

Récit de l'histoire de la vie ou De l'utilisation du récit

Guillaume LECOINTRE¹

Toute histoire racontée se fonde sur la sélection rétrospective d'événements, de paysages ou d'objets reconstitués à partir de faisceaux de présomption, indices, témoignages, signes, voire de preuves actuelles. Concernant la biologie, l'anthropologie et la paléontologie, cette histoire a pour trame de fond l'évolution de la vie. L'exercice consistant à raconter l'histoire de la vie par une sélection d'événements est tentant, fréquent, mais à haut risque : comment faire une sélection objective ? Comment assigner *objectivement* et forcément *a posteriori* une importance à tel « fait » évolutif ? Si cette objectivité pouvait exister, elle aurait certainement trait à la façon dont les « faits » évolutifs sont mis en ordre pour aboutir au mieux à un ordonnancement temporel. Mais comment cette mise en ordre se fait-elle ? Enfin, comment des auteurs ont-ils pu prétendre trouver des lois dans l'ordre par lequel se succèdent ces événements historiques ?

L'histoire a quelque chose de particulier. Elle consiste à mettre bout à bout des événements dont on suppose – au mieux – qu'ils entretiennent entre eux une relation de cause à effet (type de relations qui, parmi les entités actuelles, sont mises en évidence par une approche expérimentale). Mais cette relation n'est jamais démontrée expérimentalement. Cette relation n'est que supposée suite à une autre mise en preuve que celle des sciences expérimentales, celle des sciences historiques (ou palétiologiques). En effet, on distingue classiquement en sciences de l'évolution les sciences des processus, qui mettent en évidence par voie expérimentale des relations de cause à effet (physiologie, embryologie causale, génétique moléculaire, etc.), des sciences des structures qui ont pour rôle d'agencer des entités (ce qui est) de manière cohérente (anatomie comparée, embryologie descriptive, systématique, etc.). En sciences de

1. Systématicien, professeur au Muséum national d'histoire naturelle (UMR 7138 CNRS-UPMC-ENS-IRD-MNHN, « Systématique, adaptation, évolution ») et directeur du département « Systématique et évolution » du MNHN.

l'évolution, cet agencement consiste à fournir une explication historique de la répartition des attributs dans le vivant. La répartition des organes à travers le vivant est organisée de la manière la plus cohérente possible, et cet agencement cohérent est conçu comme le fruit d'une généalogie passée. Arrêtons nous un instant sur ces deux types d'administration de la preuve en sciences de l'évolution, car ce point pourra avoir de l'importance par la suite.

1 – Les raisonnements à l'œuvre au sein de la théorie : notion de preuve et de loi

L'une des objections spontanées à la théorie de l'évolution consiste à dire, d'une part, que l'évolution biologique n'est pas testable par voie expérimentale, et que par conséquent elle n'est pas une proposition scientifique; et d'autre part qu'on ne peut finalement rien savoir de l'évolution passée parce qu'on n'a pas de machine à remonter le temps pour «aller y voir». La première objection est tout simplement erronée. On expérimente l'évolution biologique sur des organismes à temps de génération courts comme des mouches drosophiles, des champignons ou des bactéries². L'industrie agronomique ne cesse de courir après l'évolution des parasites, ravageurs et autres destructeurs de plantes cultivées. L'industrie pharmaceutique doit régulièrement réinventer des antibiotiques pour faire face à la sélection induite par les précédents sur les populations bactériennes pathogènes pour l'homme. D'autre part, on n'a pas besoin de machines à remonter le temps pour que l'évolution soit crédible. L'objection provient en fait de l'hégémonie du modèle de science nomologique (disposant de lois) qu'est la physique. En fait, on ne peut pas comprendre les sciences de l'évolution si l'on a pas conscience qu'elles renferment différents régimes de preuve³. Pour faire court, nous les nommerons ici «preuve historique» et «preuve expérimentale».

1.1 – La preuve historique

La preuve historique consiste à observer des faits actuels, à les mettre en cohérence, puis à déduire les conditions et événements du passé à l'origine de ces faits. Dans cet exercice de déduction à rebours du temps, ou rétrodiction, c'est la cohérence maximale des faits qui organise la mise en ordre de ces conditions et événements du passé comme autant d'hypothèses connectées les unes aux autres. Ces hypothèses connectées, articulées entre elles, fonctionnent comme une microthéorie, constituée d'hypothèses et de faits ainsi mis en lumière. En d'autres termes, c'est la maximisation de la cohérence des faits entre eux qui garantit la pertinence et le pouvoir explicatif de la théorie. Ceci est valable par exemple en histoire, où la microthéorie est le scénario histo-

2. Cf. notamment Barberousse & Samadi, ce volume. (NdÉ.)

3. Cf. Barberousse & Samadi et Huneman, section 3, ce volume. (NdÉ.)

rique, en phylogénétique où un arbre phylogénétique fonctionne également comme une microthéorie. En phylogénétique, la cohérence d'une microthéorie est mesurée à l'aide de formules mathématiques simples. Parmi plusieurs théories possibles (c'est-à-dire plusieurs arbres possibles), on choisit celle dont la valeur de cohérence est maximale. Les observations de départ étant reproductibles, des observateurs indépendants peuvent vérifier la cohérence de la microthéorie, y compris en ajoutant éventuellement des faits ou données supplémentaires. La preuve historique est donc reproductible par autrui, par conséquent elle produit de la connaissance objective.

Illustrons concrètement la définition d'une preuve historique en expliquant davantage comment procèdent les chercheurs en sciences de l'évolution lorsqu'ils construisent des arbres phylogénétiques. Les degrés d'apparentement relatifs que traduisent ces arbres ne sont établis ni à l'aide de machines à remonter le temps, ni sur la base de registres d'état civil. Ils sont le résultat d'un exercice de reconstruction à partir d'observations à expliquer. Ces observations (autrement dit, les faits actuels) sont la répartition des attributs des êtres vivants. Si nous avons cinquante espèces animales devant les yeux, nous sommes immédiatement capables d'observer leurs attributs. Certaines ont quatre pattes. Parmi celles-ci, certaines ont des poils. Parmi celles-ci, certaines ont le pouce opposable au reste des doigts. Ces attributs (pattes, poils, pouce opposable) ne sont pas distribués n'importe comment, mais selon une hiérarchie perceptible : tous ceux qui ont un pouce opposable ont déjà des poils, tous ceux qui ont des poils ont déjà quatre pattes. La répartition des attributs n'est pas complètement chaotique : on ne trouve pas de poils en dehors de ceux qui ont quatre pattes, ni de pouce opposable en dehors de ceux qui ont des poils. Il y a des attributs à expliquer, leur mise en cohérence maximale se traduit par la construction de groupes, qui peuvent prendre la forme d'ensembles emboîtés ou bien d'un arbre. Ici, la cohérence maximale consiste à mettre dans un seul et même ensemble tous ceux qui ont des poils, au lieu de ranger certains avec des organismes qui n'en n'ont pas, puis ranger les autres séparément des premiers. En d'autres termes, il ne serait pas cohérent de mettre des organismes à poils dans deux groupes distincts, chacun contenant aussi des organismes sans poils. On dit que la phylogénie – et donc la classification – maximise le partage des attributs identiques. Pour réaliser cette opération, on réalise graphiquement soit des ensembles emboîtés, soit un dessin d'arbre dichotomique. Cette figure rend donc compte de la manière la plus cohérente possible de « qui partage quoi avec qui ». De manière sous-jacente à notre action, c'est le processus de phylogenèse qui, en arrière-plan théorique, transforme le « qui partage quoi avec qui » en « qui est plus apparenté à qui », et donc explique cet emboîtement des attributs en un « ordre naturel ». Autrement dit, l'arbre phylogénétique traduit non seulement les degrés relatifs d'apparentement des espèces par l'emboîtement de leurs attributs

partagés, mais il raconte également le déroulement historique de l'apparition de ces derniers, c'est-à-dire l'ordre relatif de leur acquisition (dans un langage plus spécialisé, l'ordre dans lequel les synapomorphies se succèdent dans l'arbre⁴). On a donc reconstitué une histoire argumentée, vérifiable et modifiable par autrui (on a construit une microthéorie). Cette histoire comprend une mise en ordre relatif des événements donnant naissance aux attributs : l'apparition des quatre membres a précédé celle des poils, laquelle a précédé celle du pouce opposable au cours de l'évolution. Mais la preuve historique fonctionne aussi par consilience additive⁵ : une espèce nouvellement insérée dans l'arbre, dont la collection d'attributs qu'elle porte se conforme à l'arrangement déjà élaboré sans le remettre en cause ni requérir d'hypothèses supplémentaires, augmentera la fiabilité de l'arbre. Toute nouvelle espèce de cette sorte augmentera la cohérence globale de l'arbre, lequel rendra compte du partage d'attributs d'un plus grand nombre encore d'espèces. C'est bien le rôle qu'on attend d'une théorie : qu'elle rende compte d'un grand nombre de faits sans avoir à ajouter d'hypothèses non documentées.

1.2 – La preuve expérimentale (ou preuve « hypothético-déductive »)

La preuve expérimentale (ou « hypothético-déductive ») consiste à agir sur le monde réel dans le but d'infirmer ou de confirmer des hypothèses (selon Karl Popper, seule l'infirmité ou réfutation d'une hypothèse ou conjecture serait opérationnelle et concluante, mais cela est discuté). En ce qui concerne les sciences de l'évolution, il s'agit le plus souvent de mimer des forces évolutives telles qu'on se les représente et d'en observer au laboratoire ou dans le milieu naturel les résultats sur les populations.

Par exemple, pour étudier la possibilité de synthèse abiotique de molécules biologiques simples tels les acides aminés sur la Terre primitive, Stanley Miller et Harold Urey ont soumis des composés simples (méthane, hydrogène, ammoniaque, eau) à certaines conditions physiques dont on pensait étaient justement celles de la Terre primitive⁶. Ils sont parvenus de la sorte à fabriquer *in vitro* de nombreux acides aminés et les bases puriques des acides nucléiques. Ils en ont conclu que la synthèse abiotique de certaines briques de base des êtres vivants était possible dans les conditions physico-chimiques correspondant à celles de leur expérience. Autre exemple : lorsqu'ils travaillaient avec des espèces à temps de génération très court, les biologistes ont pu « voir » l'évolution dans leur laboratoire. Ainsi, on se souvient que dès les années 1930,

4. Cf. Barriol, Lecointre (« Filiation ») et Tassy, ce volume. (NdÉ.)

5. La consilience additive est le gain de fiabilité apporté à un scénario ou une théorie tiré de la conjonction de faits indépendants non seulement compatibles entre eux, mais se renforçant mutuellement.

6. Cf. Tirard, ce volume. (NdÉ.)

Philippe L'Héritier et Georges Teissier (par exemple, Teissier & L'Héritier 1933, 1934) ont vérifié l'évolution biologique expérimentalement en maintenant des populations de 3000 à 4000 petites mouches du vinaigre dans des cages et en les soumettant à certaines contraintes de nourriture. Ce type d'approche est aujourd'hui pratiqué couramment avec des bactéries, notamment lorsqu'on veut obtenir d'elles qu'elles synthétisent certains peptides. Le régime de preuve est alors dit « hypothético-déductif ». Les résultats de ces expériences expliquent les mécanismes de l'évolution, et donc ceux de la phylogenèse.

1.3 – Les deux types de preuve contribuent à la scientificité d'une affirmation

Il est essentiel de comprendre que toutes les sciences de l'évolution (et, plus largement, toute la biologie) fonctionnent grâce aux deux régimes de preuves distincts que nous venons de décrire. Les sciences des structures ont pour rôle d'agencer de manière cohérente ce qui est, et de nommer ce qui est. En biologie et en paléontologie, ces sciences (anatomie comparée, embryologie descriptive, paléontologie, systématique, phylogénie moléculaire, etc.) sont des sciences historiques (ou palétiologiques) : il faut rendre compte rationnellement des structures observées dans un temps qui n'est pas celui de l'organisme lui-même (sauf peut-être pour l'embryologie descriptive), mais celui de l'histoire des espèces. C'est la phylogenèse qui explique la répartition des structures à travers le vivant. Les sciences des processus ont pour rôle d'éclairer des relations de cause à effet. En biologie (génétique moléculaire, embryologie, physiologie, génétique des populations, écologie, etc.), elles correspondent à des sciences expérimentales. Elles permettent, grâce à des preuves de type expérimental, d'expliquer les mécanismes sous-jacents au phénomène de l'évolution biologique, et donc la phylogenèse, soit dans le temps de l'organisme (génétique des populations, embryologie causale, physiologie, génétique moléculaire), soit dans le temps de l'histoire des espèces (écologie, génétique des populations). Autrement dit, dans le premier cas, la phylogenèse explique, dans le second elle est à expliquer.

Si l'on se trompe de régime de preuve, on arrive vite à des aberrations. C'est pourtant ce que font certains scientifiques, en prétendant que la systématique (la science des classifications) n'est pas une science parce qu'elle ne suit pas un schéma argumentatif de type hypothético-déductif fondé sur une expérience. C'est aussi ce que feront les créationnistes, en reprochant à la paléontologie de ne pas être une science pour les mêmes raisons. C'est parfois aussi un réflexe du public, qui pense qu'on ne peut pas prendre au sérieux scientifiquement les paléontologistes ou les phylogénéticiens « parce que personne n'est allé dans le passé pour aller voir ce qui s'y passait » ou encore que l'évolution n'est pas scientifique parce qu'on ne peut pas refaire l'expérience (de l'évolution). Pour ne pas laisser prise à de tels contresens, il convient de se rappeler que la

phylogénétique et la paléontologie utilisent pour expliquer l'évolution dans son déroulement les raisonnements des historiens et que l'objection faite à l'encontre de la fiabilité de l'évolution doit être alors tout autant appliquée à la bataille d'Austerlitz ou de Waterloo. Il convient d'avoir toujours à l'esprit que la scientificité d'une affirmation tient plus à son objectivité, c'est-à-dire à la possibilité de la vérifier par la reproduction d'expériences ou d'observations, qu'au régime de preuve lui-même : expérimental ou historique.

1.4 – Les raisonnements à l'œuvre en sciences de l'évolution

Le modèle dominant de science est l'expérimentation mettant en œuvre l'hypothético-déduction et utilisant des lois. On refuse encore à certains pans de la biologie le statut de science parce qu'ils ne se conforment pas à ce type de preuve. Cela touche en premier lieu l'évolution. Pour aller un degré plus loin dans la compréhension des différents types de preuve qui fonctionnent au sein même de la théorie de l'évolution contemporaine, il faut examiner les différents types de raisonnements utilisés, examiner la notion de loi et voir en quoi cette notion concerne la biologie de l'évolution.

Selon le philosophe Charles Sanders Peirce, on distingue plusieurs raisonnements à l'œuvre lorsqu'on essaie de deviner rationnellement ce qui doit être ou ce qui a pu être. On appelle ce raisonnement une inférence. Ces raisonnements s'organisent en « Règle » « Cas » et « Résultat ». Tout simplement, lorsqu'un état du monde particulier est observé (le cas), un effet va s'ensuivre (le résultat). La Règle est une généralisation du fait que lorsque le cas se présente, alors il doit être suivi du résultat. Illustrons maintenant les trois sortes d'inférence dans les termes de Kirk Fitzhugh (2005). S'en suivront des commentaires.

[1] Déduction

Règle : Les billes dans ce sac sont rouges.

Cas : Cette bille vient de ce sac.

Résultat : Cette bille est rouge.

[2] Induction

Règle : Cette bille vient de ce sac.

Cas : Cette bille est rouge.

Résultat : Les billes dans ce sac sont rouges.

[3] Abduction

Règle : Les billes dans ce sac sont rouges.

Cas : Cette bille est rouge.

Résultat : Cette bille provient de ce sac.

Dans le raisonnement déductif [1], la conjonction de la *Règle* et du *Cas* rend le *Résultat* nécessaire : il n'y a logiquement pas d'autre solution. Puisque la *Règle* dit que quand un certain état antécédent est observé, le résultat va s'en suivre, alors les prémisses fournissent la base de la prédiction que le *Résultat* va *forcément* se manifester. Sachant, par exemple, que toutes les billes de « ce sac » sont rouges (règle), alors l'acte de retirer une bille du sac (cas) va nécessairement résulter en l'observation qu'elle est rouge (résultat). La déduction a la propriété de produire des conclusions vraies si les prémisses et la règle sont vraies. Autrement dit, dans la déduction standard, un raisonnement déductif peut être vrai en vertu du respect des règles, indépendamment du rapport au réel qu'entretiennent les prémisses. On trouve des exemples de ces raisonnements en physique, où l'application de lois formelles à des prémisses implique logiquement le résultat.

Dans le raisonnement inductif [2], nous avons à faire à une généralisation : à partir d'au moins une relation observée entre *Cas* et *Résultat*, on conclut que d'autres relations semblables valent dans d'autres cas. Le cas observé est que « cette bille est rouge », et la règle stipule que « cette bille vient de ce sac ». On peut alors s'autoriser, après avoir tiré plusieurs billes de ce sac et après avoir constaté qu'elles étaient rouges, une généralisation : les billes de ce sac sont rouges. L'induction offre simplement la suggestion selon laquelle des régularités sont à attendre sur la base de l'expérience passée. De toute évidence, aucune inférence inductive ne peut garantir la vérité d'une conclusion. En effet, on a bien l'intuition que l'on n'a pas la « preuve absolue » que toutes les billes de ce sac sont rouges, et le raisonnement n'empêche pas de penser que je puisse demain en tirer une jaune. La conclusion est seulement rendue *probable* par le contenu des prémisses. Dans le raisonnement déductif, si les prémisses sont vraies, la conclusion *doit être vraie*. Dans le raisonnement inductif, si les prémisses sont vraies, la conclusion est *n'est pas nécessairement vraie*. L'induction est pratiquée dans toutes les sciences, mais pas de manière exclusive.

Le raisonnement abductif [3] diffère de la déduction en ce que c'est la conjonction de la *Règle* avec le *Résultat* qui conduit à conclure le *Cas*. Sachant que toutes les billes dans « ce sac » sont rouges, et ayant une bille rouge, il semble raisonnable d'inférer que « cette bille vient de ce sac ». C'est sur la base de l'abduction que, lorsqu'on a affaire à un (des) effet(s), par exemple « cette bille rouge », on infère ce qui pourrait être les possibles conditions causales ou initiales qui rendraient compte de ce qui a été observé. C'est sur la base de l'abduction que, sachant la règle dite de « filiation des êtres vivants avec modification » (« *descent with modification* » de Darwin⁷), lorsqu'on a affaire

7. Cf. Lecointre, « Filiation », ce volume.

à un (des) effet(s), par exemple «ce caractère est porté par l'espèce x et par l'espèce y qui ne se croisent pas», on infère ce qui pourrait être les possibles conditions causales ou initiales qui rendraient compte de ce qui a été observé, c'est-à-dire l'existence d'un ancêtre commun qui a légué ce caractère à x et à y. Les historiens, les commissaires de police, les phylogénéticiens partent d'états du monde constatés et, par une mise en cohérence de faits ou d'indices, infèrent les événements qui leur ont vraisemblablement donné naissance. Clairement, tout comme l'inférence inductive, une inférence abductive ne peut pas conduire à une conclusion qui soit garantie d'être vraie. L'inférence rend simplement compte de ce qui est plausible (eu égard à un état du monde donné comme connu, à des connaissances d'arrière-plan) : si les prémisses sont vraies, alors l'explication de ce qui est observé est probablement vraie. Comme les inférences inductives, les inférences abductives peuvent seulement fournir des conclusions probabilistes plutôt que certaines. La bille rouge sur la table pourrait ne pas provenir de «ce sac», puisque des billes rouges peuvent aussi être obtenues à partir d'autres emplacements.

Certaines sciences semblent utiliser certains modes de raisonnement plus que d'autres. Autant l'induction est universellement répandue, autant la déduction, démarche proprement analytique, semble être davantage utilisée dans les sciences dites «dures» (par exemple, cristallographie, chimie, physique), et particulièrement aisée lorsque ces sciences traitent d'universaux, c'est-à-dire des objets d'étude abstraits, constants, illimités dans l'espace et dans le temps, tels des fonctions, des concepts, des ensembles, des classes, des propositions. Leur définition, toujours précise, relève de propriétés requises que leurs membres doivent posséder, et qui leur donne un pouvoir prédictif. Ces membres sont tous identiques. Ces sciences sont dites nomologiques parce qu'elles disposent de lois. Elles ont servi de modèle, tant et si bien que bien des sciences ont voulu s'inventer des lois, elles aussi, pour les mimer (économie, biologie moléculaire et, dans une certaine mesure, les sciences de l'évolution également).

Cependant, la déduction utilisant des lois formalisées et logiquement contraignantes est rendue plus difficile lorsque l'on étudie des particuliers, c'est-à-dire des objets concrets du monde réel qui n'ont existé qu'une seule fois et qui ont une histoire : des individus, des espèces⁸, par exemple. Leur définition est plus difficile à saisir (comme l'origine et la mort d'un individu, ou l'origine et l'extinction d'une entité historique) et s'énonce en termes de noms propres plutôt qu'en termes de propriétés. Leurs parties ne sont pas rigoureusement identiques d'un objet à l'autre, en raison du fait qu'ils sont changeants, produits de l'histoire. De tels objets d'étude ne sont abordés que par des démarches syn-

8. Sur l'épistémologie de la notion d'espèce, cf. Samadi & Barberousse, ce volume. (NdÉ.)

thétiques, telles l'induction ou l'abduction, où les conclusions ne seront à jamais que probables. L'historicité des objets d'étude des biologistes comme les espèces, ou celle des sociologues, ou encore celle des historiens, est telle *qu'il est impossible de forger des lois absolument contraignantes*, mais seulement des régularités (qui peuvent toujours subir des exceptions), appelées aussi «règles» (dans un sens différent de celui utilisé plus haut). C'est peut-être l'une des raisons pour laquelle les économistes disent échouer dans leur quête incessante de prédictions certaines à partir de lois mathématiquement formalisées. Ces lois échouent parce qu'elles ne semblent fonctionner qu'au prix d'une réduction extrême de leur objet, finalement inadaptées à la complexité et à l'historicité de ce qu'elles tentent de décrire. De même, c'est peut-être également en se laissant griser par le mirage des «lois» que la génétique moléculaire et la biologie cellulaire ont forcé leurs objets – pourtant biologiques, et donc forcément chargés d'histoire – à devenir des universaux, occultant ainsi la variation cachée sous un même nom de gène, de protéine ou de type cellulaire. Jean-Jacques Kupiec (2008, 2009) a décrit comment, en faisant des gènes, des protéines et même des cellules des entités idéales, des universaux immuables (tout comme on le faisait avec les espèces au temps de Linné), la génétique moléculaire et une partie de la biologie cellulaire et de la physiologie ont raté des pans entiers de possibilités expérimentales qu'il conviendrait aujourd'hui de rattraper. Retenons que rigoureusement parlant, l'inférence phylogénétique ne procède donc pas par déduction, comme en physique ou en chimie, mais par abduction. L'ordre des événements restitué par un arbre phylogénétique n'est que probable. Il ne saurait y avoir de loi contraignante ni dans la construction d'un arbre, ni dans l'interprétation des événements qu'il porte sur ses branches. Souvenons-nous que si davantage de données sont ajoutées à la matrice, l'arbre peut changer, et donc les événements qu'il permet d'inférer changeront avec.

1.5 – Notion de loi

Une loi est un énoncé universel de portée illimitée dans l'espace et dans le temps, qui affirme une connexion régulière et sans exception entre des paramètres, et les relie formellement entre eux. Une telle loi, par exemple la loi des gaz parfaits $PV = nRT$ (P: pression, V: volume, n: nombre de moles de gaz, R: constante des gaz parfaits, T: température), est telle que si les prémisses sont vraies alors la conclusion est forcément vraie: le résultat n'est pas négociable.

La question de savoir si la biologie dispose de lois comme en disposent la physique ou la chimie est très discutée (cf. par exemple Gayon 2003, Proust 2006). En biologie, Ernst Mayr (1961) distinguait les «causes prochaines», expérimentables du vivant de l'organisme, par exemple les causes physiologiques d'un comportement, des causes «ultimes» qui demandent une explication historique renvoyant à un temps antérieur à la vie de l'organisme (par

exemple, les causes écologiques ou les causes biologiques qui relèvent de l'héritage d'ancêtres, comme les causes génétiques). Les causes proches rapprochent la biologie de la chimie ou de la physique (qui sont des sciences nomothétiques, c'est-à-dire disposant de lois hypothético-déductives) ; tandis que les causes ultimes font de la biologie une science historique (sciences synthétiques, où l'induction et l'abduction sont majeures mais où les lois nécessaires à l'hypothético-déduction sont manquantes).

Il est courant de considérer que la biologie qui travaille sur les processus du fonctionnement actuel des organismes dispose de lois ; mais pas la biologie des causes ultimes car les individus sont membres d'une espèce qui est le fruit des contingences de l'histoire (cf. Mayet 2006). De par leurs préoccupations hybrides, les généralisations biologiques ne sont pas véritablement des lois, mais des énoncés dont la généralité est limitée à la portion particulière de l'espace et du temps dans lequel s'est déployée l'histoire évolutive des espèces vivantes. Selon Jean Gayon (2003), « les propriétés biologiques, en tant que propriétés appartenant spécifiquement à des êtres biologiques, ne sont compréhensibles de manière ultime que comme des propriétés historiquement contingentes. Elles résulteraient d'une histoire causale unique, dont nous n'avons aucune raison légitime de penser qu'elle aboutirait au même résultat si elle était jouée une nouvelle fois ». Une espèce est singulière, elle n'a eu lieu qu'une seule fois et il n'y aurait donc aucune loi de portée universelle et illimitée qui puisse en rendre compte rationnellement. On serait amené alors à penser qu'il ne peut y avoir de loi en sciences de l'évolution ; tout au plus y a-t-il des règles, lesquelles peuvent subir des exceptions.

Cependant, Gayon (2003) modère cette tendance en considérant que le principe de sélection naturelle fonctionne au sein de la théorie de l'évolution comme une *loi s'appliquant aux individus et aux espèces* : « Elle s'applique [la sélection naturelle], dans son principe, à toute population d'entités qui remplissent simultanément trois conditions : variation, reproduction, hérédité. [...] Elle ne fait référence directe ni aux gènes ni aux organismes, et s'applique virtuellement à de nombreux niveaux d'organisation dans les systèmes biologiques. Elle ne fait référence à aucune entité particulière ayant existé dans l'histoire de la vie sur notre planète. Il en résulte que le principe de sélection naturelle est sans doute l'unique généralisation biologique dont on puisse légitimement penser qu'elle s'appliquerait à toute population de systèmes autoreproducteurs susceptibles d'exister dans l'univers. À ce niveau, et à lui seul, la biologie de l'évolution a le caractère d'une science nomothétique, c'est-à-dire d'une science capable d'expliquer par des énoncés universels de portée illimitée – des lois »⁹.

9. Cf. Huneman, ce volume. (NdÉ.)

1.6 – Récapitulatif

La théorie de l'évolution se nourrit de deux types de sciences. Une bonne perception des preuves de l'évolution commence par bien distinguer ce qui relève respectivement de l'une et de l'autre ; et de ne pas forcer les sciences «historiques» (ou sciences «paléontologiques») à suivre le modèle de la physique (science «nomologique» par excellence). Si les processus de l'évolution sont reproductibles et permettent de faire des prédictions, c'est qu'ils suivent un certain nombre de lois (voir ci-dessus) et peuvent être analysés dans un cadre expérimental. Il n'en reste pas moins que les produits de ce processus dans la nature sont hautement contingents puisqu'ils ont dépendu, dépendent et dépendront d'aléas historiques des milieux. Ces produits ne sont pas analysables par les sciences nomologiques. C'est la raison pour laquelle il n'est pas possible de faire des prédictions sérieuses sur ce que seront les espèces demain. Lorsque l'on dit que la phylogénie est prédictive, c'est qu'elle permet de prédire la présence d'états de caractères que l'on n'a pas encore observés *sur des espèces actuelles* ou de rétrodire les caractères que *devaient avoir porté des ancêtres hypothétiques*. *En aucun cas il ne s'agit de prédire un futur évolutif*. C'est bien parce que la phylogénie utilisée rend compte de la cohérence maximale des caractères entre eux (cohérentisme) que la prédiction sur les états passés ou présents de la nature sont efficaces.

Un tableau (page suivante) aidera à synthétiser les deux types de sciences à l'œuvre dans la théorie de l'évolution, Ces deux sciences sous-tendent en partie la distinction forte entre les sciences du «*pattern*» (les «patrons») qui étudient la répartition et l'agencement des entités, et les sciences du «*process*» qui mettent en évidence les relations de cause à effet. Cette distinction n'est qu'opérationnelle : dans l'une et l'autre science la mise en preuve n'est pas la même. Certes, pour interpréter complètement les agencements des entités dans la nature, on a besoin d'un fonds théorique nourri des résultats des sciences des processus. Certes, les sciences des processus, pour mener leurs investigations, ont besoin de savoir sur quoi elles travaillent. La distinction entre «*pattern*» et «*process*» n'est pas une distinction à maintenir ni dans l'ontologie, ni dans la synthèse des savoirs objectifs. Il n'en reste pas moins que cette distinction décrit une opérationnalité de la recherche : le type de questions que les scientifiques posent dans leurs articles, la façon dont ils y répondent, les démonstrations à l'œuvre (cf. Lecointre, «Filiation», ce volume). Ce tableau devrait aussi aider à déjouer plusieurs déviations :

- Déjouer les objections selon lesquelles la construction d'une phylogénie n'est pas scientifique parce qu'elle ne disposerait pas ni de lois ni de raisonnements pleinement déductifs.

- Déjouer une autre objection selon laquelle l'évolution ne serait pas de la science parce qu'«on ne peut pas remonter le temps», parce qu'«on ne

	Sciences nomologiques	Sciences palétiologiques
1. Régime de preuve	Expérimental	Historique
2. Preuve	Par démonstration	Par accumulation puis monstration
3. Raisonnement	Inductif et hypothético-déductif	Inductif et abductif, consilience additive
4. Objets	Universaux et particuliers	Particuliers, individus : ce qui n'existe qu'une fois
5. Ce qu'on explique	Des relations de cause à effet Le plus souvent les processus de l'évolution (« <i>process</i> »)	La répartition et l'agencement des structures (« <i>pattern</i> »)
6. Lois	Oui	Non, ou alors seulement des règles
7. Temps	Synchronie (là, maintenant)	Diachronie (le présent et le passé)
8. Philosophie	Réfutationnisme ou vérificationnisme	Cohérentisme
9. Rôle de la phylogenèse	Est expliquée	Explique la répartition des attributs
10. Exemple type	Mesure de fréquences d'allèles dans une cage à drosophiles	Construction d'une phylogénie incluant éventuellement des fossiles

peut pas refaire son expérience». Cette dernière objection est particulièrement éclairante sur la confusion qui est à l'œuvre entre les deux colonnes du tableau ci-dessus : *non*, on ne peut pas refaire une expérience au laboratoire « grandeur nature » de ce qui s'est passé en tant que processus historique sur des millions d'années (les historiens ne le peuvent pas non plus, même sur quelques décennies), en d'autres termes on ne refait pas les produits de l'histoire et c'est pour cela que les sciences qui s'occupent d'eux ont des raisonnements spécifiques (colonne de droite). Par contre, on peut reproduire expérimentalement les mécanismes de l'évolution (colonne de gauche) à l'œuvre aujourd'hui comme hier.

- Déjouer les manipulations mathématiques qui consistent à appeler « loi de l'évolution » les formules log-périodiques appliquées à la succession temporelle d'événements hétérogènes arbitrairement prélevés sur des arbres phylogénétiques (cf. Lecointre 2001 : 56-61).

En effet, Jean Chaline et ces collègues ont utilisé des successions temporelles d'événements de l'histoire du vivant arbitrairement choisis sur des arbres phylogénétiques afin de faire correspondre sur les dates de ces événements une loi log-périodique qui décrirait quelque chose du processus historique, puisque cette loi est réputée rendre compte également de la succession temporelle

d'événements aussi hétérogènes que ceux du développement embryonnaire humain ou des innovations dans le jazz¹⁰. Mais ce n'est pas tout : leur « loi » une fois extrapolée au-delà du présent permettrait de prévoir la date d'événements non encore identifiés dans le déroulement de l'histoire du vivant ! Outre que les événements de base choisis pour une seule de ces opérations sont très hétérogènes entre eux, et que la justification de leur choix est notoirement insuffisante (qu'il s'agisse de l'histoire du vivant, de l'embryologie humaine ou du jazz), la démarche repose sur au moins quatre méprises épistémologiques :

(i) À tout moment il se passe quelque chose. On pourra toujours « dénicher » un événement à n'importe quelle date choisie de l'histoire. Une gamme non négligeable de formules mathématiques doit pouvoir dès lors rendre compte de successions de dates d'événements pourvu qu'ils soient choisis de manière convenable.

(ii) Une sélection d'événements passés est donc toujours un produit de communication, une mise en perspective anthropocentrée d'une histoire, pas un phénomène naturel en soi (comme il l'est prétendu, lorsque la « loi » entend « prévoir » la date du prochain « grand événement » de l'évolution humaine : dans 800 000 ans !).

(iii) L'arbre phylogénétique est abductif et rétrodictif, et en cela sa structure même ne saurait en faire un outil de prédiction de l'avenir. Par maximisation de cohérence des caractères du présent (et dans une certaine mesure du passé si des fossiles sont incorporés), il ne peut prédire que des états passés de la nature ou bien des états présents non encore observés. En effet, lui donner une puissance prédictive sur des événements à venir supposerait que sa structure passée contraindrait une certaine structure dans le déroulement futur d'événements historiques... S'agissant de l'évolution du vivant, une telle action ferait fi d'une contingence qui conditionne le devenir de toutes les populations et de toutes les espèces de cette planète, et qui s'impose même à nous chaque jour, sur des tranches de temps beaucoup plus modestes. La mise en cohérence des caractères que produit l'arbre n'annule ni ne contraindrait aucunement le caractère contingent des événements historiques passés qui ont donné naissance à ces caractères. Pourtant, cette « loi » appliquée à un arbre et utilisée en extrapolation ruinerait le caractère contingent d'événements futurs en datant précisément leur survenance. En somme, la maximisation de la cohérence dans la distribution à travers le vivant d'attributs (des états présents de la nature), ce

10. Cf. notamment Chaline *et al.* (1999), Notalle *et al.* (2000). Et dans le même ordre d'idée, Cash *et al.* (2002), dont le résumé indique : « Nous proposons d'appliquer la loi log-périodique utilisée pour décrire divers phénomènes de crises, biologiques (sauts évolutifs), inorganiques (tremblements de terre), sociétés et économiques (krachs boursiers) aux diverses étapes de l'ontogenèse humaine. On trouve un accord statistiquement significatif entre ce modèle et les dates observées. » Cf. également Brissaud (2007) sur le jazz.

que fait l'arbre phylogénétique, ne permet en rien de prévoir des états à venir : elle ne les contraint pas. Cette « loi » est un mirage mathématique.

(iv) Il y a une méprise, voire une fascination malade, un complexe épistémologique à vouloir trouver des lois partout, et surtout appeler « loi » une formule mathématique importée sans justification autre que la correspondance des points temporels que cette loi prévoit avec des événements choisis... parfois à dessein ! Car il faut le dire, aucun terme de la formule mathématique importée comme « loi » n'est justifié au regard de l'objet auquel il s'applique. Le comble est d'appliquer une loi absolument contraignante à un objet qui ne fait que décrire les caractères apparus de manière contingente le long d'une phylogénie dont la charge historique est inscrite dans les objets qu'elle classe : des particuliers (individus, espèces)... Pourquoi vouloir faire de la phylogénétique une science nomologique ?

2 – Quand la rétrospective historique vient au secours des valeurs : les sélections abusives

L'avancée des sciences a toujours consisté en partie à chasser de notre appréhension rationnelle du monde réel notre anthropocentrisme. Mais celui-ci reste bien vivace. Le problème est d'en être conscients de manière à ce qu'il ne nous piège pas.

2.1 – Des sélections abusives d'événements

Dans notre vécu, lorsqu'un événement se produit, quel qu'il soit, nous sommes souvent capables de lui assigner une importance. Cela signifie que nous mesurons ses conséquences pour notre avenir proche, un avenir que nous pensons être capables de maîtriser en partie (puisque nos actes sont, en principe, intentionnés et contrôlés dans un environnement que nous croyons avoir analysé, bien qu'il soit pourtant déjà complexe). Il s'agit là d'une importance prospective, d'une intuition dont la justesse pourra souvent être rapidement vérifiée.

Dans la nature, lorsqu'un événement se produit, quel qu'il soit, nous sommes difficilement capables de lui assigner une importance objective parce qu'une infinité de paramètres que nous ne maîtrisons pas entre en jeu et, plus simplement, parce que nous ne comprenons pas tout de la nature. En biologie évolutive, il faut ajouter à cela la dimension du temps, souvent inconcevable. L'importance que nous accordons à un événement qui s'est produit voici 150 millions d'années (par exemple, chez les théropodes, la naissance de la plume) n'a de toute évidence aucun rapport avec l'importance que nous lui aurions donné lorsqu'il s'est produit si nous avions pu être là pour l'observer.

Alors, dans ces conditions, pourquoi considère-t-on qu'un fait évolutif a été important, qu'il a marqué une étape ? Une importance rétrospective donnée à un événement est peut-être objective si différents scientifiques sélectionnent

indépendamment les uns des autres les mêmes événements. En effet, il existe une indéniable dimension collective au contexte de validation des savoirs scientifiques. Mais même dans ce cas de figure, chacune de ces sélections est forcément chargée de valeurs subjectives. En d'autres termes, la justification de la sélection ne sera jamais uniquement rationnelle. Nous ne sélectionnons que les événements qui nous concernent ou ceux qui ont eu des conséquences aujourd'hui spectaculaires à nos yeux d'hommes (la naissance de la bipédie humaine parce que nous sommes – quasiment – les seuls à marcher debout, la naissance des plantes à fleur parce que nous les cultivons). Pire, la littérature, même scientifique, sélectionne des « grands événements », tout simplement parce que l'on ne peut pas tout raconter faute de temps ou de place. Les « grands événements » sont donc des artefacts de notre anthropocentrisme.

2.2 – L'exemple de « la sortie des eaux »

Dans l'histoire de la vie sur Terre, on met souvent en avant « la sortie des eaux » comme un « grand événement ». Ainsi les programmes scolaires font un zoom sur « cette sortie des eaux » opérée par les vertébrés voici 380-360 millions d'années (Dévonien supérieur), au moment où apparaissent les premiers tétrapodes. Mais cet « événement » ne tient pas :

- Prenons l'adjectif « la ». Lorsque les vertébrés commencent à pouvoir vivre à l'air libre, il y a déjà sur la terre ferme des bactéries, des plantes érigées, des champignons, des crustacés, des arachnides, des insectes, des annélides, des nématodes, des mollusques, etc. Au Dévonien supérieur, de multiples groupes sont déjà « sortis » des eaux, sans parler des multiples sorties des eaux au sein de chacun de ces groupes (notamment chez les crustacés et les insectes). Il n'y a donc pas qu'une seule « sortie des eaux ».

- Prenons le mot « sortie ». La vie ne cesse de « sortir » et de « retourner » à l'eau. Tortues marines, ichtyosaures, sauroptérygiens, mosasaures, serpents marins, manchots, cormorans, phoques, morses, otaries, loutres, cétacés, siréniens, dytiques sont autant d'êtres vivants aux ancêtres terrestres. L'emphase sur « la sortie » est là seulement parce que nous sommes, nous humains, à l'air libre ; elle occulte ce mouvement incessant entre milieu aérien et aquatique. Si nous étions des téléostéens, nous évoquerions de manière anecdotique des « échappés » hors de l'eau pour parler des tétrapodes terrestres.

- Et si l'on y regarde de plus près, « la » sortie des eaux des vertébrés n'a même pas eu lieu il y a 380 millions d'année avec la naissance des tétrapodes. Si l'on porte son regard sur la diversité des sarcoptérygiens, on constate que le câblage neuromusculaire et le mouvement des nageoires paires d'un coelacanthé sont déjà ceux d'un animal terrestre : pour nager, le coelacanthé fait avec ses nageoires paires des mouvements de pattes d'un tétrapode. En effet, on sait aujourd'hui que les premiers tétrapodes n'étaient pas des animaux terrestres et que leurs pattes (leurs membres chiridiens) ne leur servaient pas

à marcher : *Acanthostega* était apparemment incapable de se mouvoir sur la terre ferme et son cousin *Ichthyostega* passait sans doute le plus clair de son temps dans l'eau, bien que des analyses biomécaniques récentes aient montré qu'il pouvait sans doute se traîner sur le sol comme les phoques aujourd'hui. Les tétrapodes du Dévonien vivaient en fait dans des zones chaudes fluviales ou côtières (delta) où, périodiquement, c'est l'eau qui se retirait. C'est sans doute cela qui explique l'apparition des premiers tétrapodes véritablement terrestres, au Carbonifère inférieur, il y a environ 330 millions d'années. Ils ne sont ainsi pas « sortis de l'eau » (sous quelle impulsion en seraient-ils sortis d'ailleurs ?).

L'exemple de « la sortie des eaux » est significatif : l'importance caricaturale que l'on donnait à un « événement » de l'histoire de la vie résiste rarement à une auscultation à la loupe. Il faut donc avoir conscience qu'une fresque historique remplit un besoin d'intelligibilité de notre propre histoire, mais ne suit pas réellement, dans son élaboration, une démarche scientifique, car il n'est pas possible de justifier solidement la sélection des « événements » qu'elle contient.

2.3 – Des sélections abusives de paysages

Nous avons tendance à sélectionner les paysages qui conviennent à notre physiologie humaine ainsi qu'à notre besoin de faire le récit de notre naissance. Comme nous venons de le voir, la vie est un va-et-vient incessant entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. Pourtant, l'iconographie traditionnelle met généralement l'accent sur la « sortie des eaux » des vertébrés, la nôtre donc. Par conséquent, la vie sur Terre avant le Dévonien supérieur est représentée majoritairement par des paysages sous-marins, comme s'il n'y avait rien à voir dans le milieu terrestre et aérien, et après le Dévonien supérieur, elle est représentée majoritairement par des paysages terrestres, comme si plus rien d'intéressant ne se produisait dans l'eau. Quel livre, quel documentaire s'attache à parler, à partir du Jurassique, de la diversification des téléostéens, groupe de vertébrés aquatiques qui, en nombre d'espèces, renferme la moitié des vertébrés actuellement connus ? Aucun : lorsqu'on montre l'évolution dans les océans, c'est pour parler de tétrapodes de grande taille retournés à l'eau : quelques ichtyosaures (*Ichthyosaurus*, *Ophthalmosaurus*) et sauropterygiens (*Kronosaurus*, *Liopleurodon*, *Elasmosaurus*) pour le Mésozoïque, des baleines (*Basilosaurus*) pour le Cénozoïque. Notre perception de l'évolution de la vie sur Terre est biaisée par le milieu dans lequel nous vivons. Une preuve conceptuelle réside dans un thème de recherche que les scientifiques ont utilisé comme étendard pour capter des financements : la biologie des « milieux extrêmes ». Qu'est-ce qu'un milieu « extrême » ? Le qualificatif ne se comprend qu'en considérant comme norme les milieux avec lesquels notre physiologie est compatible.

2.4 – Des sélection abusives d'objets

De même qu'il est difficile de sélectionner rationnellement un événement, il est également difficile de sélectionner rationnellement un attribut ou un objet comme « important » lorsqu'il s'agit de marquer son apparition au cours de l'histoire du vivant. La littérature paléontologique regorge ainsi de sélections d'objets abusives pseudo justifiées.

Par exemple, la valeur portée à celui de nos organes qui, en comparaison aux autres mammifères, est le plus développé – à savoir notre cortex cérébral – a complètement déformé notre vision de l'évolution des primates, jusqu'à incorporer des raisonnements téléologiques et même inventer des mots comme « l'hominisation », qui qualifient positivement ces raisonnements. L'hominisation est un concept qui porte une finalisation globale de l'évolution des primates dans son étymologie même : l'évolution des primates « tend » vers une augmentation du volume de ce cortex, laquelle culmine avec l'homme. On peut en dire autant pour les modifications anatomiques qui ont accompagné l'évolution vers la bipédie permanente, ou d'autres caractéristiques anatomiques dont nous pensons qu'elles sont le propre de l'homme¹¹.

En revanche, la taupe n'ayant pas de néocortex très développé, on n'a pas inventé le mot « taupisation » pour parler de l'acquisition progressive au cours de l'évolution des organes qui font aujourd'hui une taupe. Notamment, on n'a pas accordé d'importance particulière à ses spectaculaires membres antérieurs, pourtant tout aussi singuliers que le cortex cérébral humain lorsqu'on les compare aux autres membres antérieurs des mammifères.

On voit donc bien que l'« hominisation » est chargée de valeurs beaucoup plus que de faits rationnellement appréhendés. C'est l'évolution mammalienne mesurée à l'aune du cortex cérébral et de la station érigée qui a forgé ce mot.

Donnons un autre exemple de sélection abusive. Un objet est remarquable lorsqu'il est rare. En ce sens, l'importance accordée à un fossile tend à être supérieure à l'importance accordée à un être vivant actuel et l'importance d'un fossile connu par un exemplaire unique tend à être supérieure à celle d'un fossile plus commun. Quelle fresque historique ne comporte-t-elle pas Lucy, *Australopithecus afarensis*, exemplaire unique ? Quelle fresque parle du dicynodonte *Lystrosaurus*, pourtant retrouvé en grand nombre sur de nombreux continents ? Pourtant, l'importance accordée à un fossile devrait être liée à la combinaison des caractères qu'il porte, et pas à sa rareté, c'est-à-dire pas au hasard des découvertes et à l'inévitable caractère lacunaire du registre fossile qui en découle.

11. Cf. Picq, ce volume. (NdÉ.)

Certains paléontologues sont si peu conscients de cette part d'irrationnel dans la sélection de données historiques qu'ils ont pris leur propre choix sélectif d'événements hétérogènes apparaissant sur des phylogénies hétérogènes pour un phénomène naturel qu'il faudrait interpréter. C'est le cas, déjà évoqué, de Jean Chaline qui plaque des « lois » qui décriraient mathématiquement la succession dans le temps d'événements historiques choisis par lui comme « majeurs ». Lorsqu'un événement manque au rendez-vous de la « loi », *a posteriori*, les auteurs vont chercher l'événement *ad hoc* parmi la vaste succession d'événements disponibles, et prennent cette coïncidence pour un succès de leur « loi ». Pire, la loi ainsi construite les autorise, croient-ils, à prévoir la date du prochain « grand événement » dans l'évolution (celle de l'homme le plus souvent, événement prévu pour dans 800 000 ans)¹². Outre le fait qu'aucune loi ne peut et ne pourra jamais décrire l'évolution du vivant, du fait même que celle-ci est le fruit des contingences du passé, on notera qu'à aucun moment ces paléontologues ne se donnent la peine de justifier leurs sélections : par exemple, pourquoi l'acquisition du pouce opposable chez les primates est-elle évolutivement parlant, c'est-à-dire indépendamment de l'usage que fait l'homme de son pouce *aujourd'hui*, plus importante que la perte de la truffe au profit du nez ou la perte de la queue au profit du coccyx ?

3 – Récapitulons : le récit historique et ses biais

Tout récit est une sélection arbitraire d'instantanés au sein d'un continuum. Le récit historique fonctionne comme le résumé chronologique d'une sélection d'événements. Ces représentations sont utiles dans un contexte explicatif et pédagogique, à condition que l'on ait bien à l'esprit les biais qui leurs sont associés, et que la nécessité pédagogique du récit ne se transforme pas en phénomène naturel dont il faudrait découvrir les déterminants (cosmiques ?).

► **Biais n° 1** : Parce que l'axe du temps est unique et que le récit, dans sa version « de base » tout du moins, n'est pas décliné par zone géographique ou par groupe taxonomique (ou par branche de l'arbre du vivant, ce qui revient au même), ou bien encore par catégories d'événements (atmosphériques, géologiques, biologiques, etc.), elle restitue une histoire unique sans pouvoir parler du déploiement des multiples histoires qui se sont réalisées de façon concomitante et indépendantes.

► **Biais n° 2** : La plupart des récits sélectionnent sans le dire des événements qui soulignent l'émergence de l'homme. En raison du biais n° 1, elles donnent de la sorte l'impression que le déploiement de l'histoire du vivant ne pouvait faire autrement que de tendre vers nous. Ainsi sélectionnera-t-on « l'apparition des vertébrés » (500 millions d'années ou Ma), « la sortie

12. Pour une critique plus détaillée, cf. Lecointre (2001).

des eaux» (370 Ma), le déploiement des «mammifères» (60 Ma) ou encore l'émergence de la «lignée humaine» (6 Ma).

► **Biais n° 3 :** L'anthropocentrisme est tel que la précision taxonomique avance avec le temps au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'homme, ce qui donne une importance démesurée aux innovations de faible rang taxonomique (le trou occipital sous-crânien ou l'élargissement transversal du bassin par exemple) par rapport à d'autres innovations dont on peut tout autant dire – rétrospectivement bien sûr – qu'elles ont eu une portée considérable. Ainsi, l'émergence des différentes photosynthèses, l'endosymbiose mitochondriale ou bien encore les multiples acquisitions de la pluricellularité sont généralement oubliées.

► **Biais n° 4 :** Le récit se terminant généralement sur l'apparition de l'espèce humaine, il donne l'impression que nous sommes l'aboutissement ultime d'une évolution *terminée*.

► **Biais n° 5 :** Les événements sélectionnés sont hétérogènes. Il s'agit tantôt de l'apparition d'un attribut («apparition de la plume, 150 Ma»), tantôt de l'apparition ou la disparition d'un groupe entier («apparition des vertébrés, 500 Ma», «disparition des dinosaures, 65 Ma» – ce qui est faux au plan taxonomique, les oiseaux étant des dinosaures – «disparition des trilobites, 245 Ma», etc.), tantôt la date d'un fossile précis emblématique («*Archaeopteryx*, 150 Ma», «*Ichthyostega*, 360 Ma»), tantôt de la date d'un événement si complexe que celui-ci perd toute sa texture et se délite dès lors qu'on le documente de manière plus détaillée («la sortie des eaux, 380 Ma» en est un exemple de choix). Cette hétérogénéité fait perdre toute cohérence méthodologique à la notion d'événement.

► **Biais n° 6 :** Les récits posent souvent des problèmes de précision du vocabulaire. En y plaçant «l'apparition des vertébrés», «l'extinction des bélemnites», «l'évolution des angiospermes», on ne sait pas vraiment de quoi l'on parle. Pour ne prendre que le premier exemple, s'agit-il de l'ensemble des vertébrés connus aujourd'hui ? Bien sûr que non. Mais au plan pédagogique, il manque ici de toute évidence une explicitation. Parle-t-on de l'ensemble des vertébrés connus, y compris ceux d'hier ? Non plus. Les vertébrés représentent plusieurs dizaines de milliers d'espèces qui ont vécu sur une période longue de 500 millions d'années (dont environ 52 000 répertoriées aujourd'hui). Parle-t-on du concept de vertébré ? Bien entendu, la réponse est non : on ne peut pas assigner une vie évolutive aux concepts que nous forgeons ; nos concepts n'ont pas eux-mêmes de dynamique biologique évolutive car cela reviendrait à confondre nos conventions taxonomiques avec les objets réels qu'elles regroupent et qu'elles nomment. À l'extrême limite, un concept ne pourrait avoir une certaine cohérence évolutive que si l'attribut qui le définit représentait à lui seul pour les organismes qui le portent une contrainte architecturale extrême-

ment forte ou bien un avantage sélectif exceptionnel sur une période de temps donnée. Et encore, dans ce cas, ce serait l'évolution des espèces porteuses de cet attribut qui s'en trouverait rendue cohérente, pas le concept lui-même qui ne saurait évoluer biologiquement. Parle-t-on alors de l'attribut qui permet de définir les vertébrés et de rattacher un organisme vivant ou fossile aux vertébrés ? En fait, oui. Autant être explicite et parler de « l'apparition des vertébrés » plutôt que de parler de « l'apparition des vertébrés ».

4 – Tentatives de solutions

Les récits chronologiques ne constituent pas des outils scientifiques et encore moins un phénomène naturel à découvrir comme le pense Jean Chaline, mais un moyen de communication. Le manque de cohérence dans la nature des « événements » sélectionnés n'est alors pas tant à leur reprocher. Il ne pose un problème grave que si ces événements choisis ensemble servent une inférence à prétention scientifique (ce qui a été le cas chez Chaline, cf. Lecointre 2001). En revanche, il convient de veiller à ce que les récits ne servent pas certaines de représentations incompatibles avec une bonne compréhension de l'évolution, comme par exemple notre tendance naturelle à l'anthropocentrisme et à la téléologie. Par exemple, puisque toute sélection d'événements est arbitraire, les récits devraient comporter au moins un événement postérieur à l'émergence de l'homme ou bien s'arrêter avant. Les récits gagneraient également à comporter des événements qui ne concernent pas notre « lignée », comme, par exemple, l'apparition des différentes photosynthèses, l'apparition de la cuticule comme squelette externe (qui concerne tout de même la moitié des espèces répertoriées à ce jour !), l'apparition du bois, de la fleur, etc. Enfin, nos récits devraient éviter des « grands » événements trop imprécis comme « sortie des eaux », ne pas mentionner la disparition ou l'apparition de groupes taxonomiques (les groupes, c'est nous qui les construisons) et ne se restreindre qu'à une seule catégorie d'événements : l'apparition ou la disparition d'attributs. Bien entendu, il ne s'agit pas d'éradiquer l'emploi des noms de taxons, mais de les employer dans le bon contexte. Par exemple, au lieu de faire figurer dans le récit « apparition des mammifères », on peut mentionner « apparition de la mandibule faite d'un seul os, l'os dentaire (trait caractérisant les mammifères) ». Car, encore une fois, ce n'est pas le groupe taxonomique qui apparaît (le groupe est un concept, et plus est, sa composition à l'époque indiquée n'est certainement pas celle que nous lui connaissons aujourd'hui), mais l'attribut qui le définit. De même, au lieu de faire figurer « apparition des oiseaux », on indiquera « apparition de la plume autorisant le vol (trait caractérisant les oiseaux) ».

5 – Tentative de récit : une sélection arbitraire de données sur l'histoire de la vie et de la Terre

Les événements qui suivent sont volontairement hétérogènes, non reliés entre eux (pas de relations de cause à effet), sélectionnés arbitrairement dans un but pédagogique (et non pour l'investigation scientifique), et tant que possible choisis pour être espacés le plus régulièrement possible au cours du temps (cependant, on n'échappe pas au fait matériel que plus le temps est proche de nous, plus la documentation est riche, pour des raisons diverses d'intérêt que nous portons aux époques récentes et de dégradation matérielle des traces du passé, croissante avec l'âge, quelles qu'elles soient).

- **Entre 4 570 et 4 500 millions d'années :** Formation de la Terre.
- **4 500 millions d'années :** Méga-impact tangentiel avec une planète de la taille de Mars, éjectant une partie du manteau terrestre et donnant naissance à la Lune.
- **4 400 millions d'années :** Âge des plus vieux matériaux terrestres connus : les zircons de Jack Hills, en Australie. L'analyse de ces minéraux montre que la surface de la Terre abrite déjà à cette époque de l'eau liquide ainsi qu'une croûte continentale stable.
- **Autour de 4 000 millions d'années :** Plus vieilles roches terrestres connues : les gneiss d'Acasta, dans le nord-ouest du Canada. La Terre est soumise à un intense bombardement météoritique. Formation de molécules organiques dans l'atmosphère ou dans les systèmes hydrothermaux des fonds océaniques sous l'effet d'une activation thermique ou photochimique. Certains types de météorites ont également pu apporter sur Terre des molécules organiques comme des acides aminés aliphatiques. Des réseaux de réactions conduisent à la formation de molécules de plus en plus complexes comme des polypeptides et des polymères d'acides nucléiques ; à partir de là, les processus ayant été à la base de l'apparition des premières cellules restent très mal compris. Concernant la date d'apparition de la vie, on ne peut donner qu'un intervalle de temps : entre 4 300 millions (date à laquelle les conditions physico-chimiques à la surface de la Terre sont devenues compatibles avec la vie) et 2 700 millions d'années (âge des plus anciennes traces de vie fossile non ambiguës connues, voir ci-dessous)¹³. À l'intérieur de cet intervalle de temps, le plus vraisemblable est que la vie soit apparue entre 3 800 millions (fin du bombardement météoritique intense) et 3 500 millions d'années (âge de structures fossiles australiennes pouvant être interprétées avec une assez bonne robustesse comme des stromatolithes).
- **2 700 millions d'années :** Plus vieilles traces de vies fossiles *non ambiguës* connues : les stromatolithes australiens de Fortescue. Les stromatolithes

13. Cf. Tirard, ce volume. (NdÉ.)

sont des structures sédimentaires laminées formées suite à une précipitation de carbonates induite par des communautés microbiennes complexes. Dans la nature actuelle, ces dernières comprennent de nombreux types de bactéries photosynthétiques – dont les cyanobactéries, qui pratiquent la photosynthèse oxygénique – et de bactéries hétérotrophes. La présence de stromatolithes atteste donc de celle de cyanobactéries. • **2 600-1 800 millions d'années** : Forte élévation de la teneur en dioxygène des océans puis de l'atmosphère probablement due à l'activité photosynthétique. • **2 000-1 800 millions d'années** : Apparition du noyau cellulaire et des microtubules, caractérisant les eucaryotes. C'est autour de cette période que se situe l'origine des mitochondries, suite à une endosymbiose entre une bactérie utilisatrice d'oxygène (via la respiration) et une autre cellule (cellule proto-eucaryote ou cellule procaryote). • **2 000-1 200 millions d'années** : Origine des chloroplastes suite à une endosymbiose entre une cyanobactérie et une cellule eucaryote. • **1 500 millions d'années** : Apparition de la reproduction sexuée. • **1 000 millions d'années** : Apparition probable des premiers eucaryotes pluricellulaires. L'orogénèse grenvillienne met en place un continent géant, la Rodinia. • **700 millions d'années** : Début de la fragmentation du supercontinent Rodinia. • **715, 635 et 580 millions d'années** : Trois épisodes glaciaires : glaciation sturtienne ; glaciation marinoenne et glaciation varangienne ou glaciation de Gaskiers. Ces glaciations ont affecté les basses latitudes et, selon certains auteurs, elles ont été globales (Terre « boule-de-neige »). • **600 millions d'années** : Premières traces de métazoaires bilatériens. • **580 millions d'années** : Plus anciens embryons fossilisés (faune de Doushantuo). • **570-560 millions d'années** : À la fin de la glaciation varangienne, on assiste à une diversification explosive des animaux, notamment diblastiques (éponges, cnidaires de la faune d'Ediacara). • **550-540 millions d'années** : Vague d'extinction parmi les premiers métazoaires. Transgression marine et climat chaud, augmentation des mers épicontinentales favorables à la vie. Acquisition de tissus durs minéralisés à partir de carbonates ou de phosphates, parfois de la silice : les carapaces, tests et coquilles apparaissent (brachiopodes, mollusques, archéocyathes, arthropodes). Orogénèse cadomienne. • **540-530 millions d'années** : Explosion cambrienne : plus anciens cténophores, sipunculides, annélides attestés, phoronidiens, chaetognathes, onychophores, tardigrades, nématodes, priapulins, échinodermes, hémichordés, chordés connus ; chez ces derniers, il y a notamment, juste après l'apparition du crâne, divergence des myxines, puis, après, l'apparition des nodules vertébraux, divergence des lamproies ; diversification des trilobites. • **500 millions d'années** : Apparition du squelette post-crânien chez les vertébrés. Il s'agit des pièces

squelettiques en arrière du crâne, c'est-à-dire des vertèbres et des appendices. • **490-350 millions d'années** : Diversification des vertébrés cuirassés sans mâchoires. • **440 millions d'années** : Les algues s'implantent hors de l'eau. Leur activité modifie les roches en surface en produisant un «sol» : apparition de la terre végétale. • **439 millions d'années** : Glaciation et vague d'extinctions marines : à la limite Ordovicien/Silurien, il y a disparition de 57 % des genres connus de la biodiversité marine. • **430 millions d'années** : Chez les vertébrés, apparition de la mâchoire (gnathostomes). Chez les vertébrés, apparition des appendices pairs antérieurs (en forme de palettes). • **420 millions d'années** : Parmi les vertébrés, radiation des gnathostomes : plus anciens placodermes, chondrichthyens, actinoptérygiens, sarcoptérygiens connus (seules des écailles sont connues de cette époque pour les chondrichthyens et les actinoptérygiens). Plus ancienne plante vasculaire terrestre connue. Ces plantes permettent une véritable colonisation du milieu aérien et fournissent d'importants débris végétaux à dégrader pour de nombreuses lignées de bactéries, de champignons, de lichens et de métazoaires. • **410-360 millions d'années** : Parmi les gnathostomes, diversification massive des placodermes et des acanthodiens. Parmi les sarcoptérygiens, diversification des dipneustes et des actinistiens (coelacanthes). • **400 millions d'années** : La présence de nombreux groupes d'arthropodes est attestée en milieu terrestre : on trouve des acariens, des scorpions et des myriapodes. • **395 millions d'années** : Plus ancien hexapode terrestre connu (six pattes, une paire d'antennes) : collemboles. • **390 millions d'années** : Les insectes acquièrent des ailes, qui définissent le groupe des ptérygotes. Plus ancienne plante arborescente connue. Fin de l'orogénèse calédonienne (500-390 millions d'années ; on en trouve aujourd'hui les marques en Grande-Bretagne, en Scandinavie, au Groenland oriental). • **375 millions d'années** : Premières traces de bois. Premières grandes forêts, notamment à *Archaeopteris*. Ces forêts stockent d'énormes quantités de dioxyde de carbone. Elles sont également à l'origine de la constitution de sols et, de ce fait, offrent toute une palette de niches écologiques nouvelles pour les arthropodes, les annélides et les nématodes. La teneur en oxygène de l'atmosphère augmente. Elle atteindra son maximum il y a 350 millions d'années (Carbonifère). • **370 millions d'années** : Chez les vertébrés, en milieu aquatique, apparition du membre chiroïdien (tétrapodes). Orogenèse acadienne. • **365 millions d'années** : Glaciation (fin du Dévonien). Vague d'extinctions : à la limite Dévonien-Carbonifère, 50 % des genres connus de la biodiversité marine disparaissent. Il y a ainsi extinction de 80 % des genres de coraux, notamment des stromatopores ; les foraminifères et les conodontes frisent l'extinction totale ; tous les placodermes, les ostéostracés, les galéaspides, les thélo-

dontes, les hétérostracés et les anaspides disparaissent. Ils sont remplacés par la faune qui est issue d'une première diversification actinoptérygienne (360-65 millions d'années) et d'une première diversification chondrichthyenne (360-200 millions d'années). La vie terrestre ne semble pas touchée. • **350 millions d'années** : Apogée des ptérydophytes (fougères) et sphénophytes (prêles). • **340-200 millions d'années** : Diversification des tétrapodes (première faune amphibienne). • **330 millions d'années** : Chez les vertébrés, plus ancien fossile connu de tétrapode exclusivement terrestre. • **320 millions d'années** : Explosion des plantes à graines, notamment des « fougères à graines », les glossopteridales. • **315-310 millions d'années** : Apparition de l'œuf amniotique et diversification des amniotes : lignée synapside (celle à laquelle appartiennent les mammifères) et lignée sauropside (celle à laquelle appartiennent les tortues, les lépidosauriens et les archosauriens – crocodiles et oiseaux – pour ce citer que des groupes actuels). Plus ancien cônifère connu (*Walchia piniformis*). • **300 millions d'années** : Plus ancien coléoptère connu. Orogénèse hercynienne (345-230 millions d'années ; on en trouve aujourd'hui les marques en Europe). • **290 millions d'années** : Déclin des amphibiens de grande taille. Plus ancienne cycadale connue. • **280 millions d'années** : Formation du supercontinent Pangée. Un climat aride y règne. Diversification des cônifères au détriment des flores à ptéridophytes. • **250 millions d'années** : Chez les actinoptérygiens, plus ancien téléostéen connu. Plus ancien lissamphibien connu (amphibien moderne). Plus anciens représentants connus des archosaures, des ichthyosaures et des sauroptérygiens. • **245 millions d'années** : Refroidissement du climat et désertification des continents ; régression marine majeure. Extinctions massives (limite Permien/Trias). Il y a disparition de 83 % des genres connus de la biodiversité marine : les trilobites, les euryptérides, les foraminifères fusilines, les coraux rugueux s'éteignent, tandis que beaucoup d'autres groupes déclinent fortement (bryozoaires, brachiopodes articulés, ammonitoïdes, mollusques gastéropodes, plusieurs groupes d'échinodermes dont les crinoïdes, et les oursins, qui frisent l'extinction totale). Après cette crise, les brachiopodes cèdent la place aux mollusques bivalves. Sur terre, les dinocéphales, les gorgonopsiens, les thérocéphales et beaucoup de petits groupes d'eureptiles disparaissent. Les dicynodontes frisent l'extinction totale. Sur 27 ordres d'insectes répertoriés à la fin du Permien, 8 disparaissent. Début de la fragmentation de la Pangée. Le processus se poursuit aujourd'hui encore au niveau de la mer Rouge et du grand rift est-africain. • **240 millions d'années** : Plus anciens représentants connus des insectes hyménoptères et des insectes diptères. Chez les archosaures : début de la lignée crocodylienne ; plus anciens représentants connus de la lignée dinosaurienne. Des amniotes colonisent les mers :

placodontes, sauroptérygiens, ichtyosaures, crocodiliens. Des amniotes colonisent les eaux douces : tortues, crocodiles, phytosaures, rynchosaures. • **220 millions d'années** : Plus anciens représentants connus des insectes lépidoptères, des ptérosaures et des lépidosauriens. La diversification archosaurienne en milieu terrestre provoque un changement des faunes d'amniotes : les synapsides carnivores et herbivores, majoritaires entre 290 et 220 millions d'années, laissent la place aux archosaures (sauropsidés) et deviennent minoritaires. Plus ancienne tortue connue, *Odontochelys*. • **210 millions d'années** : Apparition de la mandibule à un seul os (mammifères). • **204 millions d'années** : Vague d'extinctions (limite Trias/Jurassique). Il y a disparition de 47 % des genres connus de la biodiversité marine. Beaucoup de groupes marins sont affectés : les conodontes, les nothosaures, les placodontes, les phytosaures s'éteignent. En milieu terrestre, les dinosaures herbivores disparaissent presque entièrement. • **200 millions d'années** : Seconde diversification chondrichthyenne (requins et raies). Diversification des dinosaures. • **170 millions d'années** : Début de l'ouverture de l'Atlantique Nord. • **150 millions d'années** : Plus ancien représentant connu des oiseaux. Plus ancien représentant connu des squamates. • **140 millions d'années** : Plus ancien mammifère marsupial connu. • **130 millions d'années** : Vague d'extinctions (limite Jurassique/Crétacé). Plus ancienne plantes à fleur connue. • **120 millions d'années** : Chez les squamates, plus ancien serpents connu. Fragmentation du Gondwana, d'abord par ouverture méridienne de l'Atlantique Sud. • **110-100 millions d'années** : Explosion des plantes à fleurs. Plus ancienne abeille connue. Chez les mammifères, première radiation des lignées d'euthériens (mammifères placentaires) et première radiation indépendante des lignées de métathétiens. • **100 millions d'années** : Radiation des acanthomorphes, téléostéens à nageoires épineuses. Début de la formation de la chaîne alpine. • **90 millions d'années** : Seconde radiation des lignées de mammifères placentaires. Radiation des néornithes, oiseaux modernes. • **65 millions d'années** : Vague d'extinctions (limite Crétacé/Tertiaire). Près de 50 % des genres connus de la biodiversité marine disparaissent. En milieu aquatique, il y a extinction des ammonites, des bélemnites, des mollusques rudistes, des inocérames, des trigonies, des ichtyosaures, des sauroptérygiens. Tous les vertébrés terrestres de plus de 25 kg disparaissent, ce qui représente 43 % des familles de tétrapodes. Il y a par exemple extinction des ptérosaures et des dinosaures non aviens. Pour ce qui concerne la flore, les bennettiales disparaissent ; les cycadales et les conifères régressent au profit des angiospermes. Plus ancien primate connu. • **60 millions d'années** : Plus ancien rongeur connu. Plus ancien carnivore connu. • **55 millions d'années** : Plus ancien chiroptère connu. Plus ancien

proboscidiens connus. • **50 millions d'années** : Les mammifères atteignent de grandes tailles. Plus ancien cétacé connu. • **45 millions d'années** : Collision entre l'Inde et l'Eurasie. Début de formation de l'Himalaya. Radiation des Neoaves (oiseaux « modernes »). • **37 millions d'années** : Refroidissement général du climat. Début de la formation de la calotte glaciaire antarctique. Il en résulte une modification de la circulation océanique et un remplacement important de la faune mammalienne : c'est la « grande coupure » (extinction probable de 20 % des genres connus de la biodiversité marine). • **20 millions d'années** : Phase majeure de surrection de la cordillère des Andes et de l'Himalaya. Diversification des oiseaux passériformes. • **2,5 millions d'années** : Mise en place de l'isthme de Panama ; on assiste à un vaste échange de faunes entre les deux continents américains dans les sens nord-sud et sud-nord (c'est le grand échange de faunes inter-Amériques). • **700 000 ans** : Maximum glaciaire (« Günz »). • **370 000 ans** : Maximum glaciaire (« Mindel »). Régression marine (dite « calabrienne »). • **340 000 ans** : Interglaciaire « Principal ». Transgression marine dite « sicilienne ». • **200 000-140 000 ans** : Maximum glaciaire (« Riss »). • **120 000 ans** : Interglaciaire. Transgression marine dite « tyrrhénienne ». Plus ancien représentant connu d'*Homo sapiens sapiens* (homme moderne). • **130 000-10 000 ans** : Dernier cycle interglaciaire-glaciaire en Europe ; notamment **22 000-15 000 ans** : Dernier maximum glaciaire en Europe (« Würm »). • **15 000-10 000 ans** : Réchauffement. • **50 000-9 000 ans** : Plus importante vague d'extinctions jamais connue par les mammifères. Elle a concerné avant tout les espèces de grande taille (poids moyen supérieur à 100 kg). • **6 000 ans** : Disparition du mammouth. • **Depuis 500 ans** : Apparition de cinq espèces de souris sur l'île de Madère, dotées d'un nombre réduit de chromosomes (entre 22 et 30) au lieu de 40, et séparées entre elles par des barrières montagneuses. • **50 ans** : Apparition d'une nouvelle espèce de moustique dans le métro de Londres (*Culex molestus*).

6 – Épilogue

On vient de lire 18 événements choisis depuis les derniers 65 millions d'années. Pour bien faire comprendre le propos, voici une autre sélection de 18 événements arbitrairement choisis sur la même période de temps :

• **53 millions d'années** : Plus ancien équidé (famille des chevaux) connu, *Hyracotherium*. • **50 millions d'années** : Radiation des mammifères créodontes, qui supplantent les grands oiseaux aptères prédateurs du Paléocène et jouent le rôle de nos actuels mammifères carnivores (félins, loups, ours, hyènes, belettes, etc.). • **45 millions d'années** : L'Australie se détache de l'Antarctique. • **30 millions d'années** : Les manchots apparaissent en Antarctique et dans le sud de l'Australie. Les carnivores supplantent les

créodontes. • **25 millions d'années** : Les ancêtres des rongeurs hystricomorphes (porc-épic, cochon d'Inde), les primates platyrrhiniens (ouistiti, hurleur) et les squamates amphisbaeniens atteignent l'Amérique du Sud, continent isolé dont ils étaient absents, probablement par radeau forestier. • **20 millions d'années** : Ouverture de la mer Rouge. • **6,8 millions d'années** : Premiers représentants connus de la famille des hominidés avec *Sahelanthropus*. • **1,2 million d'années** : Extinction des australopithèques. • **1 million d'années** : Extinction des paranthropes. • **100 000 ans** : L'homme moderne, *Homo sapiens sapiens*, parti de l'Afrique de l'Est, atteint l'Asie mineure. • **67 000 ans** : L'homme moderne atteint l'Extrême-Orient. • **50 000 ans** : L'homme moderne atteint l'Australie. • **45 000 ans** : L'homme moderne atteint l'Europe. • **35 000 ans** : L'homme moderne atteint l'Amérique du Nord. • **30 000 ans** : Disparition de l'homme de Néandertal. • **11 000 ans** : Domestication du loup ; apparition du chien domestique. • **200 ans** : Naissance de Charles Robert Darwin. • **23 ans** : Extinction de Michel Colucci.

Références bibliographiques

- BRISAUD Ivan (2007), « La chronologie du jazz suit-elle une loi log-périodique ? », *Mathematics and Social Sciences*, n° 178, (2) : 41-50.
- CASH Roland, CHALINE Jean, NOTTALE Laurent & GROU Pierre (2002), « Développement humain et loi log-périodique », *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Biologies*, 325 : 585-590.
- CHALINE Jean, NOTTALE Laurent & GROU Pierre (1999), « L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ? », *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Paléontologie*, 328, 11a, 717-726.
- FITZHUGH Kirk (2005), « Les bases philosophiques de l'inférence phylogénétique : une vue d'ensemble », in P. Deleporte & G. Lecointre (dir.), « Philosophie de la systématique », *Biosystema*, 24, Société française de systématique : 83-105.
- GAYON Jean (2003), « Il était une fois... », in L. Mayet (dir.), « Le monde selon Darwin », Hors-Série de *Sciences et Avenir*, n° 134 : 16-21.
- KUPIEC Jean-Jacques (2008), *L'origine des individus*, Paris, Fayard.
- KUPIEC Jean-Jacques, GANDRILLON Olivier, MORANGE Michel & SILBERSTEIN Marc (2009), *Le hasard au cœur de la cellule. Probabilités, déterminisme, génétique*, Paris, Syllepse.
- LECOINTRE Guillaume (2001), « Anatomie d'un titre », in J. Dubessy & G. Lecointre (dir.), *Intrusions spiritualistes et impostures intellectuelles en sciences*, Paris, Syllepse : 23-67.
- MAYET Laurent (dir.) (2006), « L'univers est-il sans histoire ? », Hors-Série de *Sciences et Avenir*, n° 146.
- MAYR Ernst (1961), "Cause and effect in biology", *Science*, 134 : 1501-1506.
- NOTTALE Laurent, CHALINE Jean & GROU Pierre (2000), *Les arbres de l'évolution*, Paris, Hachette Littératures.
- PROUST Joëlle (2006), « L'explication historique », in L. Mayet (dir.), « L'univers est-il sans histoire ? », Hors-Série de *Sciences et Avenir*, n° 146 : 36-40.
- TEISSIER GEORGES & L'HÉRITIER Philippe (1933), « Étude d'une population de Drosophiles en équilibre », *C. R. Acad. Sc.*, t. 197 : 1765-1767.
- TEISSIER GEORGES & L'HÉRITIER Philippe (1934), « Une expérience de sélection naturelle. Courbe d'élimination du gène "bar" dans une population de Drosophiles en équilibre », *C. R. Soc. Biol.*, t. 117 : 1049-1051.

