Héritage ou convergence ? Les chemins sinueux de l'évolution des espèces

Auteurs :
MAZEL Florent, Post-doctorant, Université Simon Fraser, Vancouver, Canada
LAVERGNE Sébastien, Chargé de recherche CNRS, Laboratoire d'Ecologie alpine, Université Grenoble Alpes
DOUZET Rolland, Station Alpine Joseph Fourier, Université Grenoble Alpes
THUILLER Wilfried, Directeur de recherche au CNRS, Laboratoire d'Ecologie alpine, Université Grenoble Alpes

02-02-2019

Comment expliquer que certaines espèces se ressemblent plus que d'autres ? Les espèces sont le produit de leur histoire : l'évolution. Elles représentent les feuilles de l'arbre de la vie, qui émerge d'un tronc principal symbolisant leur ancêtre commun à toutes. Deux espèces proches dans cet arbre se sont donc séparées l'une de l'autre il y a fort peu de temps –elles ont un ancêtre commun récent – et souvent se ressemblent. Deux espèces éloignées dans l'arbre sont donc généralement très différentes car elles ont suivi des branches évolutives indépendantes. Certaines paires d'espèces éloignées historiquement mais très ressemblantes morphologiquement constituent toutefois des contre-exemples. En fait, ces ressemblances intrigantes sont le produit de l'adaptation répétée des espèces aux mêmes conditions environnementales. Ces convergences évolutives sont des éléments majeurs permettant d'affirmer que l'adaptation est une force fondamentale de l'évolution du vivant.

Une caractéristique remarquable du monde vivant est la très grande diversité de formes qu'il prend. On regroupe souvent les individus en espèces, ce qui permet de décrire de façon commode cette biodiversité. On observe ainsi sur les clichés de la figure 1 une certaine diversité de formes d'espèces au sein des mammifères. Mais certaines espèces se ressemblent plus que d'autres. Ainsi, l'ours polaire ressemble beaucoup plus à l'ours brun qu'au gorille.

1. Les cousins germains se ressemblent plus que les cousins éloignés

Les espèces ont longtemps été décrites d'un point de vue fixiste, c'est-à-dire comme des entités immuables, des "essences" qui étaient a priori pensées par le divin (lire Qu'est-ce que la biodiversité ?). À la fin du XVIII^{e} et au début du XIX^{e} siècle, des

scientifiques comme Lamarck (1744-1829), Wallace (1823-1913) ou encore Darwin (1809-1882, lire focus Darwin) ont pourtant révolutionné cette vision traditionnelle de la biodiversité en prouvant que les espèces vivantes évoluaient depuis leur origine (Lire Lamarck et Darwin: deux visions divergentes du monde vivant) et qu'elles descendaient donc toutes d'un seul et unique ancêtre commun. En quoi cette découverte nous permet-elle de mieux comprendre les ressemblances entre les espèces ?

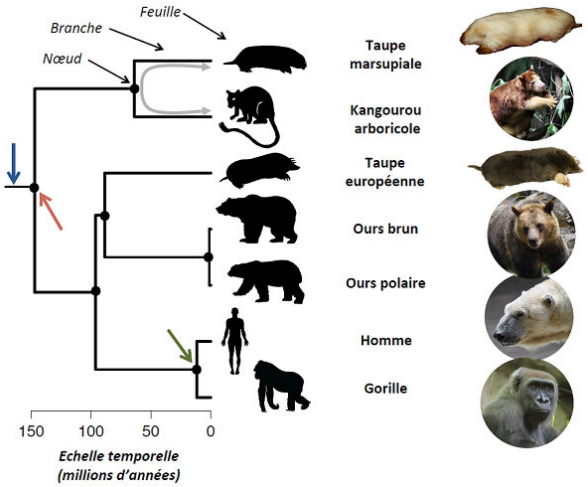

Figure 1. Un exemple d'arbre phylogénétique. Sept espèces de mammifères (sur les presque 5000 espèces existantes) représentent les feuilles de l'arbre phylogénétique qui décrit leurs relations de parenté. L'échelle horizontale est donnée en millions d'années. La flèche bleue indique la racine de l'arbre, la flèche rouge son premier nœud, qui constitue aussi l'ancêtre commun à toutes les espèces de l'arbre (147 millions d'années). La flèche verte indique l'ancêtre commun au gorille et à l'homme, dont on suppose qu'il a vécu il y a 11,5 millions d'années. La double flèche grise représente la distance phylogénétique entre un kangourou arboricole et une taupe marsupiale (deux fois l'âge de l'ancêtre commun soit 2 x 63 = 126 millions d'années). L'arbre phylogénétique est tiré de l'étude de Bininda-Edmonds et al. [2]. [Sources : F. Mazel sauf taupe européenne (Didier Descouens, Wikipedia) et taupe marsupiale (Michael J. Barritt)].

L'évolution des espèces peut ainsi se représenter sous forme d'un arbre phylogénétique (Figure 1) qui reconstitue "le cours historique de la descendance des êtres organisés" [1]. Il décrit ainsi les **relations de parentés** entre les espèces. Chaque branche de l'arbre porte des **feuilles**, les espèces actuelles. Chacun des **nœuds** de l'arbre représente l'ancêtre commun des espèces situées au-dessus. Cet arbre est ajusté sur une échelle temporelle -souvent en million d'années- et le temps s'écoule de la racine (de gauche à droite à partir de la flèche bleue sur la figure 1) [2]. La racine représente une espèce ancêtre, commune à toutes les feuilles de l'arbre. Dans l'exemple de la figure 1, elle se scinde en deux branches filles (flèche rouge) aux alentours de 147 millions d'années [3], qui elles-mêmes bifurquent à plusieurs reprises avant d'arriver jusqu'aux espèces actuelles, les feuilles. Le gorille et l'homme y représentent deux feuilles proches, c'est à dire ayant un ancêtre commun (flèche verte) relativement récent par rapport à celui entre l'homme et, par exemple, l'ours polaire. Si les espèces évoluent aléatoirement (hypothèse 1) à taux constant au cours du temps, elles vont donc être d'autant moins ressemblantes qu'elles se sont séparées il y a longtemps. Par exemple, l'homme et le gorille n'ont pu accumuler de différences que depuis 11,5 millions d'années alors que l'homme et l'ours polaire se différencient depuis 91 millions années, ce qui permet de rendre compte de la grande similarité entre le gorille et l'homme, relativement à l'ours polaire. Les distances phylogénétiques entre espèces (flèche grise) permettent donc de se faire une bonne idée de la ressemblance morphologique attendue entre deux espèces : plus deux espèces sont phylogénétiquement proches, plus elles vont avoir tendance à se ressembler.

2. Quelques contre-exemples…

Pourtant, il existe des contre-exemples : des espèces éloignées évolutivement peuvent se ressembler de façon frappante, comme c'est le cas entre certains grands groupes d'animaux marins, de plantes ou de mammifères.

2.1. Les animaux marins

Les poissons à nageoires rayonnées (par exemple le thon) [4] et les cétacés (mammifères marins dont font partie les baleines et les dauphins) se sont séparés il y a environ 430 millions d'années [5]. Pourtant, ne partagent-ils pas une allure générale semblable ? À ce sujet, Darwin [6] notait déjà que :

> *« Des animaux appartenant à deux lignées d'ancêtres très distincts peuvent, en effet, s'être adaptés à des conditions semblables, et avoir ainsi acquis une grande ressemblance extérieure ; mais ces ressemblances, loin de révéler leurs relations de parentés tendent plutôt à les dissimuler. […] Ainsi, la forme du corps et les membres en forme de nageoires […] constituent dans les deux classes une adaptation spéciale en vue d'un mode de locomotion aquatique »*

Darwin suggère ici que les deux groupes ont, au cours de l'évolution, développé une forme hydrodynamique et des nageoires ce

qui leur permet de se déplacer efficacement dans l'eau.

2.2. Les mammifères souterrains

Des animaux ressemblant à des taupes (Figure 1) existent parmi les mammifères dans des régions différentes du globe. Ainsi, la taupe européenne est présente dans une partie de l'Eurasie alors que la taupe marsupiale est présente en Australie. Ces espèces présentent une forme fouisseuse similaire, adaptée à la vie souterraine (Figure 1). Elles possèdent en effet toutes un corps trapu en forme de "saucisse" -sans cou distinguable- équipé de puissants membres antérieurs dotés de larges griffes permettant de creuser efficacement. Elles ont toutes plus ou moins perdu les organes sensoriels extérieurs (oreille externe, vue). La ressemblance entre ces « taupes » ne provient pas d'un héritage commun, c'est-à-dire d'un ancêtre commun ayant lui-même une forme de taupe. En effet, la taupe marsupiale est phylogénétiquement plus proche d'un kangourou que d'une taupe européenne (Figure 1) qui, elle, est plus proche de l'homme que de la taupe marsupiale. Ainsi, la forme de « taupe » est apparue à plusieurs reprises dans des branches éloignées de l'arbre phylogénétique des mammifères.

2.3. Les plantes en coussin

Figure 2. Les plantes en coussins. La figure présente quatre espèces en coussins : Androsace helvetica (A), Saxifraga marginata (B), Silene acaulis (C) et Benthamiella patagonica (D). Ces espèces appartiennent, respectivement, aux familles des Primulacées, Saxigragacées, Caryophylacées et Solanacées (présentes surtout en Amérique). [Sources : Station Alpine Joseph Fourier (SAJF)]

Les plantes en coussin sont des végétaux formant des dômes arrondis plus ou moins compacts (Figure 2, [7]). Cette morphologie très particulière est permise par la présence d'entre-nœuds (tige entre deux feuilles successives) très resserrés et de petites feuilles. En France, on retrouve ces organismes sur les hautes montagnes au climat rude, froid et venteux. En fait, la structure très compacte de la plante protège les racines et les tiges des variations abruptes de températures, mais aussi du froid et du vent, permettant ainsi à la plante de survivre dans des conditions extrêmes. L'évolution des plantes vers des formes en coussins s'est faite à de nombreuses reprises au cours de l'histoire, puisqu'une fois encore on retrouve des plantes en coussins dans des familles très différentes et dans toutes les régions du monde où sévit un climat arctique ou alpin (figure 2).

2.4. Les plantes « cactoïdes »

Figure 3. Les plantes cactoïdes. La figure présente trois groupes comportant des espèces en forme de cactus : (1) la famille des Cactacées: vue générale et vue de détail (Fig. 3A et 3B , Demnoza rhodacantha, Patagonie [source R. Douzet, SAJF]) ; (2) la famille des Euphorbiacées : vue générale et vue de détail (Fig. 3C et 3D,Euphorbia officinarum, Maroc [source Jean Paul Pelletier, www.teline.fr]) et (3) les Stapélias : vue générale et vue de détail (Fig. 3E & 3F, Apteranthes joannis, Maroc [source : Sébastien Sant et Jean Paul Pelletier, www.teline.fr].

Les plantes cactoïdes, c'est-à-dire en forme de cactus, sont des végétaux à l'allure caractéristique (Figure 3) qui vivent dans les régions arides. Elles possèdent parfois des feuilles transformées en épines qui leur permettent de limiter les pertes d'eau et de se protéger face aux herbivores. Par ailleurs, elles renferment toutes des tissus permettant de faire des réserves d'eau. Dans les déserts américains, ce sont les cactus qui prennent cette forme particulière alors que des espèces d'euphorbes et stapélias les

remplacent en Afrique (Figure 3). Ces trois groupes de plantes appartiennent à des lignées évolutives indépendantes et n'ont donc pas hérité de leur forme si particulière, mais l'ont bien acquis, indépendamment, au cours de l'évolution.

2.5. Les plantes carnivores

Figure 4. Les plantes carnivores. La figure présente trois espèces de plantes carnivores : Drosophyllum lusitanicum (A, B), Drosera capensis (C), et Heliamphora chimantensis (D). Ces espèces appartiennent, respectivement, aux familles des Droséracées, des Drosophyllacées et des Sarracéniacées. [Sources : via Wikipedia Commons, Carsten Niehaus, Noah Elhardt et Andreas Eils, respectivement].

Les plantes carnivores sont des végétaux ayant la capacité d'attirer et de capturer des petits animaux comme les insectes (Figure 4). En France, on le retrouve dans des milieux souvent pauvres en azote, comme les **tourbières** (lire Tourbières et marais, des zones humides remarquables). En digérant ces animaux capturés, les plantes carnivores ont trouvé une solution pour récupérer de grandes quantités d'azote et donc pallier au déficit d'azote disponible dans le sol. On retrouve ces plantes dans des familles éloignées phylogénétiquement, ce qui semble indiquer que la carnivorie a été acquise à plusieurs reprises et de façon indépendante dans l'évolution des plantes. Alors que la convergence évolutive de la fonction -récupérer de l'azote des animaux- est évidente entre ces espèces, les structures élaborées pour y parvenir sont plus variables. Les insectes peuvent par exemple être immobilisés dans une substance adhésive, qui est apparue plusieurs fois au cours de l'évolution (Figures 4A et 4B) ou piégés dans une urne (Figure 4C). Dans ce dernier cas, les végétaux ont développé une structure différente pour capturer les animaux, illustrant ainsi le fameux « bricolage de l'évolution» : pour arriver à une même fonction, plusieurs structures sont possibles.

3. Quand la sélection naturelle « brouille les pistes »

Ainsi, bien que certaines espèces puissent être très éloignées phylogénétiquement, elles peuvent avoir **convergé** vers une morphologie similaire, pour s'adapter à des contraintes environnementales similaires. L'hypothèse d'une évolution aléatoire ayant eu lieu précédemment (hypothèse 1) ne semble donc pouvoir expliquer ces phénomènes d'adaptation du vivant à son environnement. Une contribution majeure de Darwin (1859) a justement été de proposer le mécanisme permettant l'adaptation des espèces : **la sélection naturelle**.

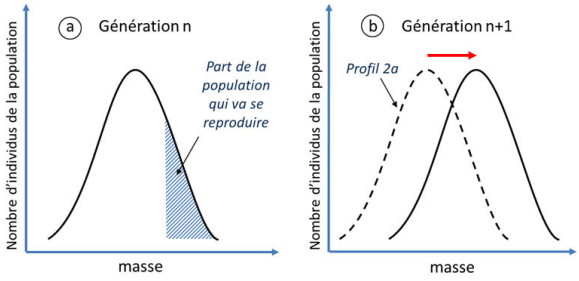

Figure 5. Illustration du processus de sélection naturelle. Une espèce donnée présente une certaine variabilité (de masse comme dans cet exemple) à une génération n (encadré a)partie seulement des individus va se reproduire (partie hachurée de l'encadré 2a), car leur masse le leur permet (meilleure survie et/ou fécondité). La masse est un caractère au moins partiellement héréditaire donc la génération suivante voit sa masse moyenne augmenter.

Dans la théorie de Darwin, la sélection naturelle requiert quatre ingrédients :

La première condition nécessaire est l'existence d'une certaine diversité de formes à l'intérieur même d'une espèce, par exemple

des individus de plantes en coussin plus ou moins compacts (figure 5A). C'est justement cette diversité qui était ignorée des fixistes, pour qui elle ne représentait que des « erreurs de copies » de l'essence divine de l'espèce. Cependant, cette diversité est bel et bien réelle : il suffit de regarder la diversité au sein de l'espèce humaine.

La seconde condition est une reproduction limitée des individus. Imaginez simplement que chaque individu d'une espèce donne deux descendants à chaque génération. Si l'on part d'un seul individu, au bout de vingt générations, la population aura atteint la taille de 2^{20} individus, soit plus d'un million et au bout de cent générations, plusieurs milliards de milliards… ce qui est a priori impossible sur une planète aux ressources importantes, mais limitées. Ainsi, seul un nombre limité d'individus de l'espèce vont contribuer à la génération suivante.

La troisième condition stipule que le cortège d'individus qui appartiennent au lot qui se reproduit possède des caractéristiques particulières qui leur ont permis de mieux survivre dans un milieu aux contraintes données et donc de davantage se reproduire. Par exemple, dans un environnement de plus en plus rude, on peut imaginer que seuls les individus de plantes en coussins les plus compacts survivent assez longtemps pour se reproduire (Figure 5A).

Si ces caractéristiques sont héritables, alors elles vont petit à petit se répandre dans la population et l'espèce va progressivement évoluer, au fil des générations (Figure 5B).

La première condition nécessaire est l'existence d'une certaine diversité de formes à l'intérieur même d'une espèce, par exemple des individus de plantes en coussin plus ou moins compacts (figure 5A). C'est justement cette diversité qui était ignorée des fixistes, pour qui elle ne représentait que des « erreurs de copies » de l'essence divine de l'espèce. Cependant, cette diversité est bel et bien réelle : il suffit de regarder la diversité au sein de l'espèce humaine.

La seconde condition est une reproduction limitée des individus. Imaginez simplement que chaque individu d'une espèce donne deux descendants à chaque génération. Si l'on part d'un seul individu, au bout de vingt générations, la population aura atteint la taille de 2^{20} individus, soit plus d'un million et au bout de cent générations, plusieurs milliards de milliards… ce qui est a priori impossible sur une planète aux ressources importantes, mais limitées. Ainsi, seul un nombre limité d'individus de l'espèce vont contribuer à la génération suivante.

La troisième condition stipule que le cortège d'individus qui appartiennent au lot qui se reproduit possède des caractéristiques particulières qui leur ont permis de mieux survivre dans un milieu aux contraintes données et donc de davantage se reproduire. Par exemple, dans un environnement de plus en plus rude, on peut imaginer que seuls les individus de plantes en coussins les plus compacts survivent assez longtemps pour se reproduire (Figure 5A).

Si ces caractéristiques sont héritables, alors elles vont petit à petit se répandre dans la population et l'espèce va progressivement évoluer, au fil des générations (Figure 5B).

Darwin fournit ici une théorie permettant d'expliquer l'adaptation des espèces à leur environnement. Ainsi, si deux branches

éloignées de l'arbre subissent les mêmes contraintes de l'environnement –comme un déficit en azote ou un climat rude- elles pourront conduire à des espèces morphologiquement proches, mais phylogénétiquement éloignées : plantes carnivores et plantes en coussins, respectivement. En définitive, les espèces sont des mosaïques de caractères qui ont pu prendre des chemins évolutifs différents. Par exemple, toutes les plantes en coussins présentent la même forme générale, mais possèdent des morphologies florales bien distinctes, caractéristiques de leur famille (Figure 3). Les cétacés possèdent des poumons -hérités d'un lointain ancêtre vertébré- emballés dans une morphologie hydrodynamique qui elle n'est pas héritée, mais bien convergente.

4. Synthèse

Les ressemblances entre espèces peuvent donc être le fruit d'un héritage historique ou d'une convergence évolutive. Pour être capable de distinguer entre les deux hypothèses, il faut donc disposer d'une phylogénie des espèces et de mesure de leurs caractéristiques morphologiques, anatomiques ou physiologiques. Historiquement, les arbres phylogénétiques étaient construits à partir des données morphologiques ou anatomiques, ce qui pouvait poser problème si l'on se servait de caractères convergents pour les construire. Dans ce cas, on risquait en effet de regrouper des espèces qui ont en fait convergé et dont les ressemblances ne sont pas héritées. Les dernières décennies ont vu l'avènement du séquençage de la molécule d'ADN et de son utilisation en phylogénie. Les ressemblances moléculaires sont beaucoup moins sujettes à ces convergences évolutives, et si elles sont correctement utilisées elles sont donc un outil de choix pour reconstruire les relations de parenté entre espèces. Ainsi, c'est bien la comparaison entre les classifications taxonomiques plus classiques basées sur la morphologie et les classifications phylogénétiques issues des données moléculaires qui vont permettre de mettre en lumière les convergences évolutives. C'est, en quelque sorte, une synergie entre les anciennes et les nouvelles approches en évolution.

Références et notes

Photo de couverture : Photo de groupe de dauphins prise à Xcaret, Mexique © Truncatus [domaine public] via Wikimedia Commons

[1] Darlu P. & Tassy P. (1993) *Reconstruction phylogénétique. Concepts et Méthodes.* Coll. "Biologie théorique", no 7. Masson, Paris. (Livre en ligne sur le site de la *Société Française de Systématique* : http://sfs.snv.jussieu.fr/index.php/la-reconstruction-phylogenetique-concepts-et-methodes/).

[2] Bininda-Emonds O.R., Cardillo M., Jones K.E., MacPhee R.D., Beck R.M., Grenyer R., Price S.A., Vos R.A., Gittleman J.L. & Purvis A. (2007) *The delayed rise of present-day mammals.* Nature, 446, 507-512.

[3] Les dates mentionnées dans cet article proviennent de l'étude de Bininda-Edmonds et al. (référence 2). Ces dates sont spéculatives et reflètent l'état des connaissances actuelles en phylogénie des mammifères, elles sont donc amenées à être modifiée au gré des nouvelles découvertes.

[4] Les « poissons » regroupent les poissons cartilagineux (requins et raies), les poissons à nageoires rayonnées (par exemple la truite ou le thon), les myxines, les lamproies et les dipneustes. Ceux-ci ne forment plus un groupe utilisé en systématique (mais –à juste titre- encore en cuisine), car l'ancêtre commun des « poissons » ne leur est pas exclusif. Par exemple, l'ancêtre commun à la truite et au requin est aussi l'ancêtre commun de l'homme. Les « poissons » ne représentent donc pas une lignée évolutive propre, mais bien une concaténation de plusieurs groupes distincts.

[5] http://www.timetree.org. Ces dates sont spéculatives et reflètent l'état des connaissances actuelles en phylogénie, elles sont donc amenées à être modifiée au gré des nouvelles découvertes.

[6] Darwin C. (1859) *On the origins of species by means of natural selection.* London: Murray, 247.

[7] voir aussi www.cushionplants.eu

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteurs :** MAZEL Florent - LAVERGNE Sébastien - DOUZET Rolland - THUILLER Wilfried (2019), Héritage ou convergence ? Les chemins sinueux de l'évolution des espèces, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN

2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=1997

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.