

Hasard, nécessité et biodiversité¹ - une assurance pour la vie -

Alain Pavé

« Quelque invraisemblable que cela paraisse, personne n'avait tenté jusque-là une théorie générale des jeux. Les Babyloniens sont peu spéculatifs. Ils acceptent les décisions du hasard, ils lui livrent la vie. » (Jorge Luis Borges, La loterie de Babylone, in Fiction, Gallimard, 1957).

On ne peut qu'être surpris en observant de près le monde de la vie sous l'angle de la biologie, ou lorsque, plus prosaïquement, on contemple la nature, de constater le rôle tenu par le hasard dans son fonctionnement et cela à presque tous les niveaux d'organisation, du gène à l'écosystème. Le seul de ces niveaux qui semble faire exception est celui des organismes puisque là, il y a nécessité d'avoir une machine qui fonctionne sans trop d'aléa. Jacques Monod a déjà montré que le hasard et la nécessité marquent donc bien le monde du vivant, le « destin » de ces entités en continuel mouvement, en perpétuel changement et en constant renouvellement (Monod, 1970).

Mais alors pourquoi subsiste-il une part aussi importante de hasard, après une évolution de ces systèmes vivants, qui s'est étendue sur près de 4 milliards d'années ? Certes cette évolution est un gigantesque « bricolage », mais au cours du temps, elle semble écarter l'inutile et le non fonctionnel. Elle a produit des résultats observés tous les jours, à savoir une étonnante diversité des êtres vivants qui cohabitent, qui fonctionnent et vivent ensemble. Parmi les processus, où intervient le hasard, la sexualité joue un rôle important. C'est l'une des « inventions » majeures de la vie, dont F. Jacob a écrit qu'elle « fournit ainsi une marge de sécurité contre les incertitudes du milieu. C'est une assurance sur l'imprévu. » (Jacob, 1981).

Nous proposons ici d'étendre cette affirmation à l'ensemble des processus biologiques où le hasard joue, en considérant qu'il a pour rôle fondamental d'engendrer et de garantir de la biodiversité pour assurer la pérennité de la vie. Nous allons même plus loin en supposant que ces processus résultent d'une sélection. Donc loin d'un hasard contingent, considéré comme une « externalité » nous sommes devant un hasard sinon fabriqué, du moins sélectionné. Il est analogue à celui que nous construisons pour nos « jeux de hasard » ou pour des algorithmes numériques, écrits afin de résoudre certains problèmes analytiques comme des problèmes d'optimisation. Il est d'ailleurs significatif que certains de ces algorithmes sont qualifiés de génétiques. On pourrait même pousser l'analogie en disant que les systèmes vivants doivent changer constamment, vu leur environnement fluctuant. Ils doivent, résoudre continuellement des problèmes d'adaptation. Dans une géométrie complexe, celle de leur environnement, faire appel à des processus stochastiques peut être une procédure efficace pour trouver des « solutions acceptables », en l'occurrence des organismes qui fonctionnent dans cet environnement.

Au bout du compte, s'il y a bien « hasard et nécessité », il y a aussi « nécessité du hasard » pour le maintien de la vie sur la planète. Et si l'on regarde les conséquences en

¹ Ce texte est un résumé d'un document plus long qui devrait faire l'objet d'un ouvrage dans les prochains mois.

termes de « gestion des systèmes vivants et des ressources biologiques », pour nos sociétés, on peut de plus en deviner son utilité pratique.

1. Une assurance pour la vie

Le hasard fournit non pas une garantie mais une assurance pour la vie. L'histoire biologique de la planète est la seule expérience à large échelle que nous connaissons pour le moment. Elle est ponctuée d'accidents sévères, de ce que les paléontologues ont appelé de « grandes extinctions », suivies par des sursauts de diversifications avec l'apparition de nouveaux groupes taxonomiques (figure 1). Or aucun effondrement ne s'est traduit par la disparition de tous les êtres vivants. Nous sommes là pour le constater. Les systèmes vivants, dans leur ensemble, semblent donc avoir dans leurs potentialités la possibilité de rebondir. Beaucoup ont disparu, mais parmi ceux qui restent, certains peuvent de nouveau être à l'origine de nouveaux groupes. Cela signifie qu'avant l'accident, dans leur ensemble les existants étaient suffisamment différents pour qu'il s'en trouve de résistants.

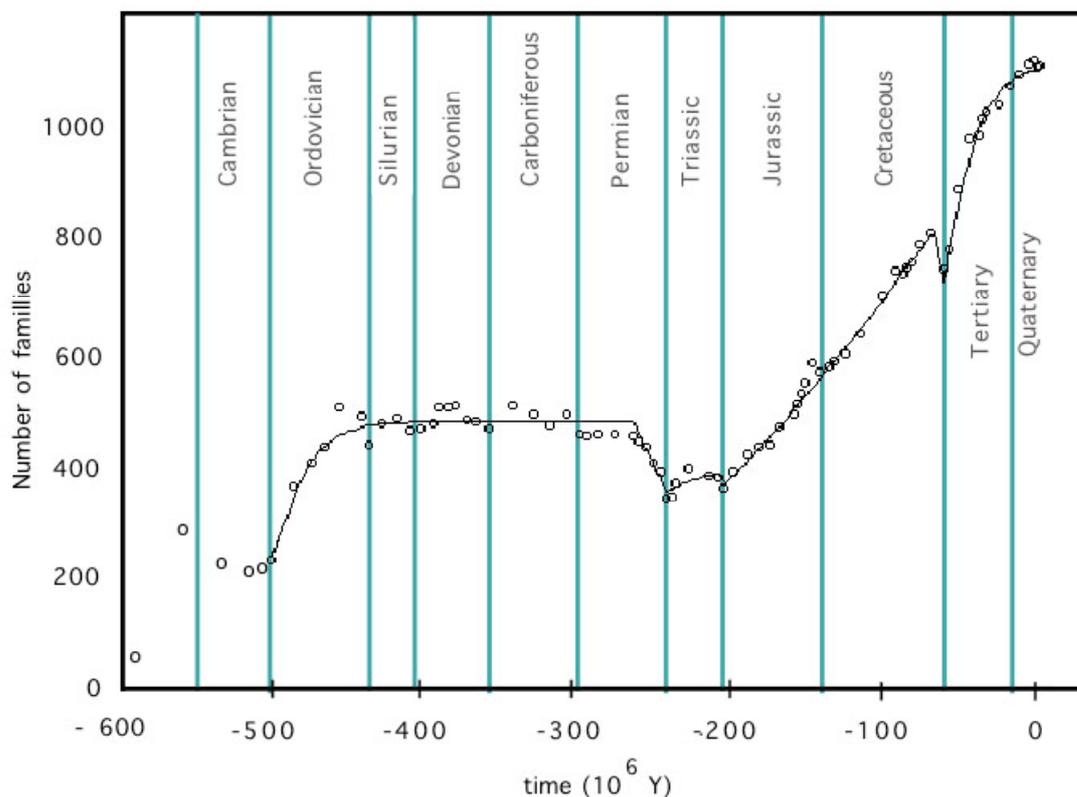


Figure 1- Évolution de la biodiversité au cours des âges géologiques depuis le pré-Cambrien (données provenant de la base de données paléontologiques développée par Sepkoski : cf. Courtillot et Gaudemer, 1996 et Pavé et al, 2002). Les variations enregistrées sont importantes et dues à des perturbations et à des évolutions environnementales. La courbe « moyenne » est la représentation graphique d'un modèle logistique par morceaux enchaînés. On notera au passage qu'avant la grande radiation cambrienne, une première émergence d'organismes multicellulaire a eu lieu : la radiation d'Ediacara, du nom des collines au nord d'Adélaïde en Australie où l'on a trouvé les premiers fossiles de ces organismes. Ces organismes semblent avoir tous disparu, ou du moins n'en a-t-on pas trouvé de formes plus récentes qui puissent leur être apparentées. C'est sans doute la première grande extinction que l'on ait observée. Mais déjà elle a été suivie par l'extraordinaire radiation du Cambrien.

Le processus naturel de diversification est largement fondé sur un jeu de hasard, en jouant un maximum possible de combinaisons, des organismes adaptés peuvent avoir des chances d'apparaître.

Dans la nouvelle géométrie de l'environnement, dans l'espace des paramètres environnementaux, une exploration large, principalement combinatoire, est un moyen de trouver une solution viable.

Enfin, bien que la vie soit apparue très tôt dans l'histoire de la terre, les premiers pas ont été très lents (cf. figure 2). On peut penser que ce temps a été nécessaire à la mise en place des processus de diversification, notamment ceux qui agissent au niveau du génome.

On précisera cependant qu'en matière paléontologique, il ne faut pas confondre ce qui est observé avec ce qui s'est effectivement réalisé. Des événements ont pu se produire ne laissant aucune trace. D'autres en ont laissé, mais on ne sait pas encore lire dans les archives naturelles. Enfin, le dépouillement de ces archives peut mener des interprétations divergentes. Pour ne prendre qu'un exemple récent, on pourra se référer au débat sur la météorite de Chicxulub au Mexique, supposée avoir été à l'origine de la dernière grande extinction, celle des dinosaures (cf. Par exemple, le dossier de La Recherche, dans son numéro d'octobre 2004).

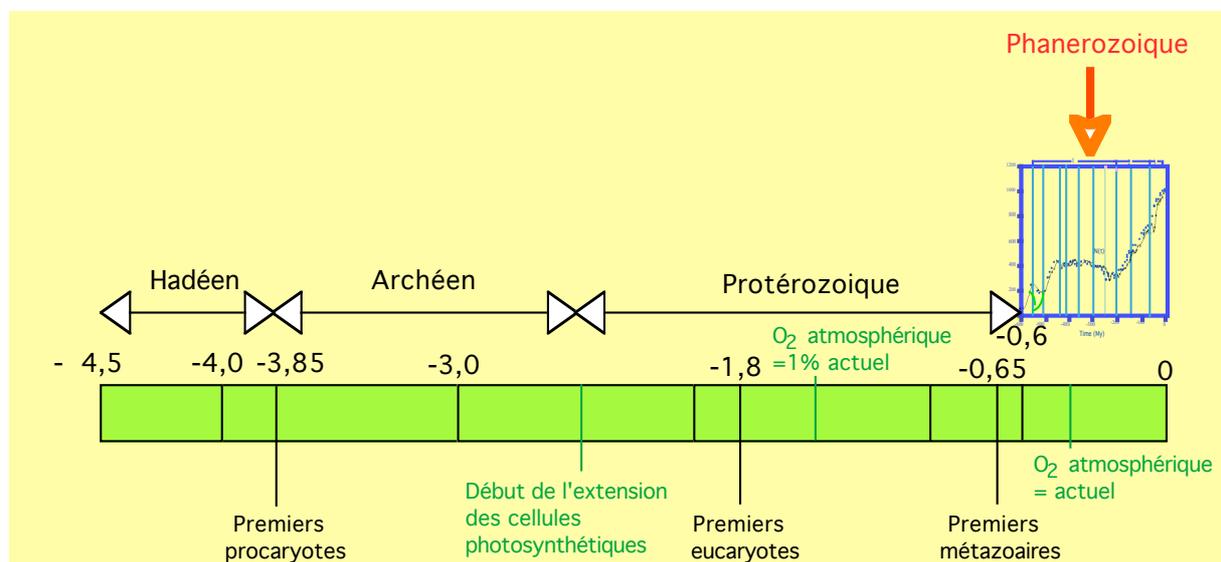


Figure 2. Échelle de temps de l'évolution, l'échelle d'espace étant la planète. On notera que les premiers pas sont très lents et que tout s'accélère à partir du Cambrien. La place de la figure 1 est repérée à droite du schéma. On fait aussi figurer un phénomène important, à savoir l'extension des organismes photosynthétiques qui modifient complètement les conditions de vie sur la planète. Cette transformation se fait lentement au niveau atmosphérique et il faut attendre que la couche d'ozone soit bien installée pour que la colonisation des continents soit possible (fin du silurien, début du dévonien).

1.1. La survie et l'évolution des populations et des espèces

a) Le brassage génétique

Plaçons nous à une autre échelle pour mieux détailler le processus, le niveau populationnel. Une population est constituée d'individus de la même espèce pouvant échanger des gènes. Cela n'est possible que si les individus sont « proches » dans le temps (même génération ou générations voisines) et dans l'espace (temps de parcours compatible avec cet échange de gènes). Une population ne pourra survivre, sur le long terme, que si les individus des générations successives sont « en bonne santé » et si, parmi eux il y en a suffisamment qui peuvent résister à des fluctuations de leur environnement.

Or, la sexualité, qui s'exprime à l'intérieur de beaucoup de ces populations, est un moyen non seulement d'échanges de gènes, mais aussi de brassage génétique. Et même les populations non sexuées, principalement les populations microbiennes, ont mis en place des processus analogues, par exemple des échanges de matériel génétique (e.g. le facteur F, les plasmides) ou des modifications du système de contrôle des erreurs (système SOS). Enfin on a constaté, dans les espèces végétales où l'autogamie² est possible des mécanismes qui limitent et même parfois empêchent complètement l'autofécondation.

Battre le jeu de cartes génétique permet d'abord d'éviter une dégénérescence des descendance successives. C'est ensuite une façon d'engendrer des individus suffisamment différents pour qu'une part puisse survivre à n'importe quelle perturbation majeure. Généralisé à l'ensemble des populations constituant une espèce, ce mécanisme assure sa survie, et lui confère la possibilité d'évoluer.

Il existe d'autres mécanisme permettant de redistribuer les cartes, voire d'en changer quelques unes, que nous allons récapituler ci-après.

b) La distribution dans l'espace

Un autre facteur assurant la pérennité d'une espèce est son expansion dans l'espace, c'est-à-dire qu'elle colonise les endroits qui lui sont favorables, ceux faisant partie de sa niche écologique. Vu que l'effet d'une perturbation est limité, tant qu'elle n'a pas détruit la planète, les individus éloignés peuvent en réchapper, puis de nouveau s'étendre et évoluer. Collectivement, l'assurance est d'autant plus efficace si les individus de différentes espèces, partageant la même niche, se mélangent en se distribuant au hasard dans l'espace géographique (figure 3). Cela implique aussi que le partage de niche soit possible, et donc que l'exclusion compétitive ne s'exprime pas sur le long terme. Pour cela, les processus démographiques doivent permettre la cohabitation, voire la coopération, entre populations mélangées³. Cela peut expliquer l'extraordinaire diversité des forêts tropicales humides et le fait que cette diversité s'observe même à fine échelle (cf. figure 4). Par exemple, dans la forêt de la Guyane française, on observe dans un hectare une richesse spécifique allant de 150 à 200 espèces d'arbres différents (englobant environ 2000 individus de diamètre supérieur à 2 cm).

c) Évolution à long terme à l'échelle de la biosphère

En considérant l'addition de ces mécanismes à de multiples espèces, et à d'encore plus nombreuses populations, sur une très longue période et à l'échelle de la biosphère, on peut ainsi expliquer la survie de certaines d'entre elles aux grandes extinctions. Les rescapées sont alors soumises aux processus de diversification. On enregistre alors une « explosion » de la biodiversité. On peut ainsi concevoir que l'évolution des êtres vivants, leur complexification et leur organisation (Carroll, 2002) soit un simple sous-produit des mécanismes aléatoires de survie, du « contrat » d'assurance-vie des espèces avec le hasard.

² Ce sont des espèces où un même individu porte à la fois les gamètes mâles et femelles (fleurs hermaphrodites, c'est le cas de la plupart des Angiospermes).

³ On pourra se référer aux travaux de Hubbell sur « la théorie neutraliste de la biodiversité (Hubbell, 2000), ainsi qu'aux discussions qu'elle suscite (cf, par exemple, Whithfield, 2002, Clark & MacLachlan, 2003, Chave, 2004,).

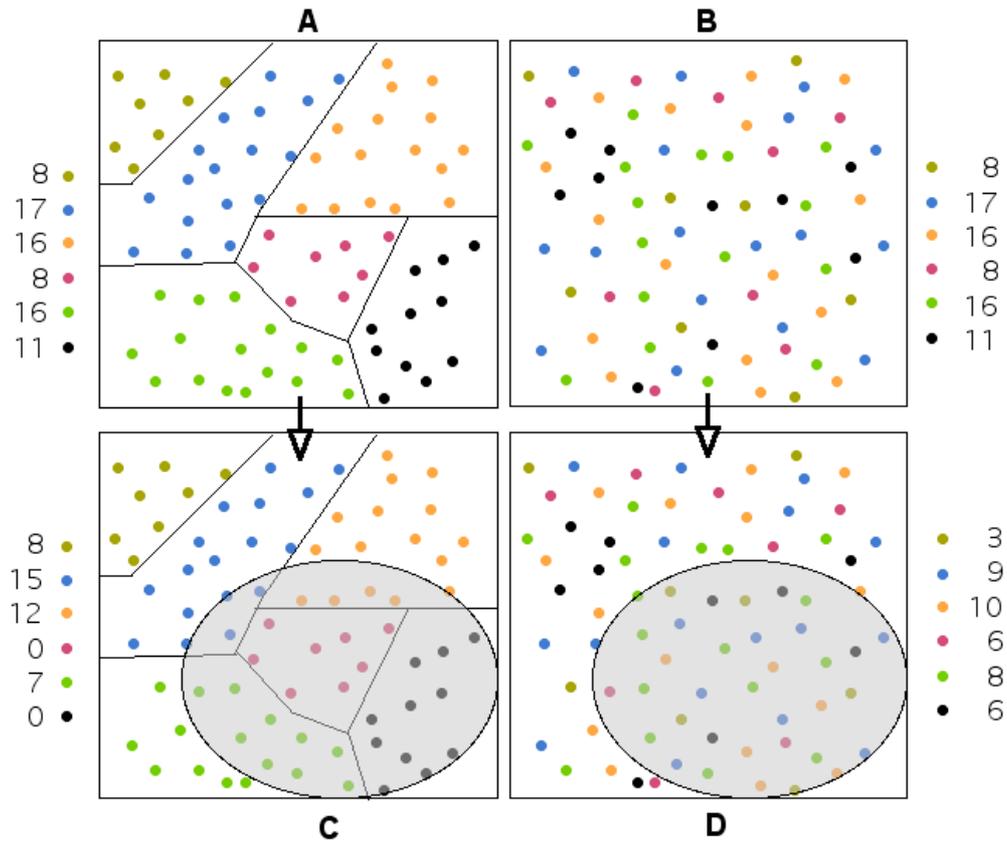


Figure 3. Modèles de distribution des arbres en forêts tropicales et sensibilités à des perturbations environnementales. En pratique, on rencontre dans l'immense majorité des cas une distribution de type B, à peu près jamais de type A. Survient une catastrophe. Dans la situation C, deux espèces ont disparu, aucune dans le cas D. En B et D, la répartition spatiale est aléatoire, mais cela n'est pas par hasard.



Figure 4. Vue aérienne d'une forêt tropicale humide (Guyane Française). À l'échelle limitée de la photo, la biodiversité paraît déjà importante et la distribution des arbres est très hétérogène. C'est un *patchwork* d'individus voisins mais d'espèces différentes. Cela contribue à considérer ces forêts comme complexes par rapport aux forêts tempérées. Dans sa théorie neutraliste de la biodiversité, Hubbell propose d'expliquer le maintien d'une telle biodiversité par des démographies peu différentes entre les espèces en question. Cependant, cette théorie ne prend pas en compte la nature apparemment aléatoire de la distribution des arbres dans l'espace alors que c'est peut-être là l'une des clés du problème. Photo A. Pavé.

Ces deux exemples sont localisés dans le temps et dans l'espace. Ils illustrent notre conjecture. Mais le nombre des processus de diversifications connus est étonnamment très important. En fait, plusieurs jeux de hasard semblent avoir été sélectionnés au cours de l'évolution. Ainsi, même si toutes les espèces sexuées disparaissaient, même si un impact majeur à large échelle se produisait, des possibilités de survie, de maintien puis de diversification subsisteraient. Nous avons tenté de récapituler celles qui sont connues. Les principaux processus impliqués sont génétiques, mais il en existe aussi d'écologiques.

2. Les principaux processus de diversification biologique et de maintien de la biodiversité

Le problème posé d'assurance-vie est donc transformé en celui de la diversité biologique et de ses mécanismes d'apparition, de disparition, de maintien ou de conservation. Pratiquement, lorsqu'on étudie les processus impliqués dans la dynamique de la biodiversité, on est confronté à la difficulté majeure d'appréhender leur variété à tous des niveaux d'organisation où ils agissent, du gène à l'écosystème. Nous n'entrerons pas dans leur description détaillée en nous limitant à une liste commentée. Un ouvrage plus complet sera prochainement publié sur le sujet.

2.1. Modifications du génome

Le premier niveau est celui du gène et du génome. Les principaux processus connus sont :

- Les modifications intragénomiques : les mutations ponctuelles, les déplacements d'éléments mobiles (transposons), les copies, les délétions et les insertions.
- Les apports externes : transferts horizontaux de gènes, en particulier par des virus, à l'intérieur d'une espèce ou entre espèces différentes.

Le champ des possibles est extrêmement grand. En comparaison, le nombre des réalisés et des exprimés est très petit. Le hasard joue soit comme facteur externe, dans le cas des mutations dues à des radiations ou à des produits mutagènes, soit comme facteur interne dans la mesure où on peine à mettre en évidence d'autres causes (cas des éléments mobiles). Elles participent probablement de dynamique interne des cellules.

2.2. Reproduction et brassage du génome

Lors de la reproduction sexuée, il se produit un brassage du génome. Tout d'abord, lors de la gamétogenèse, à partir des « cellules germinales », il peut se produire des modifications chromosomiques au moment de la méiose (par exemple, des crossing-overs, c'est-à-dire des échanges de morceaux de chromosomes d'une même paire). Ensuite, les gamètes provenant de deux individus différents se transmettent activement (surtout chez les animaux supérieurs où le choix du partenaire, donc d'un génotype, est en partie aléatoire). Sinon ils sont transmis par d'autres voies que la rencontre directe de partenaires. On peut alors distinguer le transport actif, par des vecteurs, comme les insectes pollinisateurs, et le transport passif, comme le vent et l'eau.

Enfin, la fécondation correspond à la mise en commun des deux patrimoines génétiques portés par les deux gamètes dont les génomes sont compatibles ; mais en sachant bien qu'il existe aussi une certaine hétérogénéité dans l'ensemble des gamètes pouvant participer à cette fécondation. Chez les plantes, la possibilité de polyploïdie, par exemple de tétraploïdie, est un facteur de diversification important, qui permet notamment, l'hybridation interspécifique.

Tous ces processus assurent les transferts « verticaux » des gènes, c'est-à-dire dans la descendance, de parents à enfants, par opposition au transfert horizontal. **Le hasard intervient dans la génétique, un**

peu comme lors du brassage d'un jeu de cartes. Ils sont plus limités dans leur étendue et leurs conséquences que les modifications du génome, mais les occurrences, à savoir les « accouplements », sont beaucoup plus fréquentes.

2.3. Expression du génome au niveau individuel de l'organisme : développement, organisation et physiologie

Les organismes, monocellulaires ou multicellulaires, constituent l'expression la plus immédiatement visible du génome. Il s'agit du phénotype. Deux phases principales de son développement sont à considérer :

- Le développement de l'embryon (embryogenèse) et le développement post-embryonnaire pour arriver à un individu viable et capable de se reproduire.
- La vie de l'organisme « adulte », l'adéquation de sa physiologie, donc de son métabolisme et de ses mécanismes de régulation, ainsi que de son comportement avec ses contraintes internes et avec son environnement (nécessité de maintenir son état dans son domaine de viabilité), et enfin l'expression de ses capacités reproductrices.

On soulignera au passage que la génétique des cellules somatiques reste encore largement à faire. En effet, la plus grande partie de ces cellules est en constant renouvellement. Des différences génétiques peuvent apparaître dans les lignées cellulaires pouvant conduire à des pathologies, comme le cancer.

Enfin, même au niveau de la « machine-organisme » et hors de la reproduction, des processus engendrant du hasard, ont été sélectionnés. Il en va ainsi pour les systèmes immunologiques. Devant la multiplicité des antigènes possibles, la solution sélectionnée par l'évolution est de produire constamment un grand ensemble d'anticorps potentiels et si l'un d'eux est efficace d'en amplifier la synthèse. C'est un processus de sélection au niveau de l'organisme. Devant un risque inconnu et imprévisible, jouer sur une combinatoire, non plus des espèces, comme à l'échelle de l'évolution, mais des macromolécules est une solution efficace comme « assurance-vie » au niveau individuel. Mais d'autres ont trouvé la solution pour augmenter leur pathogénécité, c'est le cas par exemple du plasmodium du paludisme ou du VIH qui changent rapidement leurs protéines de surface antigéniques. Un véritable course s'engage alors avec le système immunitaire.

Nécessité oblige, la part du hasard est réduite. Il existe cependant une certaine latitude, aussi deux clones ayant des patrimoines génétiques identiques ont-ils des dissemblances, traduisant des différences dans l'expression du génome. Ce dernier a une structure très complexe autorisant des variations dans cette expression notamment chez les animaux supérieurs. Toutes proportions gardées, les mécanismes d'expressions interprètent, comme en musique, des variations sur un même thème ou s'arrangent en « canons », avec des décalages dans la transcription. **À ce niveau, le hasard est essentiellement contingent. Il intervient comme un facteur externe auquel l'organisme réagit par ses régulations.**

Mais il est aussi nécessaire, lorsqu'il est efficace, comme dans les processus immunologiques, alors cela signifie que les mécanismes le produisant ont été sélectionnés.

2.4. Populations, communautés et écosystèmes : organisations, échanges et flux de gènes, adaptations et sélection

Les organismes de la même espèce s'organisent en populations. Ces populations sont indépendantes ou interconnectées, on parle alors de métapopulations. Une population présente une certaine hétérogénéité génétique, qui se traduit par une différence phénotypique entre les individus et donc par une adéquation à des conditions environnementales et une possibilité d'adaptation physiologique plus ou moins grande à des perturbations. Le couple constitué par l'hétérogénéité génétique des populations et les variations de l'environnement entraîne la sélection de lignées adaptées et donc par une évolution

de la structure génétique de la population. Ce processus peut conduire à l'émergence d'une nouvelle espèce.

Des populations d'espèces différentes, vivant dans un même lieu géographique, constituent des communautés. Ces communautés plongées dans un milieu géophysicochimique forment un écosystème. Pour une part importante, les relations entre les individus, qu'ils soient de la même espèce ou non, se font au **hasard des rencontres et des voisinages** entre ces individus. Examinons quelques relations typiques

- Les croisements entre individus sont à but principalement reproductif. On distingue :
 - Les individus mobiles (surtout les animaux). La recherche du partenaire a une composante aléatoire. Cependant, il peut y avoir des préférences, ce qui revient à sélectionner certains individus plutôt que d'autres dans une population.
 - Les individus non mobiles (essentiellement les végétaux et la plupart des microorganismes). Par exemple, pour les végétaux supérieurs le processus de pollinisation est soit actif (animaux, le plus souvent des insectes), soit passif (gravité et mouvement des fluides du milieu : vent, eau). La dissémination des graines suit des processus analogues. Ces déplacements sont à forte composante aléatoire.

Les conséquences en termes de diversité génétique dépendent des partenaires et s'observent dans la descendance. Le hasard joue dans la transmission des gamètes et donc dans cette diversité génétique. La distribution spatiale des organismes dépend aussi de ces processus, c'est particulièrement vrai pour les individus non mobiles. Les incidences génétiques se font évidemment sentir à la génération suivante. En effet, la modification de la distribution spatiale joue sur les probabilités de rencontres et donc, avec un décalage temporel, aussi sur la diversité génétique.

- Les relations interspécifiques sont nombreuses. Elles ont des effets sur la variabilité génétique des populations concernées et aussi sur la diversité spécifique des communautés, par exemple par la disparition d'une population entière, par des mécanismes du type surprédation, ou surmortalité. Elles s'expriment lors de rencontres directes (prédation), ou de proches voisinages entre individus (compétition ou coopération). Tout dépend du nombre d'individus et de leur distribution spatiale dans un intervalle de temps donné.
- Un fait important est à souligner, celui de la contradiction manifeste entre le principe d'exclusion compétitive et la fréquence de systèmes naturels anciens et toujours très diversifiés, comme les forêts tropicales humides. Ils devraient être l'exception alors qu'ils sont la règle. En fait, plusieurs explications peuvent être avancées :
 - Par la distribution des paramètres démographiques suivant la théorie neutraliste de la biodiversité (Hubbell, *op. cit*), ou par une hétérogénéité spatiale du milieu, suivant de la théorie de la niche (Vandemeer, 1972).
 - D'autres éléments, comme la présence simultanée d'autres relations, surtout coopératives peuvent être avancés, en prolongement des travaux de R. Michod (Michod, 2000).
 - Enfin, on peut ajouter la forte composante aléatoire de la distribution spatiale des organismes, et c'est peut-être là le fait le plus important.

En fait, la biodiversité, dans un espace et dans une période donnée et quelle que soit sa mesure, dépend des « conditions initiales », à savoir de sa valeur au début de la période étudiée, puis du bilan entre, d'une part les processus interne de diversification et d'extinction biologiques et écologiques et, d'autre part, les flux de populations qui entrent (migrations) et qui sortent (émigration) de l'écosystème concerné.

On voit ainsi qu'il est plus judicieux d'avoir une vision dynamique que statique de la biodiversité. Cette dynamique résulte de la combinaison de tous ces processus et non pas d'un seul. Ils ont une

composante stochastique dans la mesure où ils résultent de déplacements et de distributions souvent aléatoires des individus dans l'espace physique. Elle dépend aussi de l'échelle⁴. Ainsi, l'expression des relations interindividuelles est principalement locale. En revanche, les paramètres populationnels et les hétérogénéités du milieu jouent à des échelles plus larges, parfois continentales (zones bioclimatiques et altitudinales).

2.5. Les changements à très long terme : l'Évolution

L'évolution d'une population, en termes de diversité génétique et phénotypique, résulte des brassages lors de la reproduction, des mécanismes de modifications du génome et de la sélection. Comme on l'a vu ces processus sont d'origine biologique et écologique. Ils ont une forte composante aléatoire et sont soumis à des événements eux aussi hasardeux. Progressivement, les organismes peuvent changer pour aboutir à de nouvelles espèces.

L'un des mécanismes supposé de cette évolution, appelée spéciation, est l'isolement de populations qui dérivent progressivement par rapport aux autres jusqu'à ce que leurs différences constituent une nouvelle espèce. Son génotype et son phénotype « génériques » dépendent du contexte où la sélection s'est exprimée.

Ce mécanisme évolutif est de type néo-darwinien et relève également de la théorie synthétique de l'évolution.

En revanche, la théorie neutraliste de l'évolution (Kimura et Ohta) ne place pas la sélection comme mécanisme déterminant pour l'apparition de nouvelles variétés et espèces, dans la mesure où elle suppose que seule l'accumulation de mutations neutres sans avantage sélectif conduit à des nouvelles espèces. Elle occulte en grande partie les contraintes environnementales dont on a pu vérifier expérimentalement les effets. Elle ignore aussi que si l'on crée artificiellement un critère de sélection, les caractéristiques génétiques et phénotypiques des individus d'une population changent. L'amélioration des espèces à des fins agronomiques montre que cette technique est efficace.

Au delà de ce débat, on remarque que ces théories de l'évolution donnent toutes un rôle important au hasard, et plus précisément au couple « hasard-sélection », mais elle ne mettent pas en avant le fait que les processus engendrant ce hasard pourraient aussi être un fruit de cette évolution.

On a souligné l'importance des systèmes coopératifs. En fait, les espèces évoluent dans leur environnement et dans cet environnement, elle sont plusieurs à le faire en même temps. Si ces évolutions ne sont pas indépendantes, notamment si elles conduisent à l'émergence de coopérations, on parle de coévolution.

Enfin on se rappelle aussi que des espèces nouvelles apparaissent, d'autres disparaissent au cours du temps et à différentes échelles, de la « parcelle » à la biosphère. Comme on l'a vu, à un moment donné, dans un endroit donné, dans un espace défini, la biodiversité est le bilan de ces deux flux⁵. On a vu le rôle du hasard dans le processus d'émergence de nouvelles espèces et donc de diversification. On a vu aussi le rôle des grandes perturbations environnementales dans la disparition. Celle-ci se produit également de façon permanente et « naturelle » (cf. Belovsky *et al*, 1999), mais aujourd'hui, elle est

⁴ Pour ce qui est de cette notion d'échelle et de niveau d'organisation des systèmes vivants, ainsi que des grandeurs caractéristiques de ces échelles et niveaux, on pourra consulter la contribution de J.C. André, G. Mégie et Cl. Schmidt-Lainé (2003).

⁵ On estime, à partir de données paléontologiques, qu'en moyenne une espèce donne naissance à deux espèces tous les 3 millions d'années (Kirchner et Weil, 2000, Bonhomme F., 2003). Ce processus peut paraître lent, mais si on l'étend à toutes les espèces peuplant la planète, l'apparition d'une nouvelle espèce, quelle que soit son origine, est beaucoup plus fréquente. Par exemple, si on suppose qu'il y a 3 millions d'espèces actuellement (estimation très basse), en moyenne une espèce nouvelle émerge tous les ans.

aussi le fait de l'homme. Cela étant il faut se garder de confondre disparition localisée d'une population et disparition d'une espèce.

2.6. Hasard, chaos, complexité

Ces mots, du langage courant, ou presque, sont aussi employés dans le langage scientifique. Pour le mot « hasard » l'utilisation est ancienne et dans de nombreuses disciplines. Pour chaos et complexité, c'est plus récent. Dans l'ouvrage à paraître, déjà signalé, nous discutons précisément de ces concepts et de leur sens dans les sciences de la vie. Ici, nous en donnons les éléments essentiels.

On rappelle que l'imprévisibilité du résultat d'une expérience ou de l'occurrence d'un événement caractérise l'intervention du hasard. Quand on regarde un processus où l'aléatoire intervient et qui se déroule au cours du temps, on remarque son allure erratique. Mais on peut faire la même remarque pour les phénomènes chaotiques. Il existe cependant des différences et la figure 5 en est une illustration sur des exemples simples. Dès lors que l'on considère que le hasard est produit par des processus endogènes, il reste cependant une question fondamentale : existe-t-il une relation entre chaos et hasard ? Ou, plus précisément, le hasard est-il une forme « ultime » du chaos ? Si c'est le cas, le hasard serait alors engendré par des processus non-linéaires. On pourrait par exemple supposer qu'on se rapproche d'un comportement aléatoire lorsque l'attracteur d'un processus chaotique serait dans un espace de grande dimension ou encore quand ce comportement serait obtenu par couplage de systèmes chaotiques simples. La figure 6 montre comment le fonctionnement simultané de deux processus chaotiques ne fournit pas à proprement parler du hasard, mais un résultat qui commence à y ressembler.

Pour ce qui est de la complexité, ce mot est utilisé depuis longtemps, mais a du mal à s'imposer comme concept : *"If a concept is not well defined, it can be abused. This is particularly true of complexity."* (Viscsek, 2002). Nous en avons discuté par ailleurs (Schmidt-Lainé et Pavé, 2003, 2004) et tenté d'en donner une définition opérationnelle en introduisant la notion de système complexe. Sans entrer dans les détails, la possibilité d'auto-organisation, conduisant à de la complexité, caractérise les systèmes vivants. Du point de vue thermodynamique, cette question a été traitée par Nicolis et Prigogine (1977).

Essayons d'esquisser un schéma mécaniste de cette auto-organisation. Imaginons des entités biologiques, par exemple des cellules, qui peuvent se diversifier. Chez certaines d'entre elles, au hasard et au cours du temps, apparaissent des possibilités d'associations, par exemple des protéines de surface complémentaires. Le hasard des déplacements amène ces entités complémentaires à se « coller » ensemble. On obtient alors une nouvelle entité bicellulaire. En prolongeant ce processus, on imagine sans peine pouvoir obtenir par agrégations successives un être multicellulaire, dont certaines parties se différencieront pour créer des organes et au total un organisme. Les organismes créés se diversifieront pour créer des populations puis des espèces distinctes. Ce processus d'auto-organisation est d'autant plus efficace que se produit une sélection de mécanismes produisant du hasard et donc des possibilités d'agrégation.

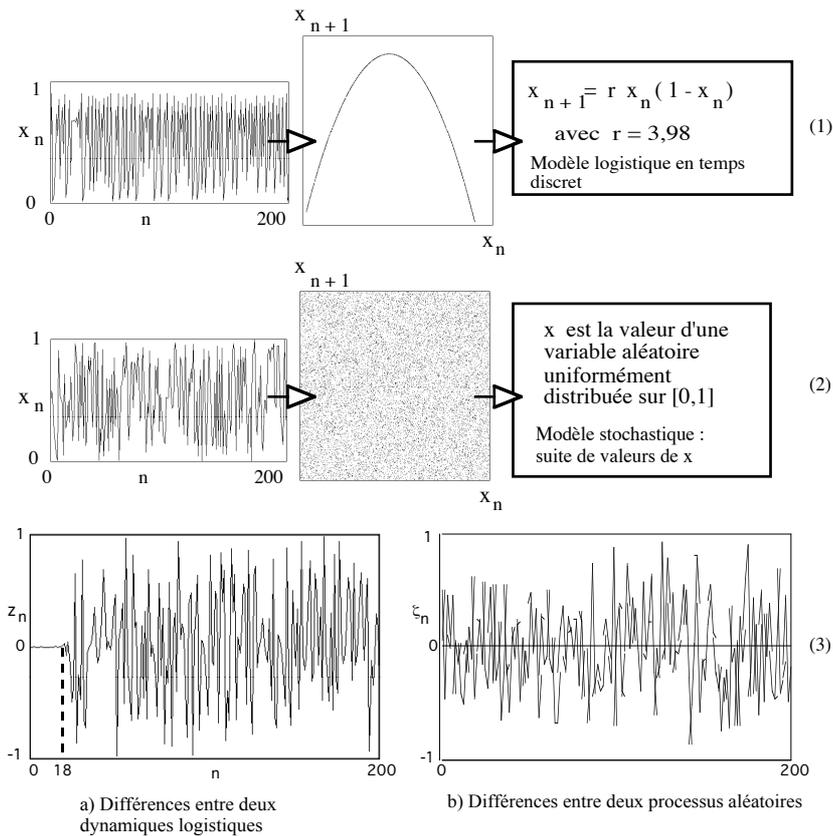


Figure 5. A gauche des schémas (1) et (2), les séries temporelles se ressemblent beaucoup. Mais avec une représentation adéquate : $x_{n+1} = f(x_n)$, elles se distinguent nettement. Le cas (1) correspond au modèle logistique en temps discret (May, 1976) qui peut exprimer un régime chaotique, c'est le cas ici ; les valeurs de la variable se distribuent sur une parabole. Le cas (2) correspond à un processus stochastique uniforme sur l'intervalle $[0,1]$. Les valeurs se répartissent dans le carré unitaire. Le schéma (3a) est engendré par le modèle $z_n = x_n - y_n$, où $x_{n+1} = r x_n (1 - x_n)$ et $y_{n+1} = r y_n (1 - y_n)$, avec la même valeur de r ($r = 3,98$), mais avec des conditions initiales très légèrement différentes : $x_0 = 0,5000$ et $y_0 = 0,5001$. Le schéma (3b) correspond aussi à l'expression $\zeta_n = \xi_n - \psi_n$, où ξ_n et ψ_n sont des valeurs de deux variables aléatoires uniformément distribuées sur $[0,1]$. Au début, le système chaotique est prévisible (connaissant x on connaît assez précisément y), mais sensibilité aux conditions initiales oblige, les deux séries divergent rapidement. En revanche, il n'y a aucun intervalle visible où les deux séries aléatoires sont proches. On ne peut prévoir le résultat qu'en probabilité.

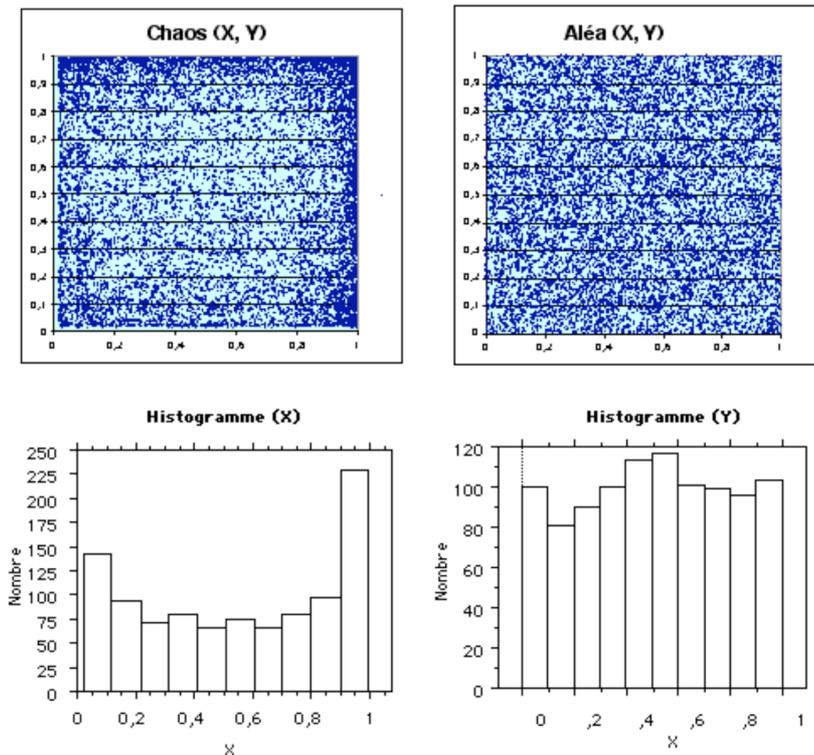


Figure 6. Comparaison entre deux processus, le premier chaotique (à gauche) et le second aléatoire (à droite). Le chaotique est créé par le modèle logistique en temps discret (avec $r = 3,98$, $x_0 = 0,2$ et $y_0 = 0,1$). L'aléatoire est engendré par la procédure ALEA() du logiciel Excel, qui fournit une répartition sensiblement uniforme (1000 nombres pour x et y) ; x et y sont non corrélés et les autocorrélations interne des séries de valeurs de x et de y sont quasi nulles. Le processus chaotique fournit une distribution en U, avec une accumulation sur les bords, x et y sont non corrélés. En revanche il y a évidemment une forte autocorrélation interne aux séries x et y . Un processus chaotique aussi simple ne fournit pas du hasard, mais on peut penser qu'un système plus complexe peut mieux le simuler.

3. Conclusion

« De l'une d'elles [des discussions « juridico-mathématiques » des Babyloniens] surgit la conjecture suivante : si la loterie est une intensification du hasard, une infusion périodique du chaos dans le cosmos, ne conviendrait-il pas que le hasard intervînt dans toutes les étapes du tirage et non plus d'une seule ? ». (J.L. Borges, La loterie de Babylone, in Fiction, Gallimard, 1957).

Nous avons donc montré les différents niveaux d'intervention et évalué l'importance fondamentale des processus aléatoires dans le fonctionnement et l'évolution des systèmes vivants :

- Au niveau du génome interviennent des mécanismes modifiant la séquence génomique, du codon aux morceaux d'ADN, tantôt par des dynamiques endogènes, tantôt par des transferts « horizontaux ». La modulation du système de réparation permet parfois d'accroître l'ampleur de ces processus, donc la diversité des individus d'une population.
- Lors de la reproduction sexuée sont à l'œuvre des processus de brassage génétique, de la genèse des cellules reproductrices à la fusion des gamètes en passant par le choix, en grande partie aléatoire, du partenaire. On observe même la mise en place de mécanismes préservant ou restaurant le brassage comme certaines conséquences évolutives pouvant le limiter, voire l'annuler. Par exemple, chez les plantes autogames où peuvent apparaître des processus immunologiques limitant l'autofécondation. Enfin, toujours chez les plantes, les possibilités de polyploidie et d'hybridation interspécifique sont un facteur important de diversification du monde végétal.
- La distribution des individus dans l'espace et la plus grande couverture spatiale possible assurent un vaste mélange, aussi bien pour les végétaux que pour les animaux. Cette distribution n'est pas en contradiction avec la théorie de la niche. En effet, selon les propriétés de l'espace considéré, les espèces présentes sont différentes, mais elles restent mélangées. La distribution aléatoire dans un espace, en perpétuel changement, empêche l'exclusion compétitive et protège contre les aléas environnementaux.

Ces processus assurant la diversification des systèmes vivants, dans un environnement incertain, et leur répartition spatiale ont, semble-il, été sélectionnés pour donner les meilleurs atouts de « survie » aussi bien pour les espèces, prises en particulier, que pour l'ensemble des existants sur la planète.

Évidemment, fruits d'une expérience naturelle, d'un vaste bricolage de l'évolution, il ne faut pas s'attendre à trouver des processus stochastiques idéaux comme ceux que l'on peut imaginer théoriquement. Mais ces réflexions permettent de construire des modèles de référence et de les confronter à la réalité des données et donc de pouvoir décrire plus précisément les processus. Il peuvent aussi montrer comment les utiliser.

Donc, il y a **nécessité du hasard pour les systèmes vivants**. Mais ce hasard n'intervient pas n'importe où ni n'importe comment. Ce point de vue change un peu les façons de voir. Plutôt que de chercher à toute force des déterminismes, cherchons et identifions les mécanismes engendrant du hasard, selon quelles distributions, et regardons les processus plus déterministes *a posteriori*. Alors que pour l'instant, l'on a plutôt tendance à faire le contraire : on cherche à toute force des déterminismes et le stochastique n'intervient qu'au second plan, souvent d'ailleurs comme une contrainte, comme une composante qui gêne et non comme un fait essentiel. En effet, nous avons une perception négative du hasard. Nous pensons qu'il perturbe nos sens, qu'il est un obstacle à la

4. Des enseignements pour la gestion des systèmes vivants

Émettre des hypothèses et des conjectures est partie intégrante de la démarche scientifique. En donner des preuves est essentiel, mais il est au moins aussi important d'en examiner les conséquences pratiques. Si nous mettons en évidence l'importance des processus aléatoires spontanés dans les systèmes vivants, c'est qu'il faut en tenir compte, dans certains cas. Cette gestion peut être rendue plus simple et plus efficace.

4.1. Les organismes

Pour la médication, il y a sans doute lieu de rester d'abord déterministe et, à cette image, de construire des modèles de référence et de traitement pour mieux intervenir en cas de dysfonctionnement. Il s'agit, par exemple, de modèles construits à des fins thérapeutiques pour soigner des maladies où, si besoin, une composante aléatoire peut être introduite pour tenir compte des incertitudes des mesures ou des « facteurs non contrôlés ». Le hasard pris en compte est, suivant notre terminologie, contingent, c'est-à-dire qu'il représente un « bruit de fond » et non pas un processus fondamental du « système organisme ».

Ce point de vue est largement répandu et avec juste raison car il conduit à des actions très souvent efficaces. Cependant, nous avons remarqué que les organismes utilisaient des combinatoires, issues de véritables « roulettes moléculaires », notamment dans le système immunitaire. Nous avons également vu que certains microorganismes employaient aussi des combinatoires pour déjouer ce système, par exemple le virus du SIDA mais aussi le plasmodium du paludisme par la production rapide de variants présentant des antigènes de surface très diversifiés. En tenir compte peut mener à des améliorations dans nos façons d'intervenir, par exemple, en limitant les processus combinatoires des agents pathogènes ou en amplifiant ceux du système immunitaire. On remarque au passage que ce point de vue introduit des concepts de biologie et d'écologie évolutive qui sont en passe de faire évoluer certaines thérapies. Il s'agit, par exemple, de l'introduction du couple « hasard-sélection », ou des modèles de l'écologie formalisant les relations entre cellules ou particules pathogènes et les cellules du système immunitaire. C'est l'introduction d'un tel point de vue, non standard en virologie, qui a conduit à une véritable révolution dans la vision du SIDA au milieu des années 1990⁶.

4.2. Les populations et les écosystèmes

Pour la gestion à long terme des populations et des écosystèmes, on peut utiliser la part du hasard dans les processus spontanés. Par exemple, pour la restauration des écosystèmes dégradés, il n'est pas forcément besoin d'être très interventionniste, pas uniquement dans un souci d'économie, mais aussi parce que les processus spontanés risquent de faire mieux que notre imagination. La pratique nous

⁶ On retiendra notamment, l'utilisation de concepts et de modèles mathématiques issus de l'écologie pour mieux comprendre le processus d'infestation d'un organisme par le VIH. Les articles de Wei *et al*, d'une part, et de Ho *et al*, d'autre part, dans *Nature* (*Nature*, 373, 1995, 117-122 et 123-126) ont ainsi remis complètement en cause les hypothèses en cours sur la « furtivité » du virus. À ce sujet, on pourra également consulter les travaux de Nowack *et al* (*Nature*, 375, 1995, 606-611). Il est significatif de noter que dans la liste des auteurs apparaissent des « modélisateurs » connus pour leurs travaux en écologie et en dynamique des populations. Cette catégorie de scientifiques est rompue aux travaux aux interfaces entre disciplines, riches de concepts et de méthodes.

montre quand même que la taille de la perturbation par rapport au milieu joue. La « cicatrisation » se fera mieux spontanément sur une petite superficie que sur une grande. C'est aussi une question de temps, laisser « faire la nature » est souvent plus lent que suite à une « bonne intervention » (par exemple pour la régénération des sols dégradés par une activité minière de surface). De la même façon, on peut laisser une large part à ces processus dans des écosystèmes naturels ou créés pour le long terme, par exemple les forêts spontanées ou plantées, dont l'existence s'établit sur des décennies et dans des espaces géographiques plutôt vastes. Cependant, cela ne nous dispense pas d'assurer un suivi et, si besoin, d'intervenir ponctuellement.

Le rôle des modèles est aussi important que pour la gestion des systèmes déterministes : introduction du hasard et simulations pour analyser les devenir probables, recalages réguliers si on observe une divergence par rapport à ce qu'on attend, définition des modes d'interventions, s'ils s'avèrent nécessaires, et évaluation de leurs impacts.

Pour les populations et les écosystèmes artificiels (par exemple, élevages et monocultures), la part du hasard est plus contingente étant empaquetée dans les « facteurs non contrôlés » au sens de la statistique des agronomes. On essaie, tant que faire se peut, d'en avoir une approche déterministe. Aux modèles est ajouté un « bruit » de fond pour tenir compte des aléas introduits par ces facteurs non contrôlés. Cela étant, on peut s'interroger sur de nouvelles pratiques, par exemple de cultures multispécifiques avec répartition aléatoire des diverses espèces cultivées pour diminuer les risques d'infestation et ainsi de limiter les intrants chimiques, en particulier les pesticides. On mime là des systèmes naturels diversifiés dont l'expérience nous apprend qu'ils sont très résilients et dont on a vu que la distribution aléatoire des individus dans l'espace est aussi un facteur de résistances aux aléas environnementaux. De fait, les modes de gestion agronomique seront de plus en plus inspirés par les approches écologiques.

4.3. La biodiversité

La gestion de la biodiversité est directement concernée par ce que nous venons d'exposer. Nous avons vu qu'il existe des mécanismes de diversification spontanés essentiellement fondés sur les processus aléatoires. Il existe aussi des mécanismes de réduction, eux aussi aléatoires. Il y a lieu de mieux les caractériser et de les modéliser. Nous avons vu également la nécessité d'une approche traitant ces processus dans le temps et dans l'espace, à différentes échelles et à différents niveaux d'organisation. Nous avons également vu qu'au niveau écologique le maintien de la biodiversité pourrait probablement être assuré en laissant largement fonctionner les processus spontanés et notamment ceux à forte composante aléatoire. Dans un souci de gestion de cette biodiversité, il y a lieu de tenir compte systématiquement de ces dimensions. Par exemple, il conviendra de répondre des questions comme celle-ci : comment aménager un espace régional permettant à la fois d'assurer des productions agricoles ou forestières tout en préservant la biodiversité ? Une question très actuelle quand on sait les mutations que l'agriculture mondiale doit effectuer, dans les cinquante prochaines années, pour nourrir la planète tout en limitant les effets négatifs, notamment les pollutions et l'érosion de la biodiversité.

Ces modes de gestion sont sans doute l'une des clés de l'ingénierie des systèmes écologiques et de la gestion des territoires (Barbault et Pavé, 2003, Caseau, 2003). Ils devraient inspirer les nouveaux modes de gestion des agrosystèmes.

Il y a un effort certain à faire pour modéliser l'évolution des écosystèmes diversifiés, qu'ils soient naturels, spontanés, ou artificiels et pour introduire dans ces modèles des modes de gestion, vu que les objectifs ne sont pas les mêmes. En effet, les écosystèmes laissés à leur fonctionnement spontané ont plutôt un rôle de préservation de la biodiversité alors que les écosystèmes diversifiés artificiels, de type « agriculture écologique⁷ », ont surtout un rôle de production.

Enfin, la gestion de la biodiversité, envisagée ici en termes écologiques, a évidemment une dimension génétique qu'il faut prendre en compte.

4.4. L'information et le patrimoine génétiques

La gestion de l'information et du patrimoine génétiques est une question essentielle. En idéalisant, on pourrait estimer que la gestion de la biodiversité lui serait réductible par la création des banques de gènes et de génomes *in vitro* ou *in silico*. Gènes et génomes ont une origine naturelle, produit de l'évolution biologique, et dans l'avenir peut-être artificielle, résultant d'une synthèse complète ou d'une synthèse partielle. Mais on sait déjà que la donnée de la séquence génétique n'est pas suffisante pour déterminer la structure et le fonctionnement d'un organisme. Le gène et le génome n'ont pas les moyens d'être égoïstes sinon de disparaître. La vision déterministe qui préside à ce genre de prospective, éliminant l'aléatoire, est sans doute un facteur de régression. C'est du moins une hypothèse raisonnable à la lumière de ce que nous avons exposé sur son rôle fondamental dans l'évolution et la préservation du vivant.

4.5. Conservation des ressources génétiques

Pendant une période assez longue, la conservation *in vivo* devrait rester prédominante parfois *in natura*, sinon dans des collections de matériels biologiques, dites de « ressources génétiques », pour les végétaux, sous forme de graines, pour les microorganismes, sous formes cryogénisées, pour les animaux, soit vivants ou sous forme de sperme et d'ovule conservés au froid. Il existe aussi des collections sous formes cultivées ou de cultivars. Des bases de données sont associées à ces collections permettant de documenter les échantillons. Il y a lieu de préserver un rôle au hasard dans le maintien des collections *in natura* ou sous forme d'organismes vivants, notamment pour éviter les dégénérescences.

4.6. Modifications génétiques : hybridation et sélection

On conserve donc, mais pour quoi faire ? En fait, l'utilisation principale est de faire des hybrides et de sélectionner des animaux ou des végétaux. Sélection et hybridation sont les premières manipulations génétiques inventées par l'homme, bien avant que la génétique soit découverte. Ainsi, le ver à soie est sélectionné et hybridé depuis 4000 ans. On pense que c'est le premier animal qui a donné lieu à ces *manipulations génétiques*, au moins d'une façon systématique. On sait que le hasard, lié aux processus aléatoires intervenant dans la reproduction, joue un rôle important, si bien que les caractères des descendants, hérités des parents, sont variables. Cette variabilité, qui peut paraître gênante dans un premier temps, est en fait une richesse. Cela étant, en sélectionnant à chacune d'entre elles les individus présentant un avantage par rapport au caractère sélectionné, on espère qu'au bout d'un

⁷ Le terme écologique n'est pas pris, ici comme dans tout le reste de cet article, au sens idéologique ou affectif, mais dans une acception strictement scientifique. On peut aussi parler d'ingénierie des systèmes écologiques ou d'agronomie « nouvelle », intégrant largement les connaissances et concepts de l'écologie : l'agroécologie.

certain nombre de génération observer une « amélioration » moyenne de ce caractère dans cette descendance⁸. Les critères de sélection sont divers, mais ils ont une finalité, par exemple la sélection de variétés résistantes à des conditions climatiques, à des parasites, ou encore de variétés produisant plus et avec une meilleure qualité. Ces techniques ne font qu'accélérer et diriger des processus évolutifs naturels. Ce sont aussi des bonnes preuves de la pertinence du schéma darwinien.

On notera qu'un phénomène intéressant est souvent observé suite à une hybridation : l'*hétérosis*, c'est-à-dire que les descendants de la première hybridation ont des performances supérieures à la moyenne des parents pour le caractère choisi. Cependant, les générations ultérieures, obtenues à partir de ces hybrides de première génération, perdent progressivement cet avantage. Si bien que l'on est obligé de refaire régulièrement cette manipulation. C'est une source de revenu importante pour les fabricants de semences. Les mécanismes à la base de ce phénomène d'hétérosis sont mal connus et se situent probablement dans l'expression du génome. Il faut également souligner que l'hybridation et la sélection jouent sur des caractères phénotypiques, généralement multigéniques et que la manifestation de ces caractères dépend aussi de l'expression du génome.

Néanmoins pour essayer d'appréhender ce phénomène, on peut utiliser l'analogie de la partie de cartes. On sait qu'il faut brasser le jeu de temps en temps, voire à chaque tour, par exemple pour le bridge, sinon les distributions successives se dégradent, la qualité et l'intérêt des parties diminuent. Nous pouvons émettre l'hypothèse que le phénomène d'hétérosis résulte de l'expression du génome produit du brassage de deux génomes parents, compatibles mais différents. Ensuite, la relative uniformisation des génomes des descendants ultérieurs fait perdre le résultat de ce brassage, les « cartes » ne sont plus suffisamment mélangées et le « jeu » perd de son intérêt.

On notera aussi que cette diminution de la qualité de la descendance est observée dans les lignées consanguines animales. Les deux mécanismes nous semblent proches et l'on pourrait les comprendre en étudiant les lignées pour analyser le processus de diminution des performances, notamment en utilisant l'expression du génome que constituent le transcriptome et le protéome.

Le recours aux modèles, essentiellement probabilistes, est courant et relativement ancien ; ce sont ceux de la génétique quantitative et de la génétique des populations. Il y a cependant lieu de les améliorer à la lumière des nouvelles connaissances.

En conclusion, il y a nécessité du hasard, celui qui est introduit par les croisements lors de l'hybridation, pour le maintien de lignées non régressives, voire pour leur amélioration. Sans nul doute que ces processus ont aussi joué, spontanément, dans l'évolution biologique sur des critères de sélection, non plus choisis par l'homme, mais imposés par le milieu. On suppose généralement qu'ils sont le produit de croisements aléatoires assurant une bonne adaptation des descendance à leur environnement.

4.7. Manipulations génétiques : insertion de gènes

Nous attaquons ici le délicat problème des « manipulations génétiques » et des « organismes génétiquement modifiés » qui en résultent. Il faut se méfier des mots. En effet, ce que nous venons d'exposer sur l'hybridation et la sélection en relève aussi, puisque ces procédés aboutissent à des organismes répondant à des critères donnés, définis à l'avance, en modifiant leur génome par

⁸ Cette manipulation peut porter sur plusieurs caractères.

croisements successifs. La différence avec l'insertion de gènes, utilisant le processus domestiqué de « transfert horizontal », c'est d'une part qu'on peut introduire des gènes exospécifiques, c'est-à-dire appartenant à d'autres espèces, ou dans l'avenir plus ou moins synthétiques, ce qui n'est pas possible par des techniques d'hybridation classiques, et, d'autre part que l'on ne manipule, pour l'instant, qu'un seul gène.

On voit bien que le hasard n'intervient apparemment plus comme processus fondamental au moment de la manipulation, mais d'une façon contingente, comme dans toute expérience où l'on n'est assuré que d'un pourcentage de succès.

Ensuite se posent les questions de la reproduction de cet organisme, de sa diffusion, de son hybridation avec des variétés proches et d'un éventuel avantage sélectif que lui procure cette greffe génétique. Ce sont les grandes questions biologiques et écologiques actuelles. Là nous retrouvons les processus, dont nous avons déjà discuté. Deux points cependant, ont été peu abordés jusqu'à présent. Le premier concerne l'estimation du transfert horizontal spontané et de l'étude précise des processus impliqués dans ce transfert. Outre l'importance de cette estimation pour l'utilisation d'OGM, il est aussi intéressant de pouvoir introduire ce processus dans les approches évolutives. Le second est relatif aux éventuelles modifications de la dynamique du génome et des divers mécanismes sous-jacents, conséquences d'une telle introduction. Par exemple, y a-t-il modifications des fréquences d'occurrences de certains processus comme l'activation de transposons ou comme les remaniements chromosomiques ?

Enfin, on notera que le recours aux modèles formels et aux simulations numériques est encore peu courant dans ce type d'étude.

4.8. Le clonage

Cette technique, obligatoire pour les microorganismes, courante et ancienne dans le domaine végétal, est maintenant envisagée chez les animaux supérieurs, y compris l'homme. Il n'est pas de notre propos d'en discuter les aspects éthiques, mais seulement d'en signaler les limites biologiques. En effet, d'une part un descendant obtenu à partir d'un génome d'une cellule somatique n'est pas, contrairement à ce qui est trop dit, la copie conforme du parent. En effet, il est fort probable que le génome de la cellule choisie ait subi diverses modifications liées à la dynamique propre de ce génome et aux mutations spontanées, conséquences des processus que nous avons vus. De plus, cette technique oblitère complètement les remaniements et le brassage du génome au moment de la reproduction dont on a vu les effets positifs et la richesse évolutive. Dans le clonage, les conséquences liées à l'érosion génétique risquent, pour la lignée envisagée, d'être pires que pour les lignées consanguines. C'est particulièrement vrai chez l'animal où le clonage n'a pas été soumis à la sélection évolutive, contrairement au végétal où la multiplication (ou reproduction) végétative est un phénomène spontané, mais qui n'exclut pas la reproduction sexuée. En tout cas pour l'homme, on peut dire que si l'on fait une lignée de clones, les tares ne cesseront de s'accumuler. Et même, dès le premier clone des problèmes surgissent, à l'image de Dolly.

4.9. Les molécules actives d'origine biologique

Les substances actives d'origine biologique proviennent du calage progressif des êtres vivants entre eux, à l'échelle des centaines de millions d'années de l'Évolution. Pour survivre et se maintenir, une

espèce doit « apprendre » à utiliser son milieu, sans l'épuiser, ni le rendre impropre à la survie, à se protéger contre les agressions, sans en être la propre victime, à coexister, voire à coopérer avec d'autres espèces. C'est un subtil réglage entre exploitation, défense, compétition, coexistence et coopération. Dans ce jeu, les substances chimiques, produits du métabolisme, lui-même expression de génome, jouent un rôle important pour la protection par l'émission de substances répulsives, pesticides ou antibiotiques, pour la coopération, par la synthèse de « signaux » chimiques attractifs, ou de composés utiles pour d'autres organismes (exemple des symbioses mycorhiziennes).

La recherche de substances actives, dont l'existence est un fruit du « hasard évolutif » ayant produit la biodiversité actuelle, a des fondements théoriques. Cependant, dans l'état actuel de nos connaissances, si on peut expliquer de façon générale cette existence, il nous manque encore des outils opérationnels permettant de guider précisément la recherche de telles substances. C'est ce qui explique que dans la phase actuelle nous sommes le plus souvent amenés à appliquer des méthodes d'échantillonnage systématique et à faire des tris successifs (les « screenings »).

Des voies, non spécifiquement biologiques, peuvent être suivies comme celles des études des savoirs traditionnels, mais elles ont aussi leur limites. Efficaces pour les produits et substances à intérêt agroalimentaire et les matériaux, elles ont montré leurs limites dans le domaine thérapeutique. En tout état de cause, nous ne pouvons plus faire l'économie d'une réelle biologie déductive encore largement à développer.

4.10. Les limites et les conséquences de l'intervention de l'homme sur les systèmes vivants

Les interventions de l'homme se font dans un univers de possibles, celui qui est autorisé par les « lois⁹ de la nature », connues ou non. Elles peuvent adapter ou modifier les processus. Mais ce à quoi nous avons à faire résulte de près de 4 milliards d'années d'évolution, il y a donc lieu d'être attentif et précautionneux. Ainsi, dans les aspects pratiques, nous ne faisons qu'utiliser et adapter des processus spontanés et de les associer de façons différentes. L'une des conséquences majeures est l'accélération des transformations et des modifications. C'est par exemple le cas de l'emploi des techniques d'hybridation et de sélection ou de transfert horizontal qui accélèrent des phénomènes évolutifs. Au cours de cette longue évolution, des multitudes d'expériences spontanées se sont réalisées, les systèmes vivants se sont frottés entre eux et ont produit des entités et des composés utiles que nous ne connaissons encore que très peu. Il ne faut pas attendre de miracle, telle la molécule qui guérirait tout et tous, mais une multitude de produits utiles et valorisables. C'est là la « plus-value » de la biodiversité, productrice de richesses pour l'homme.

On remarquera enfin que les processus stochastiques ont été peu « domestiqués », l'aléatoire étant plutôt vu comme une gêne que comme un fait utilisable et encore moins comme créateur potentiel d'une richesse ; et pourtant, nous avons vu son rôle essentiel dans ce que nous considérons maintenant comme telle : la biodiversité. La **nécessité du hasard** ne s'impose pas à l'évidence et... encore moins son **utilité**.

Et pourtant le hasard est nécessaire et utile.

⁹ Le terme de « loi » (de la nature), qui me gênait, me semble maintenant bien adapté par l'idée de limites des possibilités d'action qu'elle sous-entend.

Références

- André J.-C., Mégie G., Schmidt-Lainé C. Échelles et changements d'échelles, problématiques et outils. In (Caseau P. (Ed) : « Études sur l'environnement : du territoire au continent ». RST, Académie des sciences, Tech&Doc, Paris 2003, 167-199.
- Barbault R., Pavé A. Écologie des territoires et territoires de l'écologie. Caseau P. (Ed). Études sur l'environnement : du territoire au continent. RST, Académie des sciences, Tech&Doc, Paris 2003, 1-49.
- Barbault R., Guégan J.-F., Hoshi M., Mounolou J.-C., van Baalen M., Wake M., Younès T. Integrative Biology, Complexity in Natural Systems. Keys to Addressing Emerging Challenges, IUBS, 2003.
- Belovsky G.E., Mellison C., Larson C. and Van Zandt P. A., Experimental Studies of Extinction Dynamics, *Science*, 286 (1999), 1175-1177.
- Bonhomme F. (2003) Combien de temps fait-il pour faire une espèce ? In « Qu'est-ce que la diversité de la vie » (Ed. Michaud Y.), Odile Jacob, Paris.
- Borgès J. L. (1983) Fictions. Folio, Ed. 2004, Paris, 187p.
- Caseau P. (Ed, 2003). Études sur l'environnement- De l'échelle du territoire à celle du continent. Rapport sur la science et la technologie, Académie des Sciences, Tech&Doc, Lavoisier, Paris (Summary in English).
- Carroll S.B. (2001) Chance and necessity: the evolution of morphological complexity and diversity. *Nature*, 409, 1102-1109.
- Chave J. (2004) Neutral theory and community ecology. *Ecology letters*, 7, 241-253.
- Clark J.S., MacLachlan J.S. (2003) Stability of forest biodiversity. *Nature*, 423, 636-638.
- Courtillot V., Gaudemer Y. Effects of mass extinctions on biodiversity. *Nature*, 381, 1996, 146-148
- Hubbell S.P. (2001) The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography. Princeton Univ. Press.
- Jacob F. (1970) La logique du vivant. Une histoire de l'hérédité. Gallimard, Paris. 354p.
- Jacob F. (1981) Le jeu des possibles. Essai sur la diversité du vivant. Fayard, Paris, 135p.
- Jacob F. (2000) La souris, la Mouche et l'Homme. Odile Jacob, Paris, 221p.
- Kimura M., Takahata M. (1991) New Aspects of the Genetics of Molecular Evolution, Springer-Verlag, New York.
- Kirchner J.W., Weil A. (2000) Delayed biological recovery from extinctions throughout the fossil record. *Nature*, 404, 177-190.
- Kupiec J.J., Sonigo P. (2000) Ni Dieu, ni gène. Seuil, Paris, 231p.
- Lévêque C., Mounolou J.C. Biodiversité. Dynamique biologique et conservation. Dunod, Paris, 248p.
- May R. M. (1976) Simple mathematical model with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459-467.
- Michaud Y. Ed. (2003) *Qu'est-ce que la diversité de la vie*. Université de tous les savoirs. Odile Jacob, Paris, 408p.
- Michod R.E. (2000) *Darwinian Dynamics*. Princeton paperbacks, Princeton.
- Monod J. - *Recherches sur la croissance de cultures bactériennes*. Thèse de Docteur ès Sciences, Hermann. Paris, (1942).
- Monod J. (1970) Le Hasard et la Nécessité. Seuil, Paris, 244p.
- Nicolis G. and Prigogine I. (1977) *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*, J. Wiley & Sons, New York.
- Pavé A. (1994) Modélisation en biologie et en écologie. Aléas, Lyon.
- Pavé A. et Schmidt-Lainé Cl. (2003) Integrative biology: modelling and simulation of the complexity of natural systems, *Biology International*, 44, 2003, 13-24
- Pavé A., Hervé J.C. et Schmidt-Lainé Cl. (2002) Mass extinctions, biodiversity explosions and ecological niches. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences-Biologies*, 325 : 7, 755-765.
- Pour La Science (2003) La complexité. La science du XXIe siècle. *Pour La Science*, 314, 28-156.
- Pumain D. (Ed) et al. Hierarchy in natural and social sciences. Methodos series, Kluwer (prévu pour 2004).
- Purves W.K., Orians, G.H., Heller H.G. (1994) Le Monde du Vivant. Traité de Biologie. Flammarion, Paris . Traduction par London J. de « Life :The Science of Biology », Sinauer Ass., Sunderland, Mass, 1992.

- Schmidt-Lainé Cl, Pavé A. Bringing complexity back to life. *Biologist* (à paraître 2004).
- Vandemeer J.H. (1972) Niche Theory. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 3, 107-132
- Vicsek T (2002) The bigger picture. *Nature*, 418, 131.
- Whithfield J. Neutrality versus the niche. *Nature*, 417, 2002, 4810-481.
- Wilson O.E. (Ed). 1988. Biodiversity. National Academic Press, Washington D.C., 521p.
- Encyclopædia Universalis, 2003 (version informatique, 9.0.1) : Abbadie C. , Bregliano J.C., Dugué D.