

L'Evolution, le fonctionnement de l'Evolution, l'apparition des variations, le tri entre les différentes variations, l'apparition d'espèce, les mutations à l'origine des grandes modifications évolutives et la Théorie synthétique de l'évolution

L'Evolution

En biologie, l'évolution décrit les modifications des êtres vivants au cours du temps. Elle explique la diversification de la vie, de ses premières formes à l'ensemble des êtres vivants actuels par une chaîne de modifications buissonnantes. L'historique de ces modifications est détaillé par la phylogénétique, en relation étroite avec la taxinomie.

L'évolution est définie par l'interaction entre les modifications au sein de chaque espèce et l'apparition d'espèces nouvelles (spéciation). Ces deux phénomènes sont accompagnés d'extinctions d'espèces ou de taxons.

Le processus évolutif se base sur la diversité existant au sein de chaque espèce. Tout mécanisme susceptible de modifier les caractéristiques d'une population génération après génération est un moteur potentiel d'évolution. Le plus célèbre est probablement la sélection naturelle, qui a été proposée par Charles Darwin et décrite dans son ouvrage majeur l'Origine des espèces, en 1859. Diverses théories se sont par la suite succédées pour conduire au consensus actuel (théorie synthétique de l'évolution). Celui-ci n'est d'ailleurs pas total, comme en témoignent certaines divergences dont la plus connue est celle ayant opposé Stephen Jay Gould et Richard Dawkins, sur l'intérêt d'introduire la notion d'équilibres ponctués.

De part ses implications sur l'origine de l'humanité, l'évolution a été (et est toujours) au centre de nombreuses controverses philosophiques, politiques et religieuses.

Fonctionnement de l'évolution

Comment apparaissent les variations ?

Les variations intraspécifiques (à l'intérieur d'une même espèce) apparaissent au moment de la reproduction. Elles sont dues à des mutations c'est-à-dire à des erreurs lors de la réplication des gènes. Un phénomène similaire est connu au niveau de la forme générale des chromosomes : ce sont les remaniements chromosomiques. Ces modifications accidentelles (que l'on peut assimiler respectivement à des « fautes de frappe » ou à des « erreurs d'aiguillage ») sont à l'origine d'enfants qui porteront des gènes qu'aucun de leurs parents ne portait.

Ces mutations sont de plusieurs types : il peut s'agir de mutations ponctuelles, de duplications de gènes, de délétions de séquences génétiques ou d'ajouts de nouvelles séquences au hasard. Ces différentes modifications suffisent, avec les remaniements chromosomiques, à expliquer toute la diversité observée dans le patrimoine génétique total présent dans la nature.

Il peut s'y ajouter des mutations par échange de matériel génétique entre espèces, par différents mécanismes naturels :

* les bactéries sont capables d'intégrer et d'utiliser du matériel génétique (des plasmides) échangé entre deux bactéries, voire simplement présent dans le milieu. Le plus souvent cela ne conduit pas immédiatement à la définition d'une nouvelle espèce, mais le phénomène peut y

contribuer et il contribue de façon importante à la sélection naturelle (par exemple, de nombreuses résistances aux antibiotiques se diffusent de cette façon).

* les virus peuvent servir de vecteurs de transfert de matériel génétique d'une espèce vers une autre, même très différente; le plus souvent, l'infection virale conduit à la mort de la cellule victime, mais ce n'est pas nécessairement le cas, et la cellule cible peut participer à la reproduction (notamment pour les plantes). Un des exemples les mieux connus (et les plus utilisés par la recherche) est celui du tabac et des mosaïques.

* les plantes peuvent fusionner, conduisant à de nouvelles espèces (le blé étant un exemple typique).

Finalement, il faut mentionner les symbioses strictes, qui sont des créations de nouvelles espèces à partir d'anciennes, mais sans échange ni fusion du matériel génétique (au moins dans un premier temps). Les lichens et, selon l'hypothèse de l'endosymbiose, les organites dits « autonomes » à l'intérieur des cellules (chloroplastes, mitochondries) relèvent de ce type d'association.

Comment la nature fait-elle le tri entre les différentes variations ?

Les mutations se font toujours au hasard, et sont le plus souvent létales. La plupart du temps, elles perturbent gravement le fonctionnement de l'organisme mutant. Bien sûr, il arrive aussi qu'elles soient neutres (en modifiant un caractère sans pour autant le rendre moins fonctionnel) ou avantageuses; le cas est beaucoup plus rare, mais les mutations portent sur des millions d'individus pendant des dizaines de milliers de générations ou davantage, ce qui assure un facteur multiplicatif de 10^{10} à chacun de ces événements aléatoires. C'est la sélection naturelle, mise en évidence par Darwin, qui se charge de « faire le tri » entre les différentes variations. Il s'agit d'un processus purement mécanique : les mutants défavorisés auront tendance soit à mourir plus jeunes que les autres, soit à trouver plus difficilement un compagnon de reproduction. Dans un cas comme dans l'autre, ils laisseront moins (voire pas du tout) de descendants. Les mutants neutres mourront en moyenne au même âge que les autres, auront globalement autant d'enfants et pourront donc répandre leurs nouveaux caractères dans une population sous l'effet du hasard. Quant aux mutants avantagés, ils seront plus compétitifs et auront donc en moyenne plus de descendants. Une mutation qui permet de mieux échapper à un prédateur, de mieux s'orienter, de mieux séduire le sexe opposé, d'avoir plus de descendants, de mieux résister aux maladies, de mieux tirer profit d'une vie en société aura tendance à faire baisser le taux de mortalité chez les mutants ou à améliorer leur succès reproductif. Génération après génération, la sélection naturelle accumule les mutations positives qui se produisent dans les populations (la dérive génétique, qui se fait au hasard, permet également à quelques mutations neutres de se fixer dans le génome de l'espèce). L'adaptation des populations tend donc progressivement à s'améliorer ; l'émergence d'organes aussi complexes et aussi fonctionnels que l'œil humain ou le radar de la chauve-souris s'expliquent par un tel processus de sélection cumulative. En revanche, l'existence de caractères sans utilité adaptative apparente peut s'expliquer par la fixation au hasard de mutations neutres. L'hypothèse dite de « l'auto-stop », ou « hitch hiking » en anglais, explique la fixation des mutations neutres par la mutation sur le même chromosome de deux gènes, l'une étant neutre et l'autre étant positive qui se transmettront simultanément.

Comment deux espèces se séparent-elles ?

Lorsque deux espèces différentes apparaissent à partir d'une seule et même population, on parle de spéciation. Pour qu'il y ait spéciation, il faut qu'il y ait à un moment donné formation de deux communautés isolées dans la population. La spéciation dite allopatrique est un phénomène concernant deux ou plusieurs populations isolées géographiquement, séparées les unes des autres par des barrières géographiques (océan, montagne...). Un petit isolat peut aussi se former en périphérie de l'aire globale de distribution de l'espèce. Chaque population va

alors pouvoir évoluer indépendamment, d'autant plus rapidement qu'elle est petite (les mutations se fixent plus facilement, pour des raisons mathématiques, dans les petites populations) et ainsi accumuler des remaniements chromosomiques pour finir par former une nouvelle espèce. Il arrive aussi qu'un isolement reproducteur apparaisse au sein d'une population qui ne sera jamais séparée géographiquement : c'est la spéciation sympatrique. Il suffit pour cela que quelques individus changent de période de reproduction ou de signaux pour la parade nuptiale pour que les autres représentants de l'espèce cessent rapidement de s'accoupler avec eux ; il y a alors formation de deux communautés se partageant le même espace, mais s'isolant sur le plan de la reproduction. Les deux populations, en évoluant chacune de leur côté, pourront finir par se transformer en deux espèces complètement différentes. Comme les spéciations sont des phénomènes relativement courts, qui se produisent dans de petites populations isolées, on observe souvent une certaine discontinuité entre les différentes espèces dans les archives fossiles. Une espèce peut rester en stase pendant très longtemps, puis être « assez rapidement » (à l'échelle géologique s'entend) remplacée par une autre.

Quelles mutations sont à l'origine des grandes modifications évolutives ?

Certaines mutations minimales permettent à l'évolution d'agir très rapidement. On connaît des gènes régulateurs, dits gènes homéotiques, qui déterminent les grandes lignes du développement et du plan d'organisation de chaque partie du corps. Lorsque ces gènes (qui régulent eux-mêmes quelques milliers d'autres gènes) mutent, l'individu obtenu est souvent porteur de caractères nettement différents de ceux de ses parents. Certains « sauts évolutifs » s'expliquent par ce type de « macro-mutations » (que Goldschmidt avait découvert en proposant sa théorie du « monstre prometteur »). Par exemple, l'apparition de doigts et la disparition des rayons au bout de la nageoire des poissons crossoptérygiens (c'est-à-dire la formation des premières ébauches de pattes) s'expliquent par un simple décalage de l'activité de deux gènes homéotiques : Hox-a et Hox-b. Cette étape évolutive-là n'a pas nécessité des milliers, ni même des dizaines de mutations différentes : les gènes homéotiques ont permis l'émergence rapide de caractères radicalement nouveaux. Même si les « macro-mutations » donnent le plus souvent des « monstres » incapables de survivre et même si le processus, lent et sûr, de sélection cumulative de milliers de mutations minuscules a apparemment joué un rôle plus important dans l'évolution, il est de fait que certains « monstres prometteurs » ont permis à l'évolution de faire de grands bonds en avant. D'autres mutations modifient la chronologie du développement : on parle d'hétérochronies. Elles peuvent être à l'origine de l'apparition d'une espèce plus juvénile (paedomorphique) ou, au contraire, plus adulte (hypermorphique) que son ancêtre. On connaît plusieurs exemples d'histoires évolutives qui ont fait intervenir les hétérochronies. L'axolotl, une urodèle mexicaine qui passe sa vie entière à l'état larvaire sans jamais se métamorphoser, est paedomorphique par rapport à son ancêtre l'ambystome. Une simple hétérochronie a permis l'apparition d'une espèce complètement différente. De même, il semblerait que l'homme soit paedomorphique par rapport à ses ancêtres simiens, car il garde toute sa vie des caractères juvéniles que le chimpanzé et le gorille perdent. De plus, les phases générales de son développement sont ralenties par rapport à celles des grands singes. L'apparition de nouveaux gènes s'explique principalement par la duplication de gènes préexistants. On connaît plusieurs « familles de gènes » dont les différents membres sont apparemment issus de plusieurs duplications d'un même gène ancestral. Par la suite, chacun des exemplaires « dupliqués » a pu muter et évoluer indépendamment des autres. Plusieurs familles multigéniques sont de toute évidence apparues grâce à ce processus. De même, des duplications de l'ensemble du génome (polyploïdisations) ont également pu jouer. Par exemple, on estime que deux épisodes de polyploïdisations se sont produits depuis la séparation des deutérostomiens (soient essentiellement les échinodermes et les chordés dont les vertébrés) et des protostomiens (les invertébrés) sur la branche des vertébrés. On retrouve ainsi que beaucoup de gènes, comme HedgeHog impliqué dans le développement des polarités chez la

drosophile, existent en trois ou quatre exemplaires chez les vertébrés (Desert HedgeHog, Indian HedgeHog et Sonic HedgeHog) pour des fonctions similaires.

L'évolution tend elle vers un accroissement de la complexité ?

Il n'existe pas de consensus sur la définition même de complexité. Elle est souvent estimée par le nombre de types cellulaires identifiables chez un organisme, mais cette estimation n'est pas, ou peu, corrélée à la taille du génome ou au nombre de gènes (complexité du génome) et ne saurait en aucun cas être une mesure indiscutable. L'accroissement de la complexité est un phénomène marginal et plutôt exceptionnel dans l'évolution. La plupart des espèces sont encore au stade unicellulaire (plus de 99 % des êtres vivants sont des bactéries), seules quelques rares lignées ont évolué vers une complexification. Dans certains cas, cependant, la sélection naturelle a pu favoriser les organismes les plus complexes. Chez les mammifères, on observe une tendance à l'accroissement de la taille du cerveau ; on l'explique généralement par une « course aux armements » entre proies et prédateurs. Dans les deux cas, un système nerveux central plus performant peut sauver la vie de l'animal. De même, des « fédérations de cellules », ébauches d'organismes pluricellulaires, ont pu dans certaines circonstances être plus efficaces que les bactéries isolées pour leur permettre de survivre. Cependant, il est plausible que l'accroissement de la complexité ait pu, dans certains cas, correspondre à un caractère neutre et être fixé par la dérive génétique.

Une image donnée par Richard Dawkins

Pour se trouver mille ancêtres différents, il faut remonter en arrière d'une dizaine de générations, ce qui représente quelques siècles. Or, avant le XIXe siècle, la moitié au moins des enfants mouraient en bas âge : on peut donc se demander combien de nos mille derniers ancêtres sont morts en bas âge, et la réponse n'est pas « au moins la moitié », mais bien entendu zéro, par définition. Nous ne sommes donc nullement représentatifs de l'humanité passée, car descendants d'une longue lignée de gens qui ont tous eu la chance d'amener une progéniture à l'âge de la procréation (c'est-à-dire survivre et trouver un partenaire, entre autres). Une génération peut avoir de la chance. Quand une dizaine en a coup sur coup, on peut supposer que cette « chance » correspond en fait à un ensemble de facteurs favorables qui se retrouvent de l'une à l'autre (facteurs qui ne sont pas tous génétiques : ils peuvent être culturels, religieux, économiques, etc.) Cette considération à elle seule montre que même à notre échelle, nous avons participé un tout petit peu, sur les quelques derniers siècles, à l'évolution. D'ailleurs notre simple choix d'un conjoint se révèle, comme le montre le biologiste Geoffrey Miller (*The Mating Mind*) obéir à des choix pas toujours conscients qu'on peut rapprocher de l'eugénisme.

Richard Dawkins pousse plus avant ses spéculations en considérant l'être vivant comme un conteneur à gènes (ce serait en tout cas le point de vue des gènes, s'ils en avaient un!). Pour lui les produits des gènes - cellules, tissus, organes, organismes, sociétés - servent aux gènes à se répliquer et à survivre. En quelque sorte, à la question : « De l'œuf ou la poule, qui est le premier ? », il répond : « La poule est le moyen trouvé par l'œuf pour faire d'autres œufs. ». Ce renversement de perspective considère l'être vivant comme la marionnette (Dawkins utilise le terme de véhicule-robot) de ses gènes.

Tout en la reconnaissant ingénieuse, Stephen Jay Gould a mis en garde contre une prise trop à la lettre de cette vision. Les gènes ne possèdent ni intention, ni projet au sens que nous donnons à ces termes. Dawkins a utilisé le terme qu'en tant que métaphore parlante, mais ses lecteurs n'ont pas toujours saisi la nuance.

En outre, il convient de se rappeler que les facteurs de survie ne sont pas seulement génétiques, ce qui est bien évident chez l'homme, mais ce qui est aussi le cas chez de

nombreux animaux (par exemple, le chant des oiseaux, essentiel dans leur reproduction, dépend d'un apprentissage).

Une histoire imaginée par Richard Dawkins

Cette histoire amusante n'a d'autre but que de bien fixer un point important de la théorie darwinienne.

Deux brontosaures voient un T-Rex avancer dans leur direction et se mettent à courir aussi vite qu'ils le peuvent. Puis l'un des deux dit à l'autre : « Pourquoi nous fatiguons-nous au juste ? Nous n'avons de toute façon pas la moindre chance d'arriver à courir plus vite qu'un T-Rex ! »

Et l'autre lui répond cyniquement :

« Je ne cherche pas à courir plus vite que le T-Rex. Je cherche juste à courir plus vite que toi ! »

L'idée est de rappeler que le processus concerne moins une compétition entre espèces, qu'une compétition à l'intérieur de chaque espèce.

Théorie synthétique de l'évolution

La plupart des biologistes admettent aujourd'hui l'explication de l'évolution par la théorie synthétique (qui regroupe des données de plusieurs théories). Elle est basée en particulier sur la génétique des populations. Aujourd'hui, l'évolution n'est plus envisagée comme la transformation d'individus isolés mais comme celle de groupements d'individus de même espèce, c'est-à-dire des populations. Mais le principe de base est le même : elle explique l'évolution par l'action de la sélection naturelle sur des populations.

Une population évolue quand la fréquence d'un gène (ou plusieurs gènes) s'y modifie. On voit ainsi se répandre dans certaines espèces des caractères ayant acquis, en raison de changements du milieu, une valeur adaptative qu'ils ne possédaient pas auparavant ; les individus porteurs de ces caractères sont particulièrement favorisés dans le nouveau milieu, auquel ils se trouvaient en quelques sortes "préadaptés" ; ils constituent alors rapidement une grande partie de la population ou même toute la population de l'espèce. Les caractères qui se répandent alors correspondent à des allèles existant auparavant "silencieusement" au sein de l'espèce.

Lorsque l'ensemble des individus qui constituent une espèce forme plusieurs populations isolées, chacune de ces populations peut acquérir des caractères particuliers et donner naissance à des variétés différentes au sein de la même espèce. Si ces variations sont, par la suite, dans l'impossibilité de se croiser, elles divergent de plus en plus et finalement sont interstériles : elles constituent alors des espèces distinctes.

La "barrière" qui sépare les variétés d'une même espèce peut être de nature variée.

Fossiles et paléontologie

La paléontologie, littéralement, de la science étudiant la vie ancienne, et plus précisément, de la discipline qui étudie les organismes disparus ayant laissé dans les terrains sédimentaires des traces de leur corps ou de leurs activités. Ces traces sont appelées fossiles. La paléontologie est un "outil" au service d'une meilleure compréhension de l'Evolution.