 1998, 2004 ; Purvis et Hector, 2000 ; Lecoindre et Le Guyader, 2001 ; Lévêque et Mounolou, 2001 ; Dubois, 2004 ; Teyssède, 2004 ; Barbault, 2006 ; Barbault *et al.*, 2006)

Groupe taxinomique	N espèces recensées	N espèces estimées	
<b>Virus</b>	4 000	500 000 ?	
<b>Bactéries</b>	4 000	1 000 000 ?	
<b>Champignons</b>	72 000	1 à 2000 000 ?	
<b>Protozoaires</b>	40 000	200 000	
<b>« Algues » unicellulaires</b>	40 000	400 000 ?	
<b>Plantes</b>	288 000	320 000	
<b>Invertébrés</b>		10 000 000	
	éponges	10 000	
	cnidaires	10 000	
	plathelminthes	20 000	
	nématodes	25 000	400 000
	arachnides	75 000	750 000
	crustacés	40 000	150 000
	insectes	950 000	8 000 000
	mollusques	117 500	200 000
	annélides	12 000	
	échinodermes	6 100	
<b>Vertébrés</b>	poissons	25 600	27 000
	amphibiens	4 200	5 000
	reptiles	7 200	7 400
	oiseaux	9 672	9 700
Entre 1,75 et 1,8 M sp	mammifères	4 327	4 400

Les groupes vivants sont très diversement connus, les grandes espèces ayant été décrites en premier (une courbe reliant année de description et taille de l'espèce est informative !) ainsi que les espèces de taxons « intéressants », pour diverses raisons (« jolies », « utiles », « proches de nous », domesticables, pestes agricoles, parasites, pathogènes, groupes ou espèces charismatiques...). C'est extrêmement variable mais il est clair que chez les animaux par exemple, si nous « touchons probablement au but » pour les mammifères (il reste encore des chauve-souris, petits rongeurs et insectivores à découvrir...), les oiseaux (environ une nouvelle espèce par an), les serpents, les crocodiliens, les tortues... il demeure un nombre considérable et très probablement insoupçonné d'espèces inconnues chez les nématodes, les mollusques, les arachnides, les crustacés, les insectes... Si pour les « plantes supérieures », la situation n'est pas trop mauvaise que dire des champignons, micro algues (groupe par ailleurs extrêmement hétérogène), protistes, bactéries et virus ? Pour ces derniers, la vitesse d'évolution étant extrêmement rapide (plus de 2 millions de fois plus vite qu'un animal !), nous sommes d'ailleurs en droit de nous demander si les activités humaines ne sont pas plutôt en train d'augmenter le nombre d'espèces ? Mais, que représente la notion d'espèce chez un virus, ou même chez une bactérie (Fraser et al., 2007) ?

Comment peut-on estimer la richesse en espèces ? Ceci est indispensable si l'on veut avoir des mesures fiables de son érosion. Ce n'est pas simple et diverses méthodes sont utilisables. Aucune n'est parfaite, l'idéal serait de compter une par une les espèces pour chaque biotope reconnu, mais c'est bien entendu irréalisable dans la grande majorité des cas. Cela a été tenté

pour certains milieux (un m<sup>3</sup> d'eau de mer, un m<sup>3</sup> de terre agricole, d'humus de forêt tempérée...) et déjà les résultats sont surprenants avec une diversité insoupçonnée, surtout pour les bactéries, micro algues, protistes divers... Alors imaginez ceci pour la forêt amazonienne ou la Mer Méditerranée ! Lévêque et Mounolou (2001) évoquent aussi la densité relative de chaque espèce, la position taxinomique, le statut trophique, la taille des individus, ou des approches plus génétiques et écologiques comme le nombre d'allèles sur un même locus, leur fréquence relative, ou encore le degré d'hétérozygotie qui allie le nombre d'allèles et leur fréquence relative (Purvis et Hector, 2000). On peut aussi identifier des biotopes dans des écosystèmes et des paysages et avoir une approche plus générale, mais pouvant être intéressante pour une estimation globale. Dans les années 60, le Programme Biologique International avait eu cette ambition, mais elle était vite apparue irréaliste. En fait tout doit être tenté et c'est surtout à la confrontation des résultats et à leur cohérence que nous pourrions juger de la pertinence des approches très diverses. Je rappellerai que biodiversité et richesse en espèces ne sont pas synonymes, la première dépendant bien sûr de la seconde, mais incluant en plus diversités génétique, phylogénétique, morphologique, physiologique, biochimique, éthologique, écologique... et toutes les associations possibles. Il faut aller vite, et malgré tous les efforts actuels, la tâche demeure immense (Purvis et Hector, 2000).

## Répartition de la biodiversité

Ont été définis sur la planète quatre grands types de zones écoclimatiques, tropical chaud et humide, tempéré humide, aride, polaire. Plus en détail on a également précisé la notion de grands « biomes » (selon les niveaux de détail et les auteurs, entre 10 et 100 reconnus), macro-systèmes caractéristiques de types d'environnements plus ou moins bien définis, souvent à partir de la couverture végétale : haute montagne, forêts, savanes, prairies et toundras, aires cultivées, zones littorales, zones abyssales... En fait, la diversité biologique est très inégalement répartie sur la Terre et selon les zones géographiques, elle est plus ou moins abondante. Il a ainsi été défini des zones très riches ou « *hot spots* » (Myers et al., 2000) essentiellement présentes sur la ceinture intertropicale (environ 25). C'est à partir de 14 biomes retenus que Gaston et Spicer proposaient en 1998 le chiffre de 14 millions d'espèces (revu à 13,5 en 2004) actuellement présentes sur Terre.

Aujourd'hui, la moitié des espèces vivantes se répartit sur 7 % des terres émergées, près de 90 % sur 10 % (Myers *et al.*, 2000 ; Lévêque et Mounolou, 2001 ; Dubois, 2004 ; Barbault, 2006). Dans les limites géographiques de ces « *hot spots* » vivent 44 % des plantes vasculaires et 35 % des vertébrés (exceptés les poissons) soit sur seulement 1,4 % de la surface terrestre totale. Pour l'environnement marin plus de 275 000 espèces ont été décrites dont 93 000 pour les seuls récifs coralliens. Pour le nouveau monde, les zones les plus riches s'étendent entre la Californie et le Sud du Brésil et pour l'ancien sur le pourtour de la Méditerranée, le sud des pays bordant le Golfe de Guinée, l'Afrique australe, Madagascar, l'Est africain, une grande partie du Sud Est asiatique, incluant l'Inde, une partie de la Chine et les Iles de la Sonde, les Philippines, le Sud Est australien, la Nouvelle Calédonie et la Nouvelle Zélande plus au Sud (Iles et archipels du Sud-Ouest Pacifique). Douze zones ont été qualifiées de « *megadivers* », abritant plus de 70 % de la diversité mondiale. Ceci n'est pas sans compliquer la tâche, que j'aborderai en fin de chapitre, quant aux mesures de protection à mettre en oeuvre pour stopper cette dramatique érosion de la biodiversité ou tout du moins parvenir à l'endiguer. Et la plupart de ces zones se trouvent dans des « régions politiques » peu stables, avec d'énormes problèmes sociaux, démographiques et économiques.

## Vers la sixième grande extinction ?

En fait, depuis ses origines, l'Histoire de la Vie a déjà connu des événements d'extinctions dramatiques (mais totalement naturels !). Si nous prenons en compte les 600 derniers millions d'années (que savons-nous sur l'avant ?), c'est-à-dire peu ou prou depuis « l'explosion cambrienne de la Vie », époque durant laquelle une part importante des grands *phyla* s'est diversifiée dans l'océan, on peut aujourd'hui retrouver des traces géologiques et paléontologiques de cinq grandes vagues d'extinctions massives. Il est clair que ces phases, plus ou moins « violentes » ont joué un rôle déterminant dans l'histoire de la Vie, les biodiversités et les répartitions actuelles.

La première eut lieu vers 440 MA, à la charnière entre Ordovicien et Silurien, où 85 % des espèces, alors marines (beaucoup de brachiopodes, céphalopodes, échinodermes, trilobites), auraient disparu. Cette extinction massive aurait pu avoir comme origine l'explosion trop proche d'une supernova, à 10 000 années lumière de la Terre, qui aurait entraîné l'émission de doses énormes d'UV et aurait détruit la couche protectrice d'ozone. Le vivant aurait littéralement « cuit » sur place (Dubois, 2004).

Le second événement se serait produit vers 370-365 MA, entre le Dévonien et le Carbonifère. Les brachiopodes, les trilobites et les milieux récifaux furent très touchés et 75 % des espèces marines disparurent. La troisième fut la plus grande crise d'extinction qu'ait connue la Terre. Elle est intervenue il y a quelque 251 MA, à la fin du Permien (et de l'ère paléozoïque ou primaire), et a fait disparaître 90 à 95 % de toutes les espèces (Benton et Twitchett, 2003), en moins de 4 MA, cette fois-ci marines et terrestres, cette vie terrestre s'étant déjà si diversifiée au Carbonifère. Une intense activité volcanique, d'énormes émissions de gaz à effet de serre, un relargage massif de méthane à partir d'hydrates marins et de « *permafrost* dégelés » (et une diminution dramatique de l'oxygène atmosphérique ?), un réchauffement atmosphérique d'au moins 6°C, l'impact d'un gigantesque astéroïde... toutes ces facteurs sont évoqués pour expliquer la disparition de presque tous les brachiopodes, de tous les trilobites, de beaucoup d'amphibiens, des 2/3 des familles d'insectes, de beaucoup d'arbres... Il faudra 100 MA pour revenir (en nombre) à la diversité initiale et certains groupes auront été irrémédiablement perdus. Quand on lit ces raisons, on ne peut s'empêcher de penser que l'homme est en train de créer aujourd'hui bien de ces conditions sur un temps beaucoup plus court !

Les terres émergées s'étaient réunies en un grand ensemble, la Pangée, puis partiront en extension (la célèbre « dérive des continents ») à partir du Trias. Durant le mésozoïque (ère secondaire), les grands dinosauriens domineront le monde, les premiers mammifères se différencient au Trias tandis que les oiseaux apparaissent au Jurassique. La quatrième crise se déroulera sur 15 MA entre Trias et Jurassique il y a de cela quelques 215 MA : 75 % des espèces marines disparaissent mais aussi des mollusques d'eau douce, des amphibiens, des reptiles... La dernière grande extinction, la plus célèbre auprès du grand public, remonte à 65 MA et marque la fin de l'ère secondaire et le début du tertiaire, c'est la fin des dinosaures, de beaucoup de mollusques, de beaucoup d'espèces marines, liées aux chaînes trophiques planctoniques... Cet événement brutal (dénommé K-T, pour *Kreide*-Tertiaire) a été bien documenté après la découverte d'une couche stratigraphique mondiale contenant des taux anormalement élevés d'iridium, élément apporté par des météorites. Une zone d'impact a été localisée au Yucatan actuel, au Mexique à Chuchclub. Sur l'impact brutal, l'explosion de la météorite et de la zone de contact (cratère géant) aurait formé une poussière capable d'obstruer la lumière solaire durant des mois et aux températures brûlantes qui auraient fait suite à la chute et à l'impact auraient succédé des températures polaires et la nuit permanente : 70 % des espèces n'y survivront pas. Étrangement, crocodiliens, tortues et poissons d'eau douce ne s'en sortent pas si mal. Ce sera ensuite, après 50 MA, l'explosion des poissons osseux, des mammifères, des oiseaux, des papillons, des plantes à fleurs... le retour à l'océan

pour les Cétacés... L'extinction des dinosaures a très certainement favorisé les radiations des mammifères et des oiseaux qui furent explosives en raison de toutes les niches écologiques laissées « vacantes ». L'idée était qu'en moins de 10 MA au cours du Paléocène, tous les ordres et familles d'oiseaux et de mammifères actuels s'étaient formés. Dans un travail sorti en mars 2007, Bininda-Emonds *et al.* précisent qu'en fait l'histoire évolutive des placentaires serait beaucoup plus ancienne, au moins 93 MA et que l'extinction en masse à 65,5 MA aurait eu une influence directe sur la biodiversité actuelle des mammifères. Au début du Pléistocène, se mettent en place des phases de glaciations-réchauffements qui vont à nouveau provoquer des vagues d'émigrations des espèces mais aussi des crises d'extinctions importantes (coraux, mollusques, beaucoup d'espèces planctoniques, vertébrés, arbres...). La dernière glaciation remonte à 10 000 ans. La périodicité des épisodes glaciaires étant de l'ordre de 100 000 ans, le Pléistocène a été caractérisé par une alternance de glaciaires et d'interglaciaires au nombre d'une bonne vingtaine.

Durant ces phases, est apparu un groupe de mammifères, au sein des primates, qui amènera à l'avènement de l'homme moderne, *Homo sapiens* (il s'appellera lui-même ainsi !) remontant à quelques 100-150 000 ans. Au début, les *Homo* ne feront pas plus de mal à leur environnement qu'un mammifère omnivore de taille comparable. Mais en fait, dès la domestication du feu par *H. erectus* vers 450 000 ans, l'influence sera de plus en plus marquée. Bien rapidement (et nous suivrons bien volontiers Lévêque et Mounolou en 2001, quand ils précisent que le « mythe du bon sauvage » en prend un coup !), l'espèce « *sapiens* » de plus en plus technique, intelligente et agressive, commence à avoir un impact inquiétant sur les milieux et à dégrader son environnement, souvent de manière irréversible pour la biodiversité. Il suffit pour cela de regarder le tableau 2.

Tableau 2 : disparition récente de grandes espèces de vertébrés (oiseaux et mammifères)

	Arrivée de l'homme	Disparitions
Amérique du Nord	15 000 ans	75 % des espèces initiales à partir de 12 000 ans
Amérique du Sud	14 000 ans	80 % des grands mammifères depuis 11 000 ans
Australie	55 000 ans	86 % à 46 000 ans
Nouvelle Zélande	800 après JC	33 % oiseaux en 1 200 ans
Europe		Disparitions massives vers 10-12 000 ans
Afrique	origines	50 genres de grands mammifères à 40 000 ans
Madagascar	2 000 ans	Lémuriens, oiseaux... à partir de 2 000 ans

L'homme moderne ne fait, en réalité, que prolonger et amplifier un processus d'érosion de la diversité spécifique, engagé il y a fort longtemps par nos lointains ancêtres (Martin, 1984). L'« *overkill hypothesis* » de Martin a été beaucoup controversée à l'époque mais il y a actuellement consensus pour imaginer qu'elle se combine avec les effets des grandes flexures climatiques afin d'expliquer les extinctions massives de grands vertébrés. Le quart des espèces d'oiseaux a été détruit (Vitousek *et al.*, 1997). Ainsi près de 2000 espèces d'oiseaux ont disparu des îles du Pacifique depuis la colonisation par l'homme. En Nouvelle Zélande, tous les oiseaux avaient survécu au changement de climat du Pléistocène, alors qu'1/3 disparaît après l'arrivée des Maoris vers l'an 800 (Abbadie et Lateltin, 2004). Avec l'arrivée de l'homme, toutes les grandes espèces de mammifères disparaissent : 100 % des mammifères > 1 t, 75 % des 100 kg/1 t (sauf en Afrique). En Australie (Roberts *et al.*, 2001), vers 46 000 ans, 23 des 24 genres endémiques de mammifères, oiseaux et reptiles de plus de 45 kg disparaissent, tous les > 100 kg, 22 des 38 espèces entre 10 et 100 kg et cela sans incidence de

changement climatique. En Amérique du Nord, 95 % de la mégafaune (70 espèces) disparaissent, 80 % des grands mammifères en Amérique du Sud s'éteignent vers 11 000 ans, 50 genres en Afrique il y a 40 000 ans ! En Europe, plus de 30 espèces de grands mammifères disparaissent vers 10 000 ans, ainsi que la « mégafaune » (éléphants, hippopotames « nains ») des Iles Méditerranéennes (Blondel, 2005). On sait aujourd'hui que douze îles méditerranéennes ont été habitées par différentes espèces d'éléphants nains, une par île, descendant de *Palaeoloxodon antiquus*. La plus petite île était celle de Tylos (60 km<sup>2</sup>) avec un remarquable exemple d'évolution convergente. Il est à noter que la légende des grands cyclopes du texte d'Homère provient d'un crâne d'éléphant nain (*P. falconeri*) de Sicile parce que les narines situées en position frontale ressemblent à une énorme orbite unique !

Bien entendu, il se produit à ces époques dans l'hémisphère Nord de profondes modifications climatiques, capables à elles seules d'expliquer certaines extinctions. Par exemple, un travail récent mené en Alaska disculpe *Homo sapiens* de la responsabilité de la disparition du mammoth laineux, celui-ci ayant déjà été bien fragilisé avant son arrivée. En fait, il faut imaginer un rôle conjoint avec les activités anthropiques (chasse, déforestation, brûlis..., plus tard, introductions d'espèces en cours de domestication ou domestiquées (le chien par exemple), épidémies induites...) et surtout l'homme est intervenu à des moments de forte fragilisation créée par la situation environnementale globale si changeante. Et, très récemment, dans les tout derniers siècles, que sont devenus le dodo, le pigeon migrateur, le grand pingouin, les grands oiseaux aptères de Madagascar ou d'îles du Pacifique, l'aurochs, le couagga, le loup de Tasmanie... ces dernières ... années, le crapaud doré du Costa Rica, le colobe rouge de Waldron, un petit singe du Centre-Afrique, ou encore le bouquetin ibérique des Pyrénées (Dubois, 2004) ? Il existe une Galerie au Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris présentant certains de ces animaux disparus, naturalisés. Nous venons d'apprendre tout récemment la disparition totale du dauphin de Chine, le baiji, un cétacé remarquablement adapté à la vie en eau très turbide du fleuve Yang Tsé et champion de l'écholocation : au moins aurions-nous pu tenter de le sauver par des individus maintenus en *marineland*, ces dauphins d'eau douce s'acclimatant bien à ces conditions. Il risque bien malheureusement d'être le premier d'une longue liste de grandes espèces à venir. Et demain, et pour ne rester que chez les mammifères emblématiques pour lesquels pourtant nous nous mobiliserons plus (alors que penser des autres ?), quel est l'avenir de l'éléphant d'Afrique, du gorille de montagne, de l'orang-outang, du grand panda, du tigre, de l'once, du guépard, des rhinocéros, de l'hippopotame, des baleines franches... ?

Gaston et Spicer (1998, seconde édition en 2004), ont présenté un tableau précisant les disparitions « officielles » constatées depuis 1600 : 641 espèces pour les animaux et 584 pour les plantes. Il est clair que ces chiffres sont fortement biaisés par la faiblesse de nos connaissances sur beaucoup de groupes et la qualité des données engrangées depuis 4 siècles. A Teyssède, en 2004, donne un tableau où elle estime les taux de disparition (selon les groupes) entre 50 et 600 fois plus rapides que les taux d'extinctions « naturels attendus » pour une diversité stable. Si l'on estime le taux naturel moyen de disparition (« *background extinction* ») de l'ordre d'une espèce par million et par an (une espèce sur mille et par millénaire), depuis le Tertiaire, il pourrait atteindre actuellement le chiffre de mille (Raven, 2002 ; *Millennium Ecosystem Assessment*, 2005.) ! A ce rythme, les 2/3 de toutes les espèces de la Terre auront disparu avant la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (Blondel, 2005, 2007). Une espèce sur 50 000 devrait disparaître par siècle : si nous estimons la diversité actuelle à 10 millions, cela ferait 200 au cours d'un siècle, or pour les seuls vertébrés, 260 espèces ont disparu au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. La perte de biodiversité des forêts tropicales est de l'ordre de 0,8 % par an pour les animaux qu'elles hébergent (Hugues *et al.*, 1997), et n'oublions pas qu'elles sont

incluses dans les « *hot spots* ». Gaston *et al.* en 2003 précisent que plus de 20 % des oiseaux ont disparu depuis le démarrage des pratiques agricoles au Néolithique : et avec celles d'aujourd'hui, ce sont au moins 13,5 milliards d'oiseaux (individus) qui disparaîtront d'ici à 2050 soit 16 % de l'avifaune actuelle, et ce ne sont que les hypothèses les plus basses. Différents scénarios ont été avancés pour prévoir à l'horizon 2100 les rythmes d'extinction ou les modifications prévisibles des écosystèmes sur terre, en eau douce ou en mer en fonction des fluctuations de divers facteurs comme la température, l'usage des terres, la quantité présente d'azote, le CO<sub>2</sub> atmosphérique et l'échange biotique selon les types de biomes (Sala *et al.*, 2000) : ils sont tous très alarmistes.

Les estimations de l'UICN sont de 3 600 espèces de végétaux supérieurs et 3 500 espèces de vertébrés (25 % de mammifères) menacées dans le monde aujourd'hui. Les données 2007 donnent sur 41 415 espèces répertoriées, 16 306 espèces menacées de disparition en tout (contre 16118 en 2006), 785 espèces se sont éteintes récemment et 65 ne vivent plus qu'en parcs ou jardins. Et quelles estimations avons-nous pour les invertébrés marins, les nématodes, les insectes ? Les activités anthropiques n'ont jamais été aussi désastreuses et destructrices sur la biodiversité : la question posée est alors « ...allons-nous vers la 6<sup>ème</sup> grande extinction », cette fois-ci causée par l'homme et son cortège d'activités, et en très peu de temps ?

Le tableau 3 synthétise les données de divers auteurs sur leur estimation de l'érosion actuelle de la diversité spécifique.

Auteurs	année	Rythme de disparition
Myers	1979	40 000 espèces par an
Ehrlich & Ehrlich	1981	25 000 espèces par an
Lubchenco <i>et al.</i>	1991	23 000 espèces par an
Wilson	1993	27 à 100 000 espèces par an
Leakey et Lewin	1997	25 à 40 000 espèces par an
Pimm et Lawton	1998	rythme 100 fois plus rapide que le taux « naturel » attendu moyen
Raven	2002	rythme 1000 fois plus rapide
Balmford <i>et al.</i>	2003	0,5 à 1,5 % des populations par an
Thomas <i>et al.</i>	2004	1 million d'espèces à l'horizon 2050
Dubois	2004	1 espèce disparaît toutes les 20 minutes
Teyssèdre	2004	selon les groupes, entre 50 et 600 fois plus rapide
Blondel	2005	rythme 1000 fois plus rapide
<i>Millennium Ecosystem Assessment</i>	2005	rythme 1000 fois plus rapide

## Pourquoi cette érosion de la biodiversité ?

En fait, notre perception du vivant et de la nature a considérablement évolué depuis un siècle et demi. D'une situation de nature hostile, agressive, dangereuse, menaçante pour l'humanité, nous sommes passés à une situation de nature dégradée et détruite par l'homme. C'est lui aujourd'hui **Le** prédateur et **La** menace pour l'environnement mais aussi pour son propre avenir. Durant le XIX<sup>ème</sup> siècle, en Europe, en Amérique du Nord, en Asie et dans les « colonies » de l'époque, la vie pouvait être très dure avec des récoltes incertaines, des plaies agricoles nombreuses, la menace de prédateurs, la pénétration et la méconnaissance de

nouveaux milieux, les grandes explorations des derniers territoires sauvages... Les ouvrages de l'époque mentionnent des espèces « utiles » et des espèces « nuisibles » pour l'homme (Lévêque et Mounolou, 2001). D'ailleurs ce concept ne disparaîtra des manuels scolaires en France que vers le début des années 60 (et ces termes perdurent encore chez les chasseurs ou les pêcheurs !). A partir de la révolution industrielle et des progrès agronomiques et médicaux associés, l'homme va commencer à se croire de plus en plus capable de s'affranchir de la nature. Il va penser surtout à se l'assujettir et à la dominer, en fait à se l'approprier pour lui-même, et s'est donc autorisé à éliminer et à détruire systématiquement tout ce qui le concurrençait ou le gênait dans ses activités et son développement. Cette mentalité dangereuse, amplifiée par un sentiment d'avoir « été créé » légitimement pour cela, a amené à la situation catastrophique actuelle. Après la « révolution verte » et la mise au point de molécules de synthèse (DDT par exemple), destinées à éliminer toute concurrence sauvage, désastreuses pour l'environnement par leur rémanence dans les milieux, la situation de « domination » de la planète était loin d'être idéale à la fin des années 60-70 ! L'homme se retrouvait dans une situation de rapport à l'environnement très délicate et surtout avec une perception généralisée, diffuse mais menaçante, de lourds nuages qui s'accumulaient sur son avenir. C'est alors qu'apparaîtront la science écologique et aussi l'écologisme politique.

En fait l'érosion de la biodiversité « non naturelle » -méfions-nous quand même de ce terme, il ne faudrait pas qu'à ce prix, l'on sorte l'homme de la nature, il en fait partie intégrante- a explosé avec deux grandeurs, la démographie humaine et le cortège des activités anthropiques associées. Au moment des balbutiements de l'agriculture, vers 8 000 années av JC, la Terre comptait environ 5 millions d'humains. En 1750, la population totale est estimée à moins de 800 millions d'habitants, 1 milliard en 1802, 3 en 1960, 4 en 1975, 5 en 1987, 6 en 1999, 7 en 2012, 8 en 2027 et 9 en 2040 : il est clair que l'évolution de la courbe de la population humaine pour les époques récentes est édifiante. Et tout va avec, du changement climatique à la dégradation de l'environnement et à l'urbanisation sauvage en passant par l'effondrement de la biodiversité. Si nous nous accordons sur des taux de disparitions d'espèces 600 à 1000 fois plus forts que les taux « naturels attendus », les impacts des activités humaines sont catastrophiques. L'homme ne détruit pas de manière égale tous les groupes floristiques ou faunistiques, mais la disparition massive des milieux les affecte tous. L'homme est devenu la plus grande force évolutive de la planète (Palumbi, 2001) : les changements évolutifs accélérés dérivent de la forte pression de sélection exercée par la technologie humaine (Barbault et Chevassus-au-Louis, 2004).

Tous les auteurs s'accordent pour reconnaître quatre grandes causes à la situation actuelle et aux atteintes à la biodiversité : (1) la disparition et la dégradation des milieux naturels, (2) la prédation en excès d'espèces, exploitées ou non, et la surexploitation des ressources naturelles, (3) l'introduction d'espèces de façon anarchique (la « roulette écologique »), et (4) le changement climatique si rapide (provoqué par l'homme). Quarante pour cent des terres sont transformées, plus de la moitié des ressources en eau sont utilisées et les impacts sont si forts depuis deux siècles, et surtout une cinquantaine d'années, qu'il a été suggéré de parler « d'anthropocène » (Barbault, 2006), ceci pour marquer l'ouverture d'une nouvelle ère avec le XIX<sup>ème</sup> siècle, caractérisée par la domination de l'homme. En trois siècles, la population humaine a été multipliée par 10 (l'urbanisation par 10 dans le dernier siècle !) et la totalité des réserves de combustibles fossiles, accumulée pourtant sur des centaines de millions d'années, aura été utilisée. Depuis une époque beaucoup plus récente, correspondant à la révolution industrielle, l'homme a multiplié par deux ses émissions de dioxyde de soufre, a augmenté de 30 % celles de CO<sub>2</sub>, et de 150 % celles de méthane, redoutables gaz « à effet de serre ». En relation avec l'usage abusif des amendements et engrais, la fixation de l'azote a été plus que

doublée. En fait si l'on considère les réchauffements passés dans l'histoire de la Terre, correspondant toujours à un intense volcanisme sur de longues périodes, produisant des émissions énormes de dioxyde de carbone et de méthane (Nicolas, 2004), l'homme est en train de réaliser les mêmes effets sur une période considérablement plus courte. Ce sont les valeurs absolues atteintes qui sont inquiétantes mais aussi et surtout la vitesse du changement. Comment la Nature et les environnements y feront-ils face ? Les effets du réchauffement apparaissent de plus en plus discernables tant sur les végétaux que chez les animaux (Root *et al.*, 2003) et bien que nous n'en soyons encore qu'aux prémices, les réponses écologiques sont déjà clairement visibles (Walther *et al.*, 2002). Les oscillations nord atlantique et sud pacifique (el Niño) affectent considérablement les processus écologiques, à la fois marins et terrestres (Stenseth *et al.*, 2002). Au cours du siècle dernier, 1700 espèces animales et végétales se sont ainsi déplacées dans l'hémisphère Nord d'environ 6 km par décennie vers le Nord et de 6 m en altitude en réponse au réchauffement planétaire (Parmesan et Yohe, 2003), de plus ceci accompagné d'un avancement des comportements de printemps. Pour survivre au réchauffement, les espèces seront contraintes à pratiquer une véritable « traque à l'habitat » (Blondel, 2005). Pour un réchauffement moyen de 1°C, si nous prenons l'exemple de la France, les espèces « courent contre le réchauffement » et devront parcourir 180 km vers le Nord et 150 m en altitude : les espèces moins rapides changeront leur calendrier ou disparaîtront (Abbadie et Lateltin, 2004). En fait la température affecte directement le vivant et la matière vivante et nous sommes encore bien loin d'imaginer les effets considérables que vont entraîner les variations trop brutales de la température. Les travaux en biologie intégrative tentent (mais c'est très récent) de prévoir comment les espèces parviendront ou non à s'acclimater (Thuillier, 2007 ; Wang et Overgaard, 2007). Les réductions de la productivité océanique observées durant les années chaudes post-1999 sont très inquiétantes (Behrenfeld *et al.*, 2006). Et comment les coraux s'adapteront-ils à la remontée (trop rapide) du niveau des océans, liée à la fonte inéluctable des grands glaciers et des calottes. Que ferons-nous des millions de « réfugiés écologiques », des humains cette fois-ci, qui n'auront plus leurs îles ou leurs rivages familiers ? Nous renvoyons à nouveau le lecteur au chapitre de A Bergé dans ce même volume : plus nous tarderons à prendre des mesures pour limiter nos émissions de gaz à effet de serre et plus nos descendants auront à en supporter les effets délétères pendant longtemps.

Dans un article remarqué, en 1997, Vitousek et ses collaborateurs démontraient la domination des humains sur les écosystèmes tant océaniques que terrestres et concluaient que nous changeons plus vite la Terre que nous ne la comprenons et la découvrons. En 2007, Magnani *et al.* démontrent comment l'homme modifie sérieusement la balance carbonée des forêts tempérées et boréales soit directement à travers le mode de gestion soit indirectement par l'usage de l'azote. Jamais l'emprise de l'homme n'a été aussi forte. R Barbault (2006) décrit cinq actions majeures de l'homme sur l'environnement et la biodiversité, (1) sur les cycles biogéochimiques planétaires ; (2) la structure, la stabilité et la productivité des écosystèmes ; (3) la composition des faunes et des flores ; (4) la physiologie, la démographie et la génétique des espèces vivantes ; (5) la santé et la qualité de la vie. Je choisirai deux exemples spectaculaires qui peuvent être retenus pour illustrer le sujet.

Ce même auteur documente le premier, qui est très récent : sur les images satellites on observe la régression de la Mer d'Aral (c'était le troisième plus grand lac de la planète, en fait une mer intérieure saumâtre), incroyable sur seulement 40 ans : les  $\frac{3}{4}$  du volume ont disparu, les 55 milliards de m<sup>3</sup> annuels d'apports des fleuves Syr Daria et Amou Daria en 1960 sont tombés à moins de 1 aujourd'hui, tout ceci pour irriguer de gigantesques champs de coton, introduit dans la région. La pollution est très forte, il n'y a plus d'eau, 85 % des marais

abritant initialement 173 espèces nicheuses d'oiseaux (38 aujourd'hui) ont disparu. La pêche (qui atteignait 44 000 t pour 60 000 emplois en 1950) n'existe plus, les navires rouillent au sec. Il reste 4 espèces de poissons sur 24 initialement. Entre 40 et 150 millions de tonnes de poussières salées et toxiques balayent la région annuellement et se déposent partout, détruisant les récoltes : 2 millions d'humains sont affectés. Le taux de mortalité infantile est très élevé, le plus fort au monde, les naissances d'enfants malformés se multiplient, les cancers sont très abondants (leucémies, estomac...). C'est une réelle catastrophe écologique, associée à un drame humain effrayant, causé par un système d'exploitation aveugle et insensé !

Le second est plus ancien mais pourrait bien représenter une excellente image de ce qui guette aujourd'hui la planète : les hommes découvrent l'île de Pâques (*Te-pito ho te huenua* ou *Mata-ki-te-rangi* en pascuan, *Rapa Nui* étant une appellation tahitienne beaucoup plus récente) vers le 8-9<sup>ème</sup> siècle. C'est l'île la plus isolée de toutes au monde (à plus de 4 000 km de tout autre point habité de la planète à l'époque). Ils s'installent dans un véritable « paradis terrestre », couvert de forêts riches et luxuriantes (*Sophora toromiro*, *niu*, *nau-nau*, *hau hau*, *Jubaea*, *Pritchardia*, *Alphitonia*, *Elaeocarpus*...). Ils y parviennent avec quelques plantes amenées avec eux (banane, ti, curcuma, canne, santal, igname, mûrier, patate douce...), deux animaux « domestiques », le rat de palme et le poulet et ils y vivent en bonne harmonie durant environ 700 ans. Ils avaient très probablement aussi avec eux le cocotier et l'arbre à pain mais ces deux espèces n'ont pas survécu après leur introduction. On ne retrouve pas de traces d'armes de guerre pour les premières époques. Puis, la déforestation massive (en fait engagée dès le début), la destruction de l'environnement, l'érosion consécutive des sols, les brûlis, la surpopulation (20 000 personnes vers 1650 ?), la disparition des embarcations (que s'est-il passé dans l'esprit de l'homme qui a coupé le dernier arbre de l'île de Pâques ?) et la fin de la pêche, les guerres tribales (les armes en obsidienne font suite aux outils) amènent à une tragédie généralisée (population en expansion, disparition des ressources, impossibilité de revenir en arrière), à des guerres et à l'anthropophagie (Flenley et Bahn, 2003 ; Diamond, 2006). Entre les premiers témoignages « modernes » du jour de Pâques de 1722, quand y parvient l'homme européen pour la première (rien n'est moins sûr ?) fois (les *moai* sont encore debout sur les autels, les habitants apparaissent encore sains et vigoureux) et les suivants (64 années après, les *moai* gisent à terre, les habitants présentent des signes de malnutrition, il y a beaucoup de mortalité infantile), on peut suivre la forte dégradation des conditions de vie sur place. Le sommet de la crise aurait été atteint vers 1650-1680, avec de graves famines (*moai kavakana* à côtes saillantes et visage émacié) et un coût d'état militaire rejetant les nobles et les prêtres (Diamond, 2006). Les européens, après les premières explorations « douces » (Roggeveen, Gonzalez de Haedo, Cook et La Pérouse entre 1722 et 1786), n'y apporteront que du malheur et on ne comptabilise plus que 111 Pascuans en 1877. Pierre Loti y écrira ses « Reflets sur la sombre route » lors du passage de son navire en 1872, plus aucun *moai* n'était alors debout, l'île était ravagée. L'arrivée des européens et leur cortège d'exactions associées (meurtres, viols, déportations, transfert de maladies ou d'espèces invasives...) contribuera à achever le déclin de la population pascuane et elle précipitera leur disparition (déportations massives en 1862 vers les exploitations de guano au Pérou). Au vu de la situation actuelle, la planète Terre aujourd'hui ne serait-elle pas une île de Pâques en sursis ? D'autres exemples sont très édifiants (Diamond, 2006) entre autres dans les peuplements du Pacifique Sud, en particulier les histoires des îles de Mangaia (Îles Cook du Sud) peuplée vers 1250, semblable à celle de l'île de Pâques en plus rapide et celle de Tikopia (Salomon du sud, au Nord des Vanuatu), où la catastrophe aurait été prévue par le pouvoir en place et évitée par une politique très stricte et contraignante d'émigrations forcées et d'infanticides (Flenley et Bahn, 2003).

La situation actuelle sur la planète est fort préoccupante, nous venons de le voir. Même si nous manquons de données fiables et si l'impact des activités humaines peut être très divers selon les groupes vivants, 40 à 50 % des terres sont transformées ou dégradées par l'homme (23 % par l'agriculture et les pâturages), la diversité biologique des sols est fortement altérée et on continue à jouer à la « roulette écologique » en transportant (involontairement ou non), disséminant et introduisant des espèces vivantes partout. La perche du Nil, introduite dans les grands Lacs africains (« Le cauchemar de Darwin »), y a éliminé des centaines d'espèces de Cichlidés endémiques, la truite arc-en-ciel a fait de même sur les poissons *Orestias* du Lac Titicaca (les poissons parmi les plus « hauts » du monde), un serpent arboricole australien (qui prend l'avion !) élimine des espèces d'oiseaux sur l'île de Guam et part actuellement à la conquête d'Hawaï et de l'Europe, l'ouverture du Canal de Suez a permis l'entrée de plus de 300 espèces de la Mer Rouge en Méditerranée, l'ibis sacré s'est installé en Morbihan et Loire Atlantique, le pique-bœuf africain partout dans le Sud de l'Europe, les eaux de ballastage des grands *tankers* (estimées à 12 milliards de tonnes par an pour un transfert journalier d'au moins 3 000 espèces !) disséminent partout des milliers d'espèces de phyto et zooplancton, certaines très toxiques et dangereuses pour l'environnement... Un cténaire de la côte Est des Etats-Unis, *Mnemiopsis leidyi*, a été ainsi introduit incidemment en Mer Noire au début des années 80 et s'est mis à proliférer pour atteindre un million de tonnes en 1990 : la compétition indirecte avec les anchois a effondré la pêche (CSPNB, 2007). On tente aujourd'hui de le combattre par l'introduction d'autres cténophores prédateurs. Pour les végétaux, la caulerpe (au moins deux espèces en fait) s'est installée en Méditerranée ; *Miconia calvescens*, originaire d'Amérique Centrale et du Sud et introduite comme plante ornementale en 1937, recouvre 70 % du territoire de Tahiti et part à la conquête de nombreuses îles du Pacifique ; la jacinthe d'eau, originaire du Brésil, est une plaie mondiale dans les grands estuaires et plans d'eau ; le sénéçon du Cap, venu avec des toisons lainières d'Afrique du Sud en 1936, prolifère dans beaucoup d'endroits en Europe de l'Ouest ; les jussies (*Ludwigia sp.*), originaires d'Uruguay et introduites en 1835, colonisent actuellement très rapidement les plans d'eau douce dans le Sud de la France ; l'ambrosie d'Argentine crée de sérieux problèmes d'allergie dans la vallée du Rhône... la liste est considérable. Le parasitisme et les réactions immunologiques pourraient bien jouer un rôle essentiel en matière de biologie invasive et de réussite ou non d'acclimatation (Torchin *et al.*, 2003; Lee et Klasing, 2004). La perte de diversité biologique rend les écosystèmes beaucoup plus fragiles face aux invasions biologiques : une biodiversité maintenue est la meilleure ligne de défense contre les espèces invasives (Kennedy *et al.*, 2002), ceci est maintenant très bien documenté.

La destruction des habitats représente la menace principale pour 67 % des espèces en danger, les relations entre la réduction de la surface de vie et la disparition des espèces n'étant pas du tout linéaire : au-delà de certains morcellements, la perte en espèces devient beaucoup plus importante (Laurance *et al.*, 2002). L'un des milieux les plus riches de la planète, la grande forêt intertropicale est très menacée et 140 000 km<sup>2</sup> (plus du quart de la superficie de la France !) disparaissent par année, soit environ 1 % de la superficie totale : au moins 20 000 espèces vivantes y sont liées. Uniquement durant les années 90, 90 millions d'ha ont ainsi été détruits (> surface du Vénézuéla). Au Brésil, il ne persiste plus que 7 % de la grande forêt atlantique originelle du Nord Est. Depuis les origines, 93 % de la surface totale des forêts européennes ont été détruites et, même si cette forêt tempérée est aujourd'hui en expansion grâce aux reboisements, elle est fortement anthropisée. Une étude poussée sur la région de Singapour, particulièrement touchée par la déforestation (95 %) de la forêt tropicale depuis deux siècles démontre entre 34 et 87 % des taxa perdus pour les papillons, poissons, mammifères et oiseaux et entre 5 et 80 % pour les autres groupes (Brook *et al.*, 2003).

Un autre aspect édifiant, en dehors de la disparition des écosystèmes forestiers tropicaux, est la surexploitation des ressources vivantes marines renouvelables (Jackson *et al.*, 2001 ; Pauly *et al.*, 2002 ; Worm *et al.*, 2006). Les pêches mondiales permettent le débarquement annuel d'environ 90-95 millions de tonnes, mais quand on regarde une courbe de l'évolution des captures, elles sont en totale stagnation depuis une quinzaine d'années malgré des moyens de plus en plus sophistiqués pour la détection et la capture. En fait, les retraits de flottes tentés un peu partout (et la diminution du nombre de pêcheurs), ont été largement compensés par la plus grande efficacité des unités restantes et la construction de navires neufs et redoutablement équipés. Beaucoup de pêches (crevettes en Indonésie, crabes, serranidés et congres...) sont très destructrices sur l'ensemble des stocks ne permettant qu'une faible proportion de produits ciblés débarqués, le reste étant abandonné et perdu. Les fonds marins, et leur biodiversité, sont très abîmés par les contraintes mécaniques répétées des engins traînants, chaluts et dragues : la surface des océans affectée par les chalutages est 150 fois supérieure à l'aire annuelle subissant la déforestation (Cury et Morand, 2004). En Méditerranée occidentale par exemple, jusqu'à des profondeurs de 200 m, les fonds sont plus affectés et remodelés par le chalutage que par toute cause climatique (remise en suspension par les tempêtes par exemple). On estime aujourd'hui les stocks halieutiques pleinement exploités et surexploités à 76 % (FAO, 2005). Les chiffres de débarquements enregistrés ne tiennent bien sûr pas compte des captures illégales, des « hors-quotas » ou « hors-tailles » vendus « au noir », ni des rejets en mer : ceci pourrait représenter 40-50 millions de tonnes par année en plus. Dans ce contexte, seule l'aquaculture peut apporter des sources de protéines d'origine aquatique supplémentaires pour faire face aux besoins croissants, issus à la fois de la croissance de la population mondiale et d'une demande en augmentation pour ce type de produits (qualité nutritionnelle) : mais quel type d'aquaculture (Boeuf, 2003) ? Les conflits sont très forts entre petits pêcheurs artisans et la grande pêche industrielle, dont la minotière. Actuellement, près du quart des ressources halieutiques de la planète est utilisé pour la transformation en farines et en huiles. Chinchards, sardines, anchois, capelans, merlans bleus, maquereaux... sont capturés, puis broyés, évaporés, transformés en farines et huiles et servent à alimenter les élevages industriels, l'aquaculture en absorbant une quantité croissante (saumons, crevettes...). On ne pourra ainsi indéfiniment tirer sur la ressource pour ces fins et les recherches s'orientent donc de plus en plus vers des substitutions végétales pour les farines. Les résultats sont très prometteurs (y compris d'ailleurs pour les lipides). Les cibles récentes de poissons des grands fonds (empereur, grenadier, certains requins...) pour les pêches sont aussi une préoccupation grave, ces espèces longévives (jusqu'à 125 ans, 22 ans pour la première maturation sexuelle chez l'empereur !) étant très peu fécondes (1 à 2 petits par an chez le requin *Centrophorus*...). Ces animaux sont beaucoup plus des curiosités biologiques que des ressources halieutiques (Lorance, 2003). Les effets du chalutage sur de tels écosystèmes de coraux profonds sont désastreux. Cinquante à 90 % des grands poissons prédateurs ont disparu en 15 ans (Cury et Morand, 2004). Toutes les tailles « record » des grandes espèces marines ont été enregistrées il y a plus de 50 ans : ces animaux grandissent durant toute leur vie et la pression actuelle de pêche leur interdit de ...vieillir ! Les débarquements (alors que les méthodes de captures actuelles ciblent tous les gros animaux) se font avec des animaux de en plus petits, ce qui est très inquiétant. Les structures de populations changent, les poissons se reproduisent plus jeunes et plus petits. Se repose alors la question lancinante de la ressource renouvelable, l'animal capturé s'est-il, au moins une fois, reproduit auparavant ? Après 500 années de pêche à la morue, il a fallu procéder à une cessation totale des activités et mettre en place un moratoire au Canada Est (40 000 emplois supprimés) : après 15 années, la morue n'est toujours pas revenue. Le grand thon rouge est très menacé en Méditerranée, les quotas fixés, déjà trop hauts, n'étant pas respectés et les captures se déroulant durant la saison de ponte. La chasse « à la baleine » a consisté en un

massacre organisé depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, et surtout après l'invention du canon harpon à injection d'air en 1864. Les baleines franches ont disparu, il en reste moins de 4 % pour l'espèce antarctique par rapport à la population initiale. Ces animaux, les plus grands ayant jamais existé sur la planète depuis les origines de la Vie, ont une très faible fécondité (1 petit après une gestation de 11 à 14 mois) et ils représentent un très bel exemple de l'ingéniosité et de l'habileté technique de l'homme à exploiter (!) une ressource, désastreux comportement de l'aveuglement et de l'avidité à favoriser les profits à court terme avec le risque réel de conduire à la disparition totale d'espèces emblématiques, dont toutes les substances extraites sont aujourd'hui remplacées par des produits supérieurs et moins chers (Troadec et Laubier, 2003). Et il est inconcevable en 2007 que la lutte ne soit pas gagnée contre les pays qui veulent la réouverture de la chasse à la baleine, loin de là ! Pour la pêche en général en Europe, dans un contexte où le potentiel de capture des flotilles excède largement le niveau de capture autorisé, un système de gestion basé sur le contrôle des sorties (Totaux Autorisés Capturables, TAC) plutôt que des entrées (l'accès à la ressource) stimule de fait une rentabilisation à court terme de l'outil de production. Et en plus il incite à adapter les capacités à la situation de concurrence ainsi créée, donc à les accroître, au lieu de les maintenir à un niveau compatible avec la productivité biologique des stocks (*ratchet effect*). La faiblesse du système de gestion par les TAC provient du fait qu'il est fondé sur le contrôle des débarquements et non sur celui des captures effectives (Gros, 2006). Un article, paru en novembre 2006 dans la revue Science, insiste sur le fait que la perte de biodiversité marine est en accélération, ce qui diminue les capacités de production en nourriture pour l'humanité, la qualité de l'eau et les possibilités de régénération des stocks. Mais ces auteurs (Worm *et al.*, 2006) pensent que la tendance est encore réversible si on prend rapidement les bonnes mesures. Je les suivrai volontiers sur ce terrain, mais il ne faut plus tergiverser pour les prendre. Cet article a été fortement critiqué en 2007 et dans un travail récent, Beddington *et al.* en 2007 soulignent d'ailleurs le fait que les outils existent pour gérer correctement les pêcheries, qu'on peut encore les sauver et permettre une ressource harmonieuse et durable, mais il faut tout mettre en place très rapidement. Par ailleurs, le réchauffement global crée également des difficultés et perturbations sur les ressources océaniques (Behrenfeld *et al.*, 2006), la température plus élevée de l'eau entraînant des chutes du contenu en oxygène dissous, elles-mêmes très impactantes sur les capacités d'adaptation des espèces (Pörtner et Knust, 2007), les amenant soit à disparaître soit à migrer vers des environnements plus froids et mieux oxygénés. L'un des problèmes majeurs est aujourd'hui aussi l'acidification globale de l'eau de mer : si l'acidité des océans est stable depuis au moins 20 millions d'années, elle est en train de changer avec la dissolution du CO<sub>2</sub> en excès et depuis l'avènement de l'ère industrielle elle a déjà augmenté sensiblement. C'est très inquiétant pour l'avenir du plancton, des coquillages et des récifs coralliens, en fait tous les organismes qui biocalcifient. Stone, en 2007, pose le problème du corail qui saura peut-être croître assez vite pour suivre le niveau des mers, mais ne pourra résister au changement de la qualité de l'eau. Le blanchiment en cours est une catastrophe et il ne faut pas oublier que les récifs coralliens hébergent plus du tiers de la biodiversité des océans.

Un autre aspect correspond aux impacts des activités humaines sur les pathologies d'ordre divers, métaboliques, infectieuses, parasitaires, allergiques... Les micro-organismes sont au cœur du développement des populations humaines : plus la population croît et plus elle entre en compétition avec les autres espèces animales et végétales et plus elle risque d'entrer en contact avec des agents potentiellement dangereux et auxquels elle n'a jamais été confrontée (Guégan et Renaud, 2004 ; Renaud *et al.*, 2006). La plupart des maladies infectieuses humaines ont pour origine les animaux et nous continuons perpétuellement à être ciblés par de nouveaux pathogènes. Les interactions proches entre faunes sauvage et domestique et l'homme créent des contraintes particulières, à spécialement surveiller (Wolfe *et al.*, 2007).

En fait les interactions avec la biodiversité se situent à divers niveaux : la mise en évidence de la biodiversité des pathogènes eux-mêmes, l'influence de la perte de diversité biologique microbienne qui entraîne la sélection de souches pathogènes très résistantes et les transplantations et disséminations diverses de pathogènes. De très nombreuses maladies dites « émergentes », SIDA, peste aviaire, SRAS, chikungunya, fièvre d'Ebola, maladie de Lyme, fièvre de Lassa, Hantavirose, dengue, fièvre jaune, fièvre de la vallée du Rift, hépatite C, variante de Creutzfeld-Jacob... sont de plus en plus inquiétantes. En fait ces agents pathogènes ne sont pas forcément nouveaux mais l'homme déclenche aujourd'hui d'exceptionnelles conditions de propagation et de virulence. Les concentrations gigantesques d'animaux élevés en batteries en univers concentrationnaire (porc, volailles...) et la multiplication des échanges intercontinentaux constituent une véritable « bombe à retardement » en matière de santé publique. Une biodiversité élevée est essentielle à la régulation de nos conditions environnementales et les milliers d'espèces réservoir et vecteur interagissent avec elle. Il a fallu des études génétiques poussées pour caractériser les simulies, vecteurs de l'onchocercose humaine en Afrique de l'Ouest. Le paludisme est particulièrement étudié et la biodiversité de ses hôtes fort intéressante : 5 anophèles, 6 espèces jumelles pour *gambiae*, 9 espèces « secondaires ». Ce moustique (*A. gambiae*) fut introduit au Brésil en 1930 par un bateau puis éradiqué vers 1940. *Aedes albopictus* (transmet dengue et encéphalites) a été introduit du Japon aux Etats-Unis en 1985 sur un navire transportant de... vieux pneus ! Pour ces échanges intercontinentaux, n'oublions jamais qu'en 1520 la variole a tué 3,5 millions d'indiens en 2 ans dans le Nouveau Monde, soit la moitié de la population. Plus au Sud, les indiens fuégiens ont été décimés par les épidémies successives amenées par les européens et ont quasi totalement disparu. Les disséminations actuelles de *Listeria*, *Legionella*, *Salmonella*, *E.coli* O157 sont constantes. Le cas de l'espèce introduite d'Argentine, l'ambrosie, *Ambrosia artemisiifolia* produisant un allergisant redoutable (jusqu'à 100 grains de pollen au m<sup>3</sup> d'air !) en France (vallée du Rhône) est spectaculaire. La résistance de germes redoutables aux traitements antibiotiques (maladies nosocomiales par exemple) illustre également fort à propos ces aspects : de la pénicilline active en 1946 au Zyvox en 1999, via deux autres molécules, *Staphylococcus* mute et s'adapte (Palumbi, 2001). Le climat en évolution et les activités humaines ont beaucoup contribué à des transports ou migrations d'espèces qui ont amené avec elles leurs pathogènes et qui ont touché des populations jamais exposées et pas toujours capables de faire face (Harvell *et al.*, 1999). La création par l'homme d'organismes génétiquement modifiés (OGM) a fait naître de grands espoirs (Van Montagu, 2006) en matière de production de plantes résistantes à des pathologies, des prédateurs ou pour diverses caractéristiques phytotechniques adaptatives (sécheresse, salinité...) mais aussi bien des déceptions outre que toutes les précautions n'ont pas toujours été prises. Il est illusoire de vouloir rendre toutes les plantes résistantes aux herbicides (pour utiliser moins de produits toxiques pour l'environnement) ou d'introduire la même résistance aux ravageurs partout (Gouyon, 2006a). Les résultats des OGM agricoles sont aujourd'hui loin d'être évidents. Quant à la transgénèse animale à des fins zootechniques (Boeuf, 2001), seule une résistance fiable à certaines pathologies pourrait justifier ces pratiques. Et là encore des précautions immenses doivent être adoptées avant de « passer au terrain ». La sélection bien réalisée et surtout de sérieuses mesures de prophylaxie (maintenir la qualité des sites) sont préférables pour l'environnement et surtout rendent les producteurs plus vigilants, responsables et respectueux quant à la dégradation des milieux. Mais attention, la sélection poussée sans préservation du polymorphisme génétique est dangereuse à terme.

## Quels remèdes apporter ? Quel espoir ?

En fait, le développement durable, si annoncé et discuté, l'est-il pour longtemps (Trommetter et Weber, 2005) ? Et pourquoi protéger la diversité biologique ? Je ne vais pas revenir ici sur la durabilité d'un développement, ceci a été amplement débattu par ailleurs, et il est extrêmement difficile aujourd'hui de préciser quel est le meilleur équilibre pour un milieu. Le fonctionnement optimal des écosystèmes nécessite-il cette biodiversité actuelle ? La question est d'importance (Chapin III *et al.*, 2000). Certains précisent qu'ils « tourneront » aussi bien avec beaucoup moins d'espèces mais alors, lesquelles sont « importantes » et comment les choisir (Gouyon, 2006b) ? Et saurons-nous faire cela ? Hector et Bagchi en 2007 posent le problème et concluent aux fonctions très diverses assurées par les écosystèmes qui requièrent une grande biodiversité : des espèces différentes jouent des fonctions différentes et l'étude d'un processus individuel en cas isolé sous-estime le niveau de biodiversité nécessaire à la multifonctionnalité de l'écosystème. Par exemple, de nombreux travaux démontrent que le paysage agricole peut aussi représenter un important réservoir de biodiversité pour peu que l'on respecte un minimum d'exigences biologiques et écologiques des milieux. Il faut arrêter ces monocultures intensives productivistes, exigeantes en engrais et amendements et cesser le gaspillage insensé. La biodiversité augmente la productivité et préserve les écosystèmes à long terme : une diminution de la diversité végétale entraîne une réduction de la productivité (Gaston et Spicer, 1998 ; Purvis et Hector, 2000 ; Abbadie et Lateltin, 2004 ; Abbadie *et al.*, 2006). Une grande biodiversité aide à réduire la variabilité temporelle des écosystèmes en environnements fluctuants (Loreau *et al.*, 2001). De toute façon, il nous faut améliorer la finesse de nos analyses des populations et des habitats pour compléter nos connaissances sur l'évolution des milieux et mieux apprécier les extinctions réelles (Balmford *et al.*, 2003).

Il est fort probable que la solution viendra d'un rapprochement harmonieux entre économie et écologie, R Barbault (2006) parle de « réconciliation ». Quel est le coût économique de la pollution, de la destruction des milieux, de leur remise en état (quand cela est encore possible), de l'éradication de stocks vivants (normalement renouvelables, mais trop sollicités, bien au-delà de leurs capacités de régénération), de la dissémination anarchique des espèces ? Pour ce dernier point, le seul coût annuel de la lutte contre les plantes invasives aux États-Unis (autant dans les milieux naturels que dans les cultures) se monte à 137 milliards de dollars, probablement à plus de 400 au plan mondial (Dubois, 2004) : 200 à 250 espèces de plantes constituent réellement un problème majeur. Il est donc urgent d'être beaucoup plus précautionneux quant aux introductions et de tenter d'éradiquer ce qui est éradicable quand le mal a été fait et qu'il est patent : il convient de rester prudent, une espèce introduite installée peut aussi jouer un rôle et assurer des fonctions spécifiques. Comment remplacer un équilibre par un autre ? La nature a-t-elle un prix ? Quelle est la valeur économique de la diversité biologique, des biotechnologies associées, des ressources agrosylvopastorales, des produits naturels en matière de cosmétiques, de pharmacie... ? Le seul coût de la lutte contre les *Staphylococcus* résistants, induits par les pratiques humaines, dépasse les 30 milliards de US\$ par an (Palumbi, 2001).

Aujourd'hui, 40% de l'économie mondiale reposent sur les produits biologiques et les processus écologiques : comment négliger cela ? De plus, la biodiversité joue un rôle fondamental dans les grands équilibres de la biosphère en matière de grands cycles biogéochimiques, le risque de déséquilibres est important. Et il va falloir en plus compter avec le bouleversement climatique (Nicolas, 2004 ; Abbadie et Lateltin, 2004 ; Barbault, 2006 ; Bergé, 2008).

Pour les ressources vivantes de l'océan, les mesures à prendre sont un effort de pêche raisonné et bien organisé, éventuellement appuyé par des libérations de juvéniles issus

d'écloseries (mollusques, crevettes, poissons pour le repeuplement), des engins de pêche moins agressifs que les dragues ou les chaluts et plus sélectifs, l'arrêt du gaspillage et des méthodes de capture destructrices, des zones de cantonnement, des arrêts biologiques, des récifs artificiels bien conçus et bien positionnés, une forte diminution de productions des farines, une aquaculture soucieuse des lendemains (Boeuf, 2003), sans destruction massive d'écosystèmes côtiers, le remplacement par des protéines et lipides d'origine végétale dans l'alimentation des carnivores, un contrôle strict des échanges et introductions ... Tout ceci peut amener à des ressources aquatiques durables dans un respect de la qualité du produit mis sur le marché à un coût acceptable et du maintien des écosystèmes (en trente années, la crevetticulture a détruit des millions d'ha de mangroves dans le monde) et de la biodiversité. Ce n'est pas gagné, nous avons encore eu durant l'été 2006 en Méditerranée un exemple de conflit fort entre écologistes et pêcheurs de thon rouge. De toute façon, nous n'échapperons pas à une gestion raisonnée des ressources pour un « développement durable » et ceci dans tous les domaines, notre survie en dépend.

Des questions récurrentes se posent : conserver *in situ* (le site où l'espèce vit naturellement) ou *ex situ* (dans des zones protégées en dehors) ? Comment utiliser les réserves, les zoos, les jardins botaniques, les « souchothèques » ? Faut-il préserver des espèces ou des écosystèmes, que mettre en priorité ? Actuellement, les aires protégées représentent environ 10 % des terres et 0,5 % des mers, de la réserve intégrale à la réserve de biosphère de l'UNESCO (dans laquelle les activités humaines se déroulent « quasi normalement »). La gestion de la biodiversité est une gestion de conflits d'intérêts ou de culture (Weber *et al.*, 2006). Sur 20 « zones critiques » ou « hot spots », les refuges holocènes, il a été précisé qu'avec 20 millions US\$ la zone par an durant 5 ans, on pourrait ainsi protéger une grande partie des espèces menacées, mais 16 zones se trouvent dans des régions « difficiles », politiquement : quelle police et quelle gouvernance (se rappeler des tristes exemples « protéger la Nature des sauvages ») alors établir ? Et comment maintenir ceci dans le temps ? Un très fort conflit Nord-Sud s'est dégagé lors de l'élaboration de la Convention Internationale sur la Diversité Biologique en 1992, et les débats ont été tout aussi vifs lors de la dernière réunion en 2006. Comment prétendre « imposer » à des états en développement ou en émergence des « règles de bonne conduite écologique » alors que leur désir légitime de développement (le moins lent possible) est naturel et que nous avons, pour notre part, fait les pires exactions chez nous dans un passé plus ou moins récent ? Et certains pays très développés continuent quand ils refusent de signer des accords internationaux qui sont pourtant vitaux pour la Planète. La forêt tropicale ne doit plus être agressée, encore moins disparaître. Il faut renforcer les zones protégées et ne pas ensuite, en s'étant ainsi donné bonne conscience, laisser faire n'importe quoi ailleurs. Il faut une autre stratégie, intégrant la conservation de la biodiversité au sein de la « nature ordinaire », et donc des interactions avec les autres activités humaines (Chevassus-au-Louis, 2006).

Comment éthiquement et solidairement redistribuer les retombées financières des richesses biologiques liées aux biodiversités régionales et locales ? Environ 50 % des molécules actives aujourd'hui utilisées en pharmacie sont issues ou synthétisées à partir de produits naturels. Par exemple, pour les végétaux terrestres, plusieurs milliards de US\$/an sont dégagés à partir de divers composés (aspirine, quinine, morphine, réserpine, taxol... pour la seule vinblastine, 100 millions \$/an à partir de la pervenche rose de Madagascar). Et des plantes disparaissent tous les jours dans l'indifférence générale : « ... elles s'éteignent dans un silence assourdissant... annonce t-on à la télévision l'agonie ou le trépas d'une espèce végétale... ? » (Pelt, 1997). Si le rythme actuel de disparition des végétaux se maintient, 60 000 espèces (sur les 280 000 connues) ne seront plus là en 2050. Toutes ces considérations sont essentielles

pour ne pas nous priver de substances vitales pour l'humanité : et si l'espèce qui s'est éteinte hier soir dans l'indifférence générale contenait une molécule-clé anti-cancéreuse, anti-fongique ou anti-virale ? Pour revenir à l'océan, plus de 5 000 produits ont été isolés d'organismes marins (Fenical *et al.*, 1999) et certains sont passés en utilisation courante : anticancer Ara-C (leucémie myélocytique aigüe et lymphome non-Hodgkin), anti-viral Ara-A (herpès), nucléosides isolés d'éponges, bryostatine (de bryozoaire), antiviraux bactériens (anti-HIV)... 30 % des substances ont été trouvées chez les éponges.

Un autre aspect non négligeable (pourtant complètement ignoré) dont nous ne pouvons pas nous priver, et un autre argument pour respecter la biodiversité, sont l'utilisation d'espèces vivantes très variées, non seulement pour en tirer des molécules à haute valeur ajoutée, mais aussi en tant que modèles biologiques. Dès 1865, C Bernard avançait «...il y a des expériences qui seraient impossibles chez certaines espèces animales et le choix intelligent d'un animal qui présente une disposition heureuse est souvent la condition essentielle du succès et de la solution d'un problème physiologique très important... ». Plus récemment, A. Krogh (Prix Nobel en 1920) précisait : « pour chaque problème de physiologie, il y a un modèle vivant idéal ». Et enfin, en 1997, F Jacob (Prix Nobel en 1965) ajoutait «...pour s'attaquer à un problème important, pour avoir une chance raisonnable de lui trouver une solution, le biologiste doit s'adresser à un matériel convenable...». La biodiversité maintenue offre tout cela (Boeuf, 2007) et les retombées en sont incalculables. Citons, pour ne parler que du milieu marin et de Prix Nobel, la découverte de la phagocytose, chez l'étoile de mer (E Metchnikoff en 1908), du choc anaphylactique à partir de venin de méduse sur des chiens (C Richet en 1913), des mécanismes fondamentaux de la transmission de l'influx nerveux à partir du gigantesque axone du calmar (A L Hodgkin et A F Huxley en 1963), des bases moléculaires de la mémoire grâce à une limace de mer (E Kandel en 2000), de la molécule clé de la prolifération cellulaire (et donc les applications en cancérologie) à partir de l'étoile de mer (T Hunt en 2001)... Et nous pourrions encore citer l'isolement et la caractérisation du premier récepteur membranaire de neurotransmetteur, le récepteur nicotinique de l'acétylcholine chez la raie torpille, les bases moléculaires de la mise en place des yeux chez une méduse, la reconnaissance du soi et du non-soi chez une ascidie, le système immunitaire « primitif » des requins, auquel ressemble celui du fœtus humain... (Boeuf, 2006, 2007).

Différentes techniques ont été proposées pour mesurer l'ampleur des impacts des pratiques présentes, par exemple celle de « l'empreinte écologique » qui mesure le « fardeau » imposé à la Nature par un individu ou une population (exprimée en hectares de surface terrestre par habitant, nécessaires pour produire les ressources et éliminer les déchets) : pour amener tous les humains au « niveau de vie » (que signifie ce terme en matière de bien-être ?) d'un « européen » par exemple (> 5 ha) : il faudrait ... trois Terres ! L'écologie a été revisitée à travers des modèles économiques (Costanza *et al.*, dans *Nature* en 1997) : les « services rendus » chaque année à l'humanité par divers écosystèmes ont été évalués à 33 000 milliards de US \$, soit près de deux fois les PIB de toutes les nations réunies par an. La conservation, couplée à des pratiques d'utilisation durable apparaît économiquement préférable à l'exploitation intense, les rapports consentis coût/bénéfice passent de 1 à 100 entre la « stratégie écologique » et celle d'« exploitation intensive ». Des milliards de US\$ sont dépensés chaque année pour « remettre en état » des cours d'eau pollués, ou revégétaliser des espaces détruits mais combien d'interventions sont nécessaires et que coûtent-elles (Palmer *et al.*, 2004) ?

Un autre aspect, trop souvent négligé, correspond à la perception esthétique et éthique de la nature : R Barbault la pose dans son récent ouvrage (2006) sur une image : « ...pourquoi sauver l'éléphant d'Afrique ? » (même si aujourd'hui ce n'est plus l'espèce la plus menacée).

Comment passer de la vision utilitariste actuelle à ces considérations si différentes ? Quel humain peut et pourra vivre, aujourd'hui et demain, sans ces fabuleux ensembles (paysages et êtres vivants associés) encore présents aujourd'hui : mais pour combien de temps encore ? Et je ne peux pas ne pas rappeler que ces considérations n'ont de sens que pour ceux bien sûr qui n'ont pas à se préoccuper de ce qu'ils donneront à manger à leurs enfants le jour même ou le lendemain, ou qui ne sont pas obsédés par leurs seules conditions de survie immédiate ! Or cette dernière catégorie d'humains augmente et continuera à augmenter si nous poursuivons à ne pas mieux résoudre les questions de distribution et de partage des ressources sur cette planète. Faudra-t-il sauver par la force (!) les gorilles des Virunga ou les orang-outang ? Au nom de quel interventionnisme ? La seule solution est un contrôle local de la démographie humaine associée à une mise en valeur douce et harmonieuse de la cohabitation forêt-humains-grands singes. C'est facile à dire, c'est autre chose dans la pratique ! La conclusion de la Conférence mondiale de Johannesburg en 2002 stipulait « ralentir l'érosion de la biodiversité pour 2010 » (et l'Union Européenne avait surenchéri « stopper »), nous en sommes loin !

Les apports touristiques, avec la démocratisation récente des grands voyages internationaux, liée à la fois à des moyens financiers accrus, des possibilités de congés et des facilités de déplacements des individus de pays développés vers des PED, n'ont pas forcément arrangé les choses. La venue en masse à certains moments précis de l'année, n'est pas compatible avec un maintien harmonieux des écosystèmes ciblés. Les responsables de réserves naturelles sont d'ailleurs constamment « écartelés » entre un attrait et un partage de la « ressource naturelle » (et donc des visites de leur site protégé) et un afflux pas trop fort qui risquerait de tout déséquilibrer (et qui, à terme, ferait disparaître l'intérêt du site). En ce sens, l'écotourisme bien géré peut s'avérer très intéressant. Il établit équité et durabilité entre les « reçus » (mais en augmentant leur « empreinte écologique ») et les « recevants ». Une étude de la FAO (1995) a démontré qu'un « tourisme doux et intelligent » pour séjourner et visiter une forêt au Pérou (avec la démonstration de toutes ses facettes de biodiversité) rapportait 422 US\$/an/ha alors que la coupe du bois ramenait environ 1 000 US\$, mais pour une seule fois. Le Costa Rica est ainsi parvenu à « détourner » 40 % du tourisme de masse vers un écotourisme attractif et précautionneux de l'environnement. En fait, ces voyageurs recherchent des contacts harmonieux avec les autochtones et leur nature avec une impression en plus de « faire quelque chose » pour ces *hot spots* de biodiversité. Peut-être aussi que mieux connus, ils seront plus défendables. Mais il faut rester extrêmement vigilant et bien contrôler les flux acceptables pour le milieu et les habitants, de nombreux contre-exemples sont connus.

Les moyens analytiques modernes nous ont très récemment permis la mise en évidence d'une extraordinaire diversité biologique dans tous ses sens du terme, tout à fait sous-estimée, surtout pour les micro-organismes pro- et eucaryotes, les champignons et les invertébrés. L'utilisation conjointe d'approches génétiques et écologiques, l'étude de l'expression des génomes, celles de la compréhension des mécanismes de l'évolution et du fonctionnement des écosystèmes sont indispensables pour avancer. Toute confrontation intelligente entre ces disciplines se révèle d'une grande efficacité et nous délivre de précieux outils, dont la modélisation, pour répondre aux gestionnaires et politiques et affiner notre perception des inter-relations entre écologie et économie : ne plus détruire, pour ensuite éventuellement tenter de réparer à des coûts astronomiques, et bien sûr éviter l'irréversible ! Encore une fois, mieux vaut prévenir que guérir !

L'un des mécanismes d'expertise les plus connus est le *Millenium Ecosystem Assessment* (Compte-rendu 2005) pour lequel ont travaillé 1 320 chercheurs à travers le monde. Une consultation internationale est en cours, lancée par la conférence « Biodiversité, science et

gouvernance » qui a réuni 1 500 personnes à Paris en janvier 2005, à l'instigation de la présidence française. Un énorme travail est à faire en permanence en matière de précision des impacts, de promotion et d'information : faut-il mettre en place une instance particulière à l'instar de celle existant pour l'étude du changement climatique (Chapin III *et al.*, 2000) ? A ce sujet, IMoSEB (pour *International Mechanism of Scientific Expertise on Biodiversity*), dont la première réunion s'est tenue à Paris en février 2006, a été créé justement pour mieux organiser tout cela : nous devons alerter l'opinion publique internationale et fournir aux dirigeants mondiaux une expertise scientifique exacte, unitaire et fiable, destinée à aider leurs décisions. Un appel solennel a été lancé dans la revue *Nature* le 20 juillet 2006 pour exhorter les scientifiques à tous parler d'une même voix pour orienter les politiques mondiales. Les chercheurs organisés et unis, doivent faire entendre les risques avec la même insistance et produire des résultats « contre-intuitifs » qui orientent et orienteront les débats internationaux (Weber *et al.*, 2006). Le désir de créer l'ONU (Appel de Paris en février 2007) et l'organisation du Grenelle de l'Environnement en octobre 2007 sont aussi des points forts d'une prise de conscience généralisée : mais saura t-on "transformer l'essai" ?

L'enjeu est grand pour faire prendre conscience aux opinions publiques et aux hommes politiques de l'acuité du sujet et de l'urgence à prendre des mesures concrètes et efficaces. Les aspects liés à la formation sont essentiels et l'enseignement, surtout auprès des jeunes, est déterminant : il faut très sérieusement les informer sans non plus les désespérer ! Des mesures peuvent être développées. Pour cela un changement radical de notre mode de vie est indispensable : le système actuel, avec des ressources aussi mal gérées et mal partagées ne peut qu'amener au gaspillage, au chaos social et à une catastrophe générale à moyen terme. La déforestation, la concentration des propriétés entre les mains de quelques-uns rejettent les pauvres en zones périphériques, sur des terres marginales avec des droits d'usage précaires : pauvreté, biodiversité et développement durable sont en relations étroites (Weber *et al.*, 2006). Comment continuer ainsi dans un monde aussi égoïste où 20 % « contrôlent » 80 % des ressources (Blondel, 2005) ? Dès 1974, la Déclaration de Cocoyoc précisait « ...*bien que 30 ans se soient écoulés depuis la signature de la Charte des Nations Unies, point de départ tendant à établir un nouvel ordre international, l'humanité se trouve aujourd'hui face à un choix critique. L'espoir de donner une vie meilleure à la famille humaine tout entière a été largement déçu. Au contraire il y a plus d'affamés, de malades, de sans-abri et d'analphabètes que lors de la créations des Nations Unies* ». Que rajouterions-nous trente années plus tard ? Et dans 10 ou 20 ans ?

Nous suivons totalement R Barbault quand il stipule (2006) « ...*avec l'accroissement prévu de la population humaine, le scénario prévu d'augmentation thermique pour le climat, et surtout si l'humanité dans son ensemble ne détermine pas d'ici-là des voies radicalement nouvelles pour conduire les affaires, alors l'horizon est sombre et la sixième crise d'extinction une perspective certaine...il n'y a pas d'agriculture durable, autre qu'écologique, il n'y a pas de santé durable autre qu'écologiquement fondée...* ».

En fait l'une des actions fondamentales correspond à la mise en place d'une gouvernance mondiale pour beaucoup d'aspects qui sortent largement des régions ou frontières. Quel cadre politique local, régional, national, international ou mondial instaurer ? La Conférence et l'Appel de Paris de février 2007 vont dans ce sens : saurons nous créer et animer des Nations Unies pour la protection de l'Environnement ? Le problème est de substituer au mode de pensée actuel une approche intégrée et multidimensionnelle qui soit capable de générer une durabilité globale à l'échelle de la planète (Raven, 2002). Il apparaît clairement aujourd'hui que tout projet de développement ou de réalisation technique, en fait de n'importe quel type d'activité humaine nouvelle, doit intégrer la gestion de la biodiversité en plus des impacts

prévisibles sur l'environnement. La préservation de la biodiversité apparaît fondamentale. Entre le moment où l'humain a découvert le « trou » dans la couche d'ozone et la résolution du problème il faudra très probablement une cinquantaine d'années, pour le changement climatique, nous en avons pour des centaines d'années, l'ampleur de la question est toute autre. Les problèmes sont divers et différemment compliqués à résoudre : pour l'érosion de la biodiversité il faut s'y atteler immédiatement. Pour les espèces qui ne sont plus là, même celles disparues hier, il est déjà trop tard, pour les autres il faut se dépêcher.

Quelles guerres demain pour l'accès à ... l'eau potable ? Quel futur pour l'humanité sans Nature harmonieuse et biodiversité maintenues ? En vertu de quel droit et de quel comportement insensé sommes-nous en train de priver nos enfants de ce que la Nature a mis des centaines de millions d'années à leur offrir ? En matière de protection de l'environnement et des espèces qui le peuplent, de développement durable et de gestion raisonnée et durable des ressources, sans gaspillages inutiles et sans l'égoïsme prévalent actuel, il faut tendre à une gouvernance supranationale : établir un véritable Droit de la conservation de la Nature, dans ce système présent de compétitions internationales exacerbées. Cela demande des efforts considérables, soutenus et durables, mais c'est indispensable (et encore faisable ?) : projet réaliste ou rêve insensé ?

Banyuls-sur-mer, novembre 2007

#### Remerciements

Un grand merci aux amis scientifiques qui ont bien accepté de revoir mon texte et m'ont fait des commentaires éclairés et pertinents sur mes diverses versions : Robert Barbault, Jacques Blondel, Yves Desdevises, Sylvie Dufour, Anne-Marie Genevière, Denis Lacroix et Christian de Muizon.

## Données bibliographiques

- Abbadie, L. et Lateltin, E. 2004. Biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et changements globaux. Biodiversité et changements globaux, Adpfe, Ministère des Affaires Etrangères, 80-99.
- Abbadie *et al.* 2006. La dynamique des écosystèmes. La biodiversité. Focus du CNRS, 18-23.
- Balmford, A., Green, R.E. and Jenkins, M. 2003. Measuring the changing state of nature. *Trends in Ecology and Evolution*, 18 (7), 326-330.
- Barbault, R. et Chevassus-au-Louis, B. 2004. Biodiversité et crise de croissance des sociétés humaines : l'horizon 2010. Biodiversité et changements globaux, Adpfe, Ministère des Affaires Etrangères, 8-23.
- Barbault, R. 2006. Un éléphant dans un jeu de quilles. L'homme dans la biodiversité. *Seuil, Science ouverte*, 266 pages.
- Barbault, R. *et al.* 2006. Comprendre la biodiversité. La biodiversité. Focus du CNRS, 12-17.
- Beddington, J.R., Agnew, D.R. and Clark, C.W. 2007. Current problems in the management of marine fisheries. *Science*, 316, 1713-1716.
- Benton, M.J. and Twitchett, R.J. 2003. How to kill (almost) all life: the end-Permian extinction event. *Trends in Ecology and Evolution*, 18 (7), 358-365.
- Bergé, A. 2008. Le changement climatique. Ce même volume, pages.
- Bininda-Emonds, O.R.P. *et al.* 2007. The delayed rise of present-day mammals. *Nature*, 446, 507-512.
- Behrenfeld, M.J. *et al.*, 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444, 752-755.
- Blondel, J. 2005. Biodiversité et sciences de la nature. Les biodiversités, objets, théories, pratiques. CNRS Editions, 23-36.
- Blondel, J. 2007. La biodiversité, le point de vue d'un scientifique. Dans « La biodiversité à travers des exemples ». CSPNB, MEDD/D4E, 4-5.
- Boeuf, G. 2001. La transgenèse, quelle application pour la faune aquatique ? Série de l'IFREMER, "Bilans et prospectives", 36 pages.
- Boeuf, G. 2003. L'aquaculture dans le monde : quel avenir ? Série *Perspectives, Conférences et débats de l'Université de Perpignan*, vol 2, 91-104.
- Boeuf, G. 2006. La richesse naturelle de l'*Albera* : patrimoine et biodiversité, ses modèles biologiques. Dans « *L'Albera, terra de pas, de memòries i d'identitats* », sous la direction de M. Camiade, Collection Etudes, Institut franco-catalan transfrontalier, Presses Universitaires de Perpignan, pp 205-220.
- Boeuf, G. 2007. Océan et recherche biomédicale. *Journal de la Société de Biologie*, 201 (1), 5-12.
- Brook, B.W., Sodhi, N.S and Ng, P.K. 2003. Catastrophic extinctions follow deforestation in Singapore. *Nature*, 424, 420-423.
- Chapin III, F.S. *et al.* 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, 405, 234-242.
- Ciccarelli, F.D. *et al.* 2006. Toward automatic reconstruction of a highly resolved tree of life. *Science*, 311, 1283-1287.
- Chevassus-au-Louis, B. 2006. Biodiversité, un nouveau regard. Dans « Les leçons inaugurales du Groupe ESA », Leçon inaugurale 2006, pages 9-54.
- Combes, C. 2001. Les associations du vivant, l'art d'être parasite. Flammarion, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, 348 pages.
- Costanza, R. *et al.* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
- CSPNB. 2007. La biodiversité à travers des exemples. MEDD/D4E, 104 pages.

- Cury, P. et Morand, S. 2004. Biodiversité marine et changements globaux : une dynamique d'interactions où l'humain est partie prenante. Biodiversité et changements globaux, Adpfe, Ministère des Affaires Etrangères, 50-79.
- Dagan, T. and Martin, W. 2006. The tree of one percent. *Genome Biology*, 7, 118.
- Delsuc, F. *et al.* 2006. Tunicates and not cephalochordates are the closest living relative of vertebrates. *Nature*, 439, 965-968.
- Diamond, J. 2006. Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie. Gallimard, Paris, 646 pages.
- Dimijian, G.G. 2005. Evolution of sexuality: biology and behaviour. *BUMC Proceedings*, 18, 244-258.
- Dubois, P.J. 2004. Vers l'ultime extinction, la biodiversité en danger. La Martinière, 191 p.
- Duursma, E.K. and Boisson, P.R.M. 1994. Global oceanic and atmospheric oxygen stability considered in relation to the carbon cycle and to different time scales. *Oceanologica Acta*, 17, 117-141.
- Duve (de), C. 1996. Poussière de vie. Fayard, Paris, 288 p.
- Eckert, R., Randall, D., Burggren, W. and French, K. 1999. Equilibre ionique et osmotique. Dans « Physiologie animale. Mécanismes et adaptation », De Boeck Université, Bruxelles, Paris, 571-626.
- Fike, D.A., Grotzinger, J.P., Pratt, L.M. and Summons, R.E. 2006. Oxidation of the Ediacaran ocean. *Nature*, 444, 744-747.
- Ehrlich, P and Ehrlich, A. 1981. Extinction. Ballantine Books, New York.
- FAO. 2006. Fishery Statistics, 3 tomes, volumes 98/1, 98/2 and 99, 560, 119 et 237 pages.
- Fenical, W. *et al.* 1999. Marine-derived pharmaceuticals and related bioactive agents. In "From monsoons to microbes, understanding the ocean's role in human health". Committee on the Ocean's Role in Human Health, Ocean Studies Board, Commission on Geosciences, Environment and Resources, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., pages 73-82.
- Finlay, B.J. 2002. Global dispersal of free-living microbial eukaryote species. *Science*, 296, 1061-1063.
- Flenley, J. and Bahn, P. 2003. The enigmas of Easter Island. Oxford University Press, 256 p.
- Fraser, C., Hanage, W.P. and Spratt, B.G. 2007. Recombination and the nature of bacterial speciation. *Science*, 315, 476-480.
- Gaston, J.J. and Spicer, J.I. 1998 et 2004. Biodiversity, an introduction. Oxford, Blackwell Science, 1st and 2<sup>nd</sup> editions, 191 pages.
- Gaston, K.J., *et al.* 2003. Habitat conversion and global avian biodiversity loss. *Royal Society for the Protection of Birds*, London, 270, 1293-1300.
- Gould, S.J. and Eldredge, N. 1993. Punctuated equilibrium comes of age. *Nature*, 366, 223-227.
- Gouyon, P.H. *et al.*, 1997. Les avatars du gène. La théorie darwinienne de l'évolution. PUF, Paris, 364 pages.
- Gouyon, P.H. *et al.* 2006a. Débat sur la biodiversité. La biodiversité. Focus du CNRS, 6-11.
- Gouyon, P.H. *et al.* 2006b. La biodiversité en danger. La biodiversité. Focus du CNRS, 30-35.
- Gros, P. 2006. Quelles réponses à la raréfaction des ressources vivantes marines ? Quatrième Assises Nationales du Développement Durable, Nantes, 12 octobre, 2006, 18 pages.
- Guégan, J.F. et Renaud, F. 2004. Vers une écologie de la santé. Biodiversité et changements globaux, Adpfe, Ministère des Affaires Etrangères, 100-135.
- Harvell, C.D. *et al.* 1999. Emerging marine diseases-climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285, 1505-1510.

- Hector, A. and Bagchi, R. 2007. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 448, 88-191.
- Hugues, J.B. *et al.* 1997. Population Diversity: its extent and extinction. *Science*, 278, 689-692.
- Jackson, J.B.C. *et al.* 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293, 629-638.
- Kennedy, T.A. *et al.* 2002. Biodiversity as a barrier to ecological invasion. *Nature*, 417, 636-638.
- Laurance, W.F. *et al.* 2002. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments : a twenty-two years investigation. *Conservation Biology*, 16, 605-618.
- Leakey, R. et Lewin, R. 1997. *La sixième extinction, évolution et catastrophes*. Paris, Flammarion, 344 pages.
- Lecointre, G. et Le Guyader, H. 2001. *Classification phylogénétique du vivant*. Editions, Belin, 543 pages.
- Lee, K.A. and Klasing, K.C. 2004. A role for immunology in invasion biology. *Trends in Ecology and Evolution*. 19 (10), 523-529.
- Le Guyader, H. 2005. La théorie de l'évolution: quel futur ? *Le Banquet*, 22, 123-144.
- Lévêque, C. et Mounolou, J.C. 2001. *Biodiversité. Dynamique biologique et conservation*. Dunod, 248 pages.
- Lorance, P. 2003. Grenadier, empereur et autres espèces profondes de l'Atlantique NE. Pêches émergentes et déclinantes, espèces longévives. Dans « Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes », Editions Tec & Doc Lavoisier, Rapports sur la Science et la Technologie de l'Académie des Sciences, n° 17, pp 89-200.
- Loreau, M. *et al.* 2003. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 294, 804-808.
- Lubchenco, J. *et al.* 1991. The sustainable biosphere initiative: an ecological research agenda. *Ecology*, 72, 371-412.
- Magnani, F. *et al.* 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 447, 848, 852.
- Martin, P.S. 1984. Prehistoric overkill: the global model. *Quaternary extinctions*, University Arizona Press, Tucson, 354-403.
- Maurel, M.C. 2003. *La naissance de la vie. De l'évolution prébiotique à l'évolution biologique*. Dunod, UniverScience, 194 pages.
- May, R. M. 1992. How many species inhabit the Earth? *Scientific American*, 267, 42-48.
- Millenium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. WashingtonDC, Island Press, 137 p.
- Myers, N. 1979. *The sinking ark: a new look at the problem of disappearing species*. Oxford Pergamon Press.
- Myers, N. *et al.* 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.
- Nicolas, A. 2004. 2050, Rendez-vous à risques. *Pour la Science*, Belin, 191 pages.
- Palmer, M. *et al.* 2004. Ecology for a crowded planet. *Science*, 304, 1251-1252.
- Palumbi, S.R. 2001. Humans as the world's greatest evolutionary force. *Science*, 293, 1786-1790.
- Parkes, R.J. *et al.*, 1994. Deep bacterial biosphere in Pacific Ocean sediments. *Nature*, 371, 410-413.
- Parmesan, C and Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impact across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Pauly, D. *et al.* 2002. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418, 689-695.
- Pelt, J.M. 1997. *Plantes en péril*. Fayard, 253 pages.
- Pimm, S.L. and Lawton, J.H. 1998. Planning for biodiversity. *Science*, 279, 2068-2069.

- Pörtner, H.O. and Knust, R. 2007. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, 315, 95-97.
- Purvis, A. and Hector, A. 2000. Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405, 212-219.
- Renaud, F. *et al.* 2006. Impact sur la santé. La biodiversité. Focus du CNRS, 24-29.
- Raven, P.H. 2002. Science, sustainability and the human prospect. *Science*, 297, 954-958.
- Roberts, R.G. *et al.* 2001. New ages for the last Australian megafauna : continent-wide extinction about 40 000 years ago. *Science*, 292, 1888-1892.
- Root, T.L. *et al.* 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421, 57-60.
- Sala, O.E. *et al.* 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287, 1770-1774.
- Stenseth, N.C. *et al.* 2002. Ecological effects of climate fluctuations. *Science*, 297, 1292-1296.
- Stone, R. 2007., A world without corals ? *Science*, 316, 678-681.
- Rosenzweig, M.L. 1995. Species diversity in space and time. Cambridge University Press, 436 pages.
- Teyssèdre, A. 2004. Vers une sixième grande crise d'extinctions ? Biodiversité et changements globaux. Adpfe, Ministère des Affaires Etrangères, 24-49.
- Thomas, C.D. *et al.* 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- Thuillier, W. 2007. Climate change and the ecologist. *Nature*, 448, 550-553.
- Torchin, M.E. *et al.* 2003. Introduced species and their missing parasites. *Nature*, 421, 628-630.
- Troader, J.P. et Laubier, L. 2003. Introduction à « Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes », Editions Tec & Doc Lavoisier, Rapports sur la Science et la Technologie de l'Académie des Sciences, n° 17, pp 1-13.
- Trommeter, M. et Weber, J. 2004. Développement durable et changements globaux : le développement durable l'est-il encore pour longtemps ? Biodiversité et changements globaux, Adpfe, Ministère des Affaires Etrangères, 136-161.
- Van Montagu, M. 2006. De la nécessité des plantes transgéniques. « Un monde meilleur pour tous, projet réaliste ou rêve insensé ? », premier Colloque du Collège de France à l'étranger, Bruxelles, 8-9 mars 2006.
- Van Zullen, M.A. *et al.* 2002. Reassessing the evidence for the earliest traces of Life. *Nature*, 418, 627-630.
- Vitousek, P.M. *et al.*, 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499.
- Walther, G.R. *et al.*, 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- Wang, T. and Overgaard, J. 2007. The heartbreak of adapting to global warming. *Science*, 315, 49-50.
- Weber, J. *et al.* 2006. Gestion durable. La biodiversité. Focus du CNRS, 36-42.
- Wilson, E.O. 1993. La diversité de la vie. Editions Odile Jacob, Paris, 496 pages.
- Wolfe, N.D., Dunavan, C.P. and Diamond, J. 2007. Origins of major human infectious diseases. *Nature*, 447, 279-283.
- Worm, B. *et al.* 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314, 787-790.