

Le hasard et la nécessité

et nous avons là l'explication¹ d'un fait en vérité bien plus paradoxal que l'évolution elle-même, à savoir la prodigieuse stabilité de certaines espèces, qui ont su se reproduire sans modifications appréciables depuis des centaines de millions d'années.

* * *

La physique cependant nous enseigne que (sauf au zéro absolu, limite inaccessible) aucune entité microscopique ne peut manquer de subir des perturbations d'ordre quantique, dont l'accumulation, au sein d'un système macroscopique, en altérera la structure, graduellement mais inmanquablement.

Les êtres vivants, malgré la perfection conservatrice de la machinerie qui assure la fidélité de la traduction, n'échappent pas à cette loi. La sénescence et la mort des organismes pluricellulaires s'expliquent, en partie au moins, par l'accumulation d'erreurs accidentelles de traduction qui, altérant notamment certains des composants responsables de la fidélité de la traduction elle-même, accroissent la fréquence de ces erreurs, qui dégradent peu à peu, inexorablement, la structure de ces organismes².

perturbations microscopiques Le mécanisme de la réplication lui non plus ne saurait, sans violer les lois de la physique, échapper à toute perturbation, à tout accident. Quelques-unes au moins de ces perturbations entraîneront des modifications plus ou moins discrètes de certains éléments

1. Explication partielle, v. p. 158.

2. Orgel, L.E., *Proceedings of the National Academy of Science*, 49, p. 517 (1963).

Invariance et perturbations

de séquence. Erreurs de transcription qui, en vertu de la fidélité aveugle du mécanisme, seront, à d'autres perturbations près, automatiquement retranscrites. Elles seront tout aussi fidèlement traduites en une altération de la séquence des amino-acides dans le polypeptide correspondant au segment d'ADN dans lequel la mutation se sera produite. Mais ce n'est qu'une fois ce polypeptide partiellement nouveau replié sur lui-même que se révélera la « signification » fonctionnelle de la mutation.

Parmi les recherches modernes en biologie, certaines des plus belles par leur méthodologie, comme des plus profondément significatives, constituent ce qu'on appelle la génétique moléculaire (Benzer, Yanofsky, Brenner et Crick). Ces recherches ont permis, en particulier, d'analyser les différents types d'altérations accidentelles discrètes que peut subir une séquence de polynucléotides dans la double fibre de l'ADN. On a ainsi identifié diverses mutations comme dues à :

1. la substitution d'une seule paire de nucléotides à une autre ;
2. la délétion ou l'addition d'une ou plusieurs paires de nucléotides ;
3. divers types de « mastics » altérant le texte génétique par inversion, répétition, translocation et fusion de segments de séquence plus ou moins longs¹.

Nous disons que ces altérations sont accidentelles, qu'elles ont lieu au hasard. Et puisqu'elles constituent la seule source possible de modifications du texte génétique, seul dépositaire à son tour des structures héréditaires de l'organisme, il s'ensuit nécessairement

1. Cf. Appendices, p. 236.

Le hasard et la nécessité

que le hasard *seul* est à la source de toute nouveauté, de toute création dans la biosphère. Le hasard pur, le seul hasard, liberté absolue mais aveugle, à la racine même du prodigieux édifice de l'évolution : cette notion centrale de la biologie moderne n'est plus aujourd'hui une hypothèse, parmi d'autres possibles ou au moins concevables. Elle est la seule concevable, comme seule compatible avec les faits d'observation et d'expérience. Et rien ne permet de supposer (ou d'espérer) que nos conceptions sur ce point devront ou même pourront être révisées.

Cette notion est aussi, de toutes celles de toutes les sciences, la plus destructive de tout anthropocentrisme, la plus inacceptable intuitivement pour les êtres intentionnellement téléonomiques que nous sommes. C'est donc la notion ou plutôt le spectre que doivent à tout prix exorciser toutes les idéologies vitalistes et animistes. Aussi est-il très important de préciser dans quel sens exact le mot de hasard peut et doit être employé, s'agissant des mutations comme source de l'évolution. Le contenu de la notion de hasard n'est pas simple et le mot même est employé dans des situations très différentes. Le mieux est d'en prendre quelques exemples.

Ainsi on emploie ce mot à propos du jeu de dés, ou de la roulette, et on utilise le calcul des probabilités pour prévoir l'issue d'une partie. Mais ces jeux purement mécaniques, et *macroscopiques*, ne sont « de hasard » qu'en raison de l'impossibilité *pratique* de gouverner avec une précision suffisante le jet du dé ou celui de la boule. Il est évident qu'une mécanique de lancement de très haute précision est concevable, qui permettrait d'éliminer en grande partie l'incertitude du résultat. Disons qu'à la roulette, l'in-

incertitude
opération-
nelle et
incertitude
essentielle

Invariance et perturbations

certitude est purement opérationnelle, mais non essentielle. Il en est de même, comme on le verra aisément, pour la théorie de nombreux phénomènes où on emploie la notion de hasard et le calcul des probabilités pour des raisons purement méthodologiques.

Mais dans d'autres situations, la notion de hasard prend une signification essentielle et non plus simplement opérationnelle. C'est le cas, par exemple, de ce que l'on peut appeler les « coïncidences absolues », c'est-à-dire celles qui résultent de l'intersection de deux chaînes causales totalement indépendantes l'une de l'autre. Supposons par exemple que le Dr Dupont soit appelé d'urgence à visiter un nouveau malade, tandis que le plombier Dubois travaille à la réparation urgente de la toiture d'un immeuble voisin. Lorsque le Dr Dupont passe au pied de l'immeuble, le plombier lâche par inadvertance son marteau, dont la trajectoire (déterministe) se trouve intercepter celle du médecin, qui en meurt le crâne fracassé. Nous disons qu'il n'a pas eu de chance. Quel autre terme employer pour un tel événement, imprévisible par sa nature même ? Le hasard ici doit évidemment être considéré comme essentiel, inhérent à l'indépendance totale des deux séries d'événements dont la rencontre produit l'accident.

Or entre les événements qui peuvent provoquer ou permettre une erreur dans la *réplication* du message génétique et ses conséquences fonctionnelles, il y a également indépendance totale. L'effet fonctionnel dépend de la structure, du rôle actuel de la protéine modifiée, des interactions qu'elle assure, des réactions qu'elle catalyse. Toutes choses qui n'ont rien à voir avec l'événement mutationnel lui-même, comme avec ses causes immédiates ou lointaines, et quelle

Le hasard et la nécessité

que soit d'ailleurs la nature, déterministe ou non, de ces « causes ».

Il existe enfin, à l'échelle microscopique, une source d'incertitude plus radicale encore, enracinée dans la structure quantique de la matière elle-même. Or une mutation est en soi un événement microscopique, quantique, auquel par conséquent s'applique le principe d'incertitude. Événement donc *essentiellement* imprévisible par sa nature même.

Comme on sait, le principe d'incertitude n'a jamais été entièrement accepté par certains des plus grands physiciens modernes, à commencer par Einstein qui disait ne pouvoir admettre que « Dieu joue aux dés ». Certaines écoles ont voulu n'y voir qu'une notion purement opérationnelle, mais non essentielle. Tous les efforts faits pour substituer à la théorie quantique une structure plus « fine », d'où l'incertitude aurait disparu, se sont cependant soldés par des échecs et bien peu de physiciens paraissent disposés à croire aujourd'hui que ce principe pourra jamais disparaître de leur discipline.

Quoi qu'il en soit il faut souligner que, si même le principe d'incertitude devait un jour être abandonné, il n'en demeurerait pas moins qu'entre le déterminisme, fût-il entier, d'une mutation de séquence dans l'ADN et celui de ses effets fonctionnels au niveau des interactions de la protéine, on ne pourrait encore voir qu'une « coïncidence absolue » au sens défini plus haut par la parabole du plombier et du docteur. L'événement resterait donc du domaine du *hasard* « essentiel ». A moins bien entendu de revenir à l'univers de Laplace, d'où le hasard est exclu par définition et où le docteur, de tout temps, devait mourir sous le marteau du plombier.

Invariance et perturbations

Bergson, on s'en souvient, voyait dans l'évolution l'expression d'une force créatrice, *absolue* en ce sens qu'il ne la supposait pas tendue à une autre fin que la création en elle-même et pour elle-même. En cela il diffère radicalement des animistes (qu'il s'agisse d'Engels, de Teilhard ou des positivistes optimistes tels que Spencer) qui tous voient dans l'évolution le majestueux déroulement d'un programme inscrit dans la trame même de l'Univers. Pour eux, par conséquent, l'évolution n'est pas véritablement création, mais uniquement « révélation » des intentions jusque-là inexprimées de la nature. D'où la tendance à voir dans le développement embryonnaire une émergence de même ordre que l'émergence évolutive. Selon la théorie moderne, la notion de « révélation » s'applique au développement épigénétique, mais non, bien entendu, à l'émergence évolutive qui, grâce précisément au fait qu'elle prend sa source dans l'imprévisible essentiel, est créatrice de nouveauté *absolue*. Cette convergence apparente entre les voies de la métaphysique bergsonienne et celles de la science serait-elle encore l'effet d'une pure coïncidence ? Peut-être pas : Bergson, en artiste et poète qu'il était, très bien informé par ailleurs des sciences naturelles de son temps, ne pouvait manquer d'être sensible à l'éblouissante richesse de la biosphère, à la variété prodigieuse des formes et des comportements qui s'y déploient, et qui paraissent témoigner presque directement, en effet, d'une prodigalité créatrice inépuisable, libre de toute contrainte.

Mais là où Bergson voyait la preuve la plus manifeste que le « principe de la vie » est l'évolution elle-même, la biologie moderne reconnaît, au contraire, que toutes les propriétés des êtres vivants reposent sur

l'évolution :
création
absolue et
non
révélation

Le hasard et la nécessité

un mécanisme fondamental de *conservation moléculaire*. Pour la théorie moderne l'évolution n'est nullement une propriété des êtres vivants puisqu'elle a sa racine dans les *imperfections mêmes* du mécanisme conservateur qui, lui, constitue bien leur unique privilège. Il faut donc dire que la même source de perturbations, de « bruit » qui, dans un système non vivant, c'est-à-dire non répliatif, abolirait peu à peu toute structure, est à l'origine de l'évolution dans la biosphère, et rend compte de sa totale liberté créatrice, grâce à ce conservatoire du hasard, sourd au bruit autant qu'à la musique : la structure répliatrice de l'ADN.

7

Évolution

Les événements élémentaires initiaux qui ouvrent la voie de l'évolution à ces systèmes intensément conservateurs que sont les êtres vivants sont microscopiques, fortuits et sans relation aucune avec les effets qu'ils peuvent entraîner dans le fonctionnement téléonomique.

Mais une fois inscrit dans la structure de l'ADN, l'accident singulier et comme tel essentiellement imprévisible va être mécaniquement et fidèlement répliqué et traduit, c'est-à-dire à la fois multiplié et transposé à des millions ou milliards d'exemplaires. Tiré du règne du pur hasard, il entre dans celui de la nécessité, des certitudes les plus implacables. Car c'est à l'échelle macroscopique, celle de l'organisme, qu'opère la sélection.

le hasard
et la
nécessité

Beaucoup d'esprits distingués, aujourd'hui encore, paraissent ne pas pouvoir accepter ni même comprendre que d'une source de bruit la sélection ait pu, à elle seule, tirer toutes les musiques de la biosphère. La sélection opère en effet sur les produits du hasard, et ne peut s'alimenter ailleurs ; mais elle opère dans un domaine d'exigences rigoureuses dont le hasard est banni. C'est de ces exigences, et non du hasard, que l'évolution a tiré ses orientations généralement ascendantes, ses conquêtes successives, l'épanouissement ordonné dont elle semble donner l'image.

Le hasard et la nécessité

Certains évolutionnistes post-darwiniens ont eu tendance d'ailleurs à propager de la sélection naturelle une idée appauvrie, naïvement féroce, celle de la pure et simple « lutte pour la vie », expression qui n'est pas de Darwin d'ailleurs, mais de Spencer. Les néo-darwiniens du début de ce siècle en ont proposé au contraire une conception bien plus riche et montrée, sur la base de théories quantitatives, que le facteur décisif de la sélection n'est pas la « lutte pour la vie » mais, au sein d'une espèce, le taux différentiel de reproduction.

Les données de la biologie contemporaine permettent d'éclaircir et de préciser encore la notion de sélection. Nous avons, notamment, de la puissance, de la complexité et de la cohérence du réseau cybernétique intracellulaire (même chez les organismes les plus simples) une idée assez claire, autrefois ignorée, qui nous permet, bien mieux qu'auparavant, de comprendre que toute « nouveauté », sous forme d'une altération de la structure d'une protéine, sera avant tout testée pour sa compatibilité avec l'ensemble d'un système déjà lié par d'innombrables asservissements qui commandent l'exécution du projet de l'organisme. Les seules mutations acceptables sont donc celles qui, à tout le moins, ne réduisent pas la cohérence de l'appareil téléonomique, mais plutôt le renforcent encore dans l'orientation déjà adoptée ou, et sans doute bien plus rarement, l'enrichissent de possibilités nouvelles.

C'est l'appareil téléonomique, tel qu'il fonctionne lorsque s'exprime pour la première fois une mutation qui définit les *conditions initiales* essentielles de l'admission, temporaire ou définitive, ou du rejet de la tentative née du hasard. C'est la performance téléono-

Evolution

mique, expression globale des propriétés du réseau des interactions constructives et régulatrices, qui est jugée par la sélection, et c'est de ce fait que l'évolution elle-même paraît accomplir un « projet », celui de prolonger et d'amplifier un « rêve » ancestral.

Grâce à la perfection conservatrice de l'appareil répliquatif, toute mutation, considérée individuellement, est un événement très rare. Chez les bactéries, seuls organismes pour lesquels on ait des données nombreuses et précises sur ce sujet, on peut admettre que la probabilité, pour un gène donné, de subir une mutation qui altère sensiblement les propriétés fonctionnelles de la protéine correspondante est de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-8} par génération cellulaire. Mais dans quelques millilitres d'eau une population de plusieurs milliards de cellules peut se développer. Dans une telle population, on a donc la certitude que toute mutation donnée est représentée à 10, 100 ou 1 000 exemplaires. On peut également estimer que le nombre total des mutants de toutes espèces dans cette population est de l'ordre de 10^6 à 10^9 .

richesse
de la source
de hasard

A l'échelle de la population, par conséquent, la mutation n'est nullement un phénomène d'exception : c'est la règle. Or c'est au sein de la population, mais non d'individus isolés, que s'exerce la pression de sélection. Les populations d'organismes supérieurs, il est vrai, n'atteignent pas les dimensions de celles des bactéries, mais :

1. le génome d'un organisme supérieur, mammifère par exemple, contient mille fois plus de gènes que celui d'une bactérie ;
2. le nombre de générations cellulaires, donc de chances de mutations, dans la lignée germinale d'ovule

Le hasard et la nécessité

à ovule ou de spermatozoïde à spermatozoïde est très grand.

C'est peut-être ce qui explique que le taux de certaines mutations chez l'homme paraisse relativement élevé : de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-5} par exemple, pour un certain nombre de mutations provoquant des maladies génétiques aisément repérables. Encore faut-il noter que les chiffres avancés ici ne tiennent pas compte des mutations individuellement non décelables, mais qui, associées par recombinaison sexuelle, pourraient avoir des effets sensibles. Il est probable que de telles mutations ont eu plus d'importance dans l'évolution que celles dont les effets individuels sont plus marqués.

Au total, on peut estimer que, dans la population humaine actuelle (3×10^9) il se produit, à chaque génération, quelque cent à mille milliards de mutations. Je n'avance ce chiffre que pour donner une idée des dimensions de l'immense réservoir de variabilité fortuite que constitue le génome d'une espèce, malgré, encore une fois, les propriétés jalousement conservatrices du mécanisme répliatif.

Compte tenu des dimensions de cette énorme loterie et de la vitesse à laquelle y joue la nature, ce n'est plus l'évolution, mais au contraire la stabilité des « formes » dans la biosphère qui pourrait paraître difficilement explicable sinon quasi paradoxale. On sait que les plans d'organisation correspondant aux principaux embranchements du règne animal étaient différenciés dès la fin du Cambrien, soit il y a 500 millions d'années. On sait aussi que certaines espèces même n'ont pas sensiblement évolué depuis des centaines de millions d'années. La lingule, par exemple, depuis 450 millions d'années ; quant à

« paradoxe »
de la
stabilité des
espèces

Evolution

L'huître d'il y a 150 millions d'années, elle avait même apparence et sans doute même saveur que celle que l'on sert aujourd'hui dans les restaurants¹. Enfin on peut estimer que la cellule « moderne », caractérisée par son plan d'organisation chimique invariant (à commencer par la structure du code génétique et le mécanisme compliqué de la traduction), existe depuis deux à trois milliards d'années, sans aucun doute déjà pourvue de puissants réseaux cybernétiques moléculaires assurant sa cohérence fonctionnelle.

L'extraordinaire stabilité de certaines espèces, les milliards d'années que couvre l'évolution, l'invariance du « plan » chimique fondamental de la cellule ne peuvent évidemment s'expliquer que par l'extrême cohérence du système téléonomique qui, dans l'évolution, a donc joué le rôle à la fois de guide et de frein, et n'a retenu, amplifié, intégré qu'une infime fraction des chances que lui offrait, en nombre astronomique, la roulette de la nature.

Le système répliatif pour sa part, loin de pouvoir éliminer les perturbations microscopiques dont il est inévitablement l'objet, ne sait au contraire que les enregistrer et les offrir, presque toujours vainement, au filtre téléonomique dont les performances sont jugées, en dernier ressort, par la sélection.

* * *

1. Simpson, *The Meaning of Evolution*, Yale University Press (1967).