

Les mécanismes de l'évolution

Primaire et collège

Résumé

La question de l'origine de la diversité des êtres vivants a longtemps trouvé sa réponse dans les récits « originels » des religions, hors du champ scientifique. C'est seulement avec Charles Darwin, au XIX^e siècle, qu'elle est abordée par la science. Quels sont les mécanismes de l'évolution ?

les mécanismes de l'évolution

Sarah Samadi

Qu'est-ce que l'« évolution » ?

La question de l'origine de la diversité des êtres vivants a longtemps trouvé sa réponse dans les récits « originels » des religions, hors du champ scientifique. C'est seulement avec Charles Darwin au XIX^e siècle qu'elle est abordée par la science. En effet, Darwin cherche à expliquer par des causes matérielles des faits observables. Parmi ces faits, outre la diversité des organismes actuels, il faut expliquer les restes d'organismes vivants trouvés à l'état fossile dans des sédiments et qui diffèrent des formes actuelles. La façon dont se forment les sédiments au cours du temps (les plus anciens au-dessous et les plus récents au-dessus) permet d'agencer ces fossiles dans des séries temporelles qui montrent que les formes du vivant ont changé au cours du temps et que l'on peut établir une « généalogie » de ces transformations. C'est à ce récit historique des transformations et à l'hypothèse d'un lien organique entre les différentes formes que renvoie le terme « évolution ». Dans ce contexte, le principal apport de Darwin est la recherche des mécanismes expliquant le déroulement de ce « film ». Ce sont ces mécanismes, que l'on regroupe sous la bannière de la « théorie de l'évolution », qui font l'objet de ce chapitre.

Les êtres vivants, objets de la théorie de l'évolution

Pour bien comprendre ces mécanismes, il est utile de bien définir les objets auxquels ils s'appliquent, en l'occurrence tous les objets que l'on considère comme vivants. Il faut donc pour définir le domaine de la théorie de l'évolution déterminer quels sont les objets matériels qui sont vivants et donc se poser la question suivante : comment décide-t-on qu'un objet matériel est – ou non – vivant ?

D'un point de vue purement matériel, on peut caractériser les êtres vivants par les atomes et molécules qui les constituent et les réactions chimiques qui y sont associées. Sur Terre, tous les organismes que l'on considère comme vivants sont composés majoritairement d'atomes de carbone, d'azote, d'oxygène et d'hydrogène et sont le siège de réactions chimiques caractéristiques des molécules composées de ces atomes (chimie dite « organique »). Mais cette caractérisation n'est pas suffisante, car les objets « organiques » ne sont pas tous vivants. En effet, dans certaines conditions physico-chimiques (température, pression, présence de rayonnements UV, etc.), un mélange inerte d'eau (atomes d'oxygène et d'hydrogène), d'air (azote et oxygène

principalement) et d'oxyde de carbone (oxygène et carbone) peut permettre des réactions chimiques conduisant à la synthèse de molécules organiques qui ne sont pas vivantes et qui ne sont pas non plus produites par des organismes vivants. Une autre façon de caractériser les organismes vivants plus précisément, mais toujours d'un point de vue matériel, renvoie à l'agencement complexe des molécules organiques qui les constituent. Dans cet agencement, les atomes et molécules sont en perpétuel renouvellement. Les organismes vivants sont comme le bateau de Thésée qui reste lui-même bien que toutes ses planches aient été changées l'une après l'autre.

Pourtant, intuitivement, la définition des êtres vivants ne relève pas de cette caractérisation matérielle. Les organismes vivants sont communément définis comme des objets qui naissent, grandissent, se reproduisent et enfin meurent, c'est-à-dire comme des objets qui existent pendant un certain laps de temps et qui sont capables, à partir de fragments d'eux-mêmes, de donner naissance à de nouveaux objets qui leur ressemblent. Cette définition, qui n'indique rien sur la nature matérielle des objets vivants, est cependant la plus universelle. Si, à l'occasion d'un voyage intersidéral sur une planète lambda, nous croisons un objet inconnu, ce n'est pas son analyse chimique qui nous permettrait de décider s'il est ou non vivant. En effet, on peut imaginer que cette chimie des êtres vivants sur Terre n'est que la conséquence des conditions chimiques qui prévalaient sur notre planète au moment où la vie est apparue comme on peut imaginer, même si nous n'en avons aucune preuve directe, que sous d'autres conditions ailleurs dans l'Univers, des organismes vivants – c'est-à-dire des objets

matériels à durée de vie limitée et capables de reproduction – soient apparus avec une chimie différente.

La diversité du vivant

Tous les êtres vivants peuvent être définis comme nous venons de le faire. Sous cette définition commune, nous réunissons une multitude d'objets comme, par exemple, une bactérie, une baleine, une orchidée ou un chat. Tous les êtres vivants ne sont donc pas identiques les uns aux autres, ils sont *diversifiés*. En outre, les mots « bactérie », « baleine », « orchidée » ou « chat » ne désignent pas chacun un seul organisme mais bien un ensemble d'organismes. Quelle est la signification de ces ensembles d'organismes ? Comment reconnaît-on qu'un chat est un chat ?

Cette question est abordée de façon intéressante dans le livre *Petit Prince Pouf* d'Agnès Desarthe et Claude Ponti. La troisième leçon du professeur Ku a en effet pour objet d'apprendre au prince Pouf qu'un chat est un chat. Pour cela, le professeur demande à son élève de décrire un chat. Le prince Pouf répond : « Un chat a des oreilles pointues, un petit nez rose, quatre pattes, une longue queue, des moustaches, des poils et... et... » Le professeur Ku aide son élève en ajoutant qu'un chat mange des souris et fait « miaou ». Il réinterroge alors son élève : « Que dirais-tu d'un animal qui aurait des oreilles pointues, un petit nez rose, quatre pattes, une longue queue, qui mangerait des souris, mais qui ne ferait pas miaou ? » Le prince Pouf répond : « Je dirais que c'est un chat. » Ensuite, le professeur lui demande ce que serait cet animal si, en plus de ne pas faire « miaou », il ne mangeait pas de souris. Le prince Pouf attribue l'animal ainsi

décrit à la catégorie « chat ». Le professeur dessine alors un chien et dit : « Si je te dis que cet animal fait miaou, que me réponds-tu ? » Le prince Pouf trouve que cet animal est un chien, certes bizarre, mais un chien quand même. Le professeur rétorque alors : « Et pourquoi cela ? » ; ce à quoi le prince répond : « Parce qu'un chat est un chat. »

Cette petite histoire nous apprend deux choses. Pour parler des organismes vivants et les catégoriser, nous avons besoin de les décrire par des attributs. Ces attributs peuvent être des caractéristiques physiques mais aussi comportementales ou écologiques. L'autre enseignement de cette histoire est que, bien que l'on puisse catégoriser les êtres vivants grâce à leurs attributs (ce qui nous permet de distinguer les chats des chiens), ces attributs peuvent varier. La démonstration du professeur Ku montre que, malgré la variabilité des attributs, un chat est un chat. Cependant, il n'apporte pas de réponse à la question posée par les enfants lors de la lecture : « Oui, mais... pourquoi ? »

En d'autres termes, pourquoi un chat est-il un chat au-delà des variations possibles des attributs qui me permettent de reconnaître un chat ? Quand je vois un chat ou un chien, aussi bizarres soient-ils, ce qui me permettrait en cas de doute de trancher serait de connaître ses parents. Autre possibilité, regarder avec quels autres organismes cet animal bizarre est capable de se reproduire. Bref, ce qui nous permet *in fine* de distinguer un chat d'un chien, c'est que les chats ne font pas des chiens et réciproquement.

Prenons maintenant un ensemble d'objets vivants que l'on range dans une même catégorie, comme les êtres humains. Nous pouvons reconnaître chacun d'entre

eux en le décrivant ; par exemple, Philémon a les yeux verts, il est bossu, il a trois grains de beauté sous l'oreille gauche et il aime particulièrement la soupe aux betteraves. On peut aussi, comme le fait par exemple la police scientifique, le caractériser par une empreinte génétique. Cette empreinte permet de reconnaître sans ambiguïté un individu mais aussi de retrouver ses parents biologiques (recherche en paternité). Cependant, au-delà de ces caractéristiques, aussi précises soient-elles, la façon dont nous pouvons caractériser chaque individu de façon unique est son état civil. En effet, cet état civil précise quand et où chacun est né, qui étaient ses parents, s'il a eu des enfants et avec qui, et enfin quand il est mort. Cet enchaînement d'événements que l'on note dans les registres d'état civil caractérise chaque individu de façon univoque et c'est d'ailleurs la raison d'être de ces enregistrements dans les sociétés où ils existent. Cette histoire individuelle permet de placer chaque humain dans une histoire généalogique et d'établir des liens de cousinage plus ou moins lointain entre eux. Chaque nouveau point dans cette généalogie résulte de la rencontre des gamètes (cellules reproductrices correspondant à de petites fractions matérielles d'un individu) d'un père et d'une mère qui ont permis la naissance de ce nouvel individu. Le lien généalogique entre organismes n'est donc pas un lien symbolique mais bien une relation matérielle entre ces organismes. Si l'on disposait des registres d'état civil des chiens et des chats, on pourrait constater qu'actuellement, ces deux registres ne se recoupent jamais. Nous ne disposons bien évidemment pas de tels registres, mais par l'observation nous savons que les chats et les chiens ne se croisent pas. Ce sont ces

ensembles que les scientifiques appellent des **ESPÈCES** et qu'ils décomptent pour évaluer la diversité biologique. Comprendre la diversité du vivant revient donc à comprendre pourquoi il existe des registres d'état civil indépendants les uns des autres.

Descendance avec modification

Chez les naturalistes d'avant Darwin, les espèces étaient déjà définies comme des ensembles d'individus liés généalogiquement les uns aux autres, tous les individus regroupés dans une espèce étant alors considérés comme issus de la descendance d'un couple originel. La ressemblance au sein d'une espèce résultant du processus de *reproduction* et les variations observées entre les individus étaient considérées, dans ce cadre créationniste, comme des « accidents ». Cette vision change avec Darwin qui, en s'appuyant sur le devenir de ces variations au cours du temps, propose que le degré de ressemblance entre les espèces puisse être interprété comme la trace d'un lien généalogique *entre les espèces*.

En d'autres termes, si l'on pouvait consulter suffisamment loin dans le temps les registres d'état civil des chats et des chiens, on pourrait constater qu'il y a longtemps, les ancêtres des chiens et des chats actuels appartenaient à un même registre. Si l'on disposait d'une description de ces ancêtres, on constaterait que malgré le partage d'un certain nombre des attributs communs aux chats et aux chiens actuels, ils étaient différents des chats et des chiens actuels. Bien sûr, de tels registres n'existent pas et les seules informations dont nous disposons sont les « registres fossiles ». Ces registres nous donnent une indication temporelle, mais ce sont les traits enregistrés

par la fossilisation qui nous permettent de rattacher les formes anciennes aux formes vivantes actuelles.

Darwin, pour expliquer cette relation de ressemblance entre les espèces, s'appuie sur la domestication et la sélection artificielle. En effet, l'homme a trouvé le moyen de faire « évoluer » les espèces sauvages en des variétés ou races très différenciées, mimant ainsi ce que l'on observe à travers les données fossiles sur de plus grandes échelles de temps. Il analyse donc ce que font concrètement les agriculteurs et les éleveurs pour aboutir à de nouvelles formes. Pour y arriver, les éleveurs sélectionnent à chaque génération les individus correspondant le plus à la forme qu'ils recherchent. Ils utilisent les individus ainsi choisis comme parents de la génération suivante et réitèrent ce processus successivement sur un grand nombre de générations. C'est par ce jeu de croisements qu'à partir d'un animal ressemblant probablement au loup actuel l'homme a pu produire des formes aussi différentes que le chihuahua et le saint-bernard. Ce jeu est possible grâce à la variabilité des caractères portés par les individus.

C'est donc sur ce processus utilisé par l'homme sur les espèces naturelles que Darwin se fonde pour expliquer que les affinités observées entre les espèces naturelles sont la conséquence d'une relation généalogique et de la variabilité des traits entre les individus. Il généralise cette idée en utilisant la fameuse expression « descendance avec modifications ».

Des variétés aux espèces

Quelle est la différence entre ces races d'animaux ou ces variétés de plantes, issues de la manipulation par l'homme des individus

reproducteurs, et ce que le scientifique appelle « espèces » ? Comme nous l'avons vu plus haut, les espèces correspondent à des registres d'état civil définitivement séparés. Si l'on prend l'exemple des chats et des chiens, non seulement ils ne sont pas capables actuellement de se reproduire ensemble mais nous avons de nombreux arguments pour penser qu'aucune manipulation ne permettrait de les en rendre capables. En effet, les chats comme les chiens ont chacun des caractères qui leur permettent de se croiser entre eux mais qui les empêchent de se croiser avec les autres espèces. Si l'on prend les variétés de chiens produites par l'homme, les croisements entre les « races » sont possibles – cela donne ce que l'on appelle des chiens « bâtards ». Évidemment, croiser un chihuahua avec un saint-bernard n'est pas forcément possible sans l'intervention de l'homme en raison de la différence de taille entre ces deux races de chiens. Cependant, un chihuahua va être capable de se croiser avec des chiens un peu plus gros que lui – et un peu plus petits pour le saint-bernard. Donc, même si les croisements ne sont pas directement possibles, un chien dit « corniaud » peut avoir dans ses ancêtres un chien de chacune de ces deux races et être lui-même capable de se croiser avec l'une ou l'autre de ces races. Maintenir « pure » une race de chien revient à maintenir séparés les registres d'état civil de chaque race. Dans le cas des chiens, la séparation de ces registres est artificielle. Si toute pression humaine sur les croisements était relâchée et si les chiens étaient libres de se croiser, en quelques générations les races se mélangeraient et ne formeraient plus qu'un seul registre d'état civil.

Imaginons que sur une île perdue au milieu de l'océan il n'y ait que des saint-bernard et sur une autre que des

chihuahuas. Imaginons maintenant que tous les chiens qui ne sont pas sur ces deux îles complètement isolées meurent, par exemple suite à une maladie. Il faut donc aller chercher des animaux sur ces deux îles pour réintroduire les chiens partout ailleurs. Cependant, les saint-bernard et les chihuahuas ne sont plus alors capables de se croiser car il n'existe plus aucune forme intermédiaire. À partir de cette date, il existera donc deux registres d'état civil autonomes et ces deux races deviendront des espèces. Comprendre les mécanismes de l'évolution, c'est dès lors comprendre comment un groupe d'organismes qui forme une communauté de reproduction (une espèce) se divise au cours du temps (SPÉCIATION) et donne naissance à de nouvelles espèces et donc comprendre pourquoi il y a une multitude d'espèces.

Variabilité et hérédité

Au sein des espèces, il existe une certaine variabilité entre les *individus*. Comme nous l'avons vu au travers de l'exemple des chiens, c'est grâce au tri opéré sur les reproducteurs qu'il y a « évolution » de la forme des individus au cours des générations. Cependant, ce tri ne peut avoir lieu que si les caractères d'un individu sont transmissibles à sa descendance, c'est-à-dire, en d'autres termes, que si ces caractères sont héréditaires. Si je prends chez l'homme la couleur de la peau, elle est dans une certaine mesure héréditaire : des parents noirs de peau auront des enfants également noirs de peau. Mais, pour une couleur donnée, la plus ou moins longue exposition au soleil va modifier cette couleur qui va être plus ou moins hâlée. Si un couple de Suédois à la peau très blanche s'installe dans le midi de la France, leur couleur de

peau sera différente de celle de leurs parents respectifs restés en Suède, simplement parce qu'ils ne seront pas soumis à la même quantité de rayons UV. Si les descendants de ce couple retournent ensuite s'installer en Suède, leur couleur de peau sera identique à celle de leurs cousins qui, eux, seront nés en Suède. La différence de couleur observée entre les Suédois installés dans le midi de la France et ceux restés en Suède n'est donc pas *héritable*. Ce phénomène est courant : par exemple, le poids et la taille d'un individu sont fortement hérithables. Globalement, la taille d'un individu et son poids dépendent fortement de ceux de ses parents. Cependant, un enfant qui a des parents grands et robustes mais qui subit au cours de son enfance la malnutrition sera plus chétif que ses parents. Mais, si les descendants de cet individu grandissent dans des conditions alimentaires plus satisfaisantes, ils seront grands et robustes comme leurs grands-parents. La chétivité de l'individu ayant subi cette malnutrition n'est donc pas hérithable et reflète simplement les conditions alimentaires de sa croissance. La chétivité ou le hâle ne résultent pas d'une « évolution » mais simplement d'une situation matérielle rencontrée par les individus au cours de leur vie, situation qui ne sera pas forcément celle rencontrée par leurs descendants.

L'évolution se fait sur des caractères transmis de parent à descendant, mais pour qu'il y ait évolution, il faut que des différences hérithables apparaissent. Ces divergences hérithables sont appelées par les scientifiques des **MUTATIONS**. Ces mutations correspondent à des modifications matérielles d'un être vivant qui sont transmises à ses descendants. Une des principales causes en est les rayonnements auxquels sont couramment soumis les êtres vivants. Ce

sont par exemple les rayonnements UV du soleil ou les rayonnements radioactifs émis par les minéraux d'une roche granitique. Ces modifications sont rares et, le plus souvent, produisent des variations qui n'ont pas ou peu d'effets visibles sur les individus. Certains, se basant sur les conséquences délétères de rayonnements violents subis par les êtres vivants, notamment lors des catastrophes nucléaires, diront que les mutations ne peuvent apporter de formes nouvelles « bénéfiques ». Leur discours est fondé sur le fait que les mutations observées chez les enfants d'Hiroshima ou de Tchernobyl correspondent à des malformations et à des cancers graves et ils en concluent qu'en conséquence, ces mutations ne peuvent expliquer la diversité observée des êtres vivants. Ces mutations impressionnantes, qui rendent généralement les organismes qui les subissent incapables de se reproduire, ne sont pas celles que les organismes subissent habituellement. Certes, nous venons de le dire, la plupart des mutations résultent de rayonnements plus faibles que les rayonnements nucléaires (soleil, roches granitiques) et ont peu d'effets visibles. Elles sont cependant bel et bien présentes et apportent une source suffisante de variabilité pour permettre une évolution des formes du vivant. Parmi les mutations que l'on a pu voir apparaître et étudier, on peut notamment citer les résistances des bactéries aux antibiotiques ou des moustiques aux insecticides. Ces mutations sont néfastes de notre point de vue humain mais bien bénéfiques pour la survie de ces organismes dont nous aimerions nous protéger. Chez l'homme, un exemple de mutation dont l'avantage est évident est fourni par les mutations conférant une résistance naturelle au virus VIH, responsable du sida.

Le jeu de l'évolution

Nous avons maintenant les éléments minimaux pour comprendre les mécanismes de l'évolution :

- les organismes peuvent se reproduire ;
- ils transmettent à leurs descendants des caractères ;
- ces caractères qui se transmettent par la reproduction sont sujets à des variations que l'on appelle « mutations ».

La sélection artificielle montre que le tri des variants au cours des générations permet, à partir d'un même pool ancestral, d'obtenir des variétés très différenciées les unes des autres. Nous allons donc maintenant essayer de mieux comprendre ces processus de tri et de montrer comment ils peuvent être à l'origine de la diversité des espèces que l'on observe dans la nature.

Pour cela, nous utiliserons un petit jeu, qui nécessite simplement un lot de perles de couleurs et de formes différentes ainsi qu'un dé. Prenons donc des perles de couleurs variées : certaines sont rondes, d'autres cubiques ; certaines sont lisses, d'autres crénelées. Chaque perle symbolise un organisme. Le système de reproduction choisi pour ces organismes imaginaires est le plus simple que l'on connaisse chez les organismes réels : la reproduction conforme. Dans ce système, un parent donne naissance à un descendant qui lui est identique, sauf si une mutation se produit. Ce type de reproduction se trouve par exemple chez les bactéries mais également chez certaines plantes capables de reproduction dite « végétative » (par exemple par bouturage). Chaque individu n'a donc dans ce système qu'un seul parent. Au début du jeu, nous partons d'une population de six individus que l'on distinguera par une couleur différente. Tout au long du jeu, les

descendants de chacun de ces six individus garderont la couleur de leur parent. Nous considérerons, dans un second jeu, la forme (ronde ou cubique) et l'ornementation (lisse ou crénelée) comme deux caractères pouvant varier par mutation.

Premier jeu : les hasards de la reproduction

Pour notre premier jeu, chaque joueur choisit une couleur et suit la descendance d'un individu. Ces six individus fondateurs sont par ailleurs identiques (par exemple, des perles rondes et lisses). On peut considérer qu'ils sont les six descendants d'un même parent qui leur a donné comme noms : Rouge, Rose, Bleu, Vert, Orange et Jaune. Les descendants de ces six individus conserveront ces mêmes noms qui, à l'instar de noms de famille, nous permettront de suivre leur généalogie.

À chaque génération, chaque joueur tire au dé le nombre d'individus à qui il donne naissance. Quelle est la justification de ce tirage ? Si l'on prend dans la population humaine des individus ayant une fécondité identique, ce qui fait qu'ils auront pas, peu ou beaucoup d'enfants est dû à des facteurs fortuits tels que l'âge auquel ils rencontreront l'âme sœur, leur profession, etc. Par exemple, un individu qui fait des études supérieures et qui rentre tardivement dans la vie active aura tendance à s'installer tardivement et aura peut-être moins d'enfants que quelqu'un qui commencera à travailler à vingt ans. De même, un individu qui deviendra prêtre ou qui sera soldat au moment d'une guerre aura probablement moins d'enfants que d'autres qui n'auront pas eu ce parcours. Pour chaque individu, une analyse détaillée pourrait effectivement permettre de déterminer *in*

fine le nombre de ses descendants mais cette prédiction ne peut être donnée *a priori* pour un individu pris au hasard. Pour prédire malgré tout ce nombre, nous devons utiliser une modélisation. Cette modélisation va être fondée sur des observations : on compte par exemple le nombre d'individus qui ont 1, 2, 3, ..., n descendants. On utilise ensuite ces observations pour proposer une loi de probabilité. Quand on utilise un tirage d'un dé à six faces, cela revient à dire qu'il y a autant d'individus qui auront un, deux, trois, quatre, cinq ou six descendants. Ce qui fait qu'un individu donné a plutôt un que six descendants est dû à des causes fortuites que l'on « modélise » ici par un tirage de dé. De fait, que le dé tombe sur une face plutôt que sur une autre est également dû à des causes fortuites : la façon dont on le tient dans sa main, les frottements qu'il subit en roulant sur la table, etc., expliquent pourquoi il est tombé sur une face plutôt que sur une autre. Cependant, quand on tient ce dé dans la main, on ne peut pas dire autre chose que : « Le dé a autant de chances de tomber sur chaque face. »

Revenons à notre population de six individus symbolisés par des couleurs différentes mais qui sont par ailleurs identiques. Si chaque joueur tire le 1, il y aura exactement six individus qui pourront fonder la génération suivante, mais si chaque joueur tire le 6, il y aura $6 \times 6 = 36$ descendants candidats pour fonder la génération de parents suivante.

Dans notre jeu, nous limiterons la taille de la population à six. Cette limitation n'est pas en soi nécessaire, mais rend le jeu plus facile à réaliser. D'autre part, elle correspond à une certaine réalité biologique que Darwin a appelée la « limitation des ressources ». Si je prends une île tropicale d'une surface

donnée et que j'y sème un grand nombre de graines de baobab, le nombre d'arbres adultes que pourra accueillir cette île sera limité par sa surface. De même, le nombre d'herbivores qui pourront vivre sur cette île dépendra de la quantité de végétaux pouvant y pousser. Si je prends des graines strictement identiques, celles qui seront tombées dans un coin humide et chaud germeront plus vite que d'autres tombées dans un coin plus aride. Celles qui pousseront les premières occuperont donc le terrain et empêcheront les graines tombées dans un endroit moins favorable de pousser. En d'autres termes, mes graines étant « identiques », le fait que l'une plutôt que l'autre pousse sur mon île ne peut être prédit *a priori*. Dans notre jeu, nous simulerons ce phénomène en déposant dans une urne les descendants produits par chaque individu. De cette urne, six perles seront extraites « en aveugle », donc au hasard, pour fonder la nouvelle génération de descendants. L'ascendance de chacune des perles tirées dans l'urne pour fonder la nouvelle génération sera connue grâce à la couleur de la perle puisqu'elle fait office de nom de famille.

Voici un exemple de réalisation du jeu. Au premier tirage, les six joueurs lancent leur dé et mettent le nombre correspondant de perles de leur couleur dans l'urne. Dans le cas figuré, vingt-quatre perles sont ainsi déposées dans l'urne. Comme la population ne permet la survie que de six descendants, nous tirons six perles parmi les vingt-quatre pour constituer la seconde génération. Dans l'exemple figuré, il n'y a plus que quatre couleurs présentes, les joueurs Rose et Rouge ont été éliminés. Les joueurs Vert, Orange et Jaune ont chacun un descendant alors que le joueur Bleu en a trois. Que se passe-t-il à

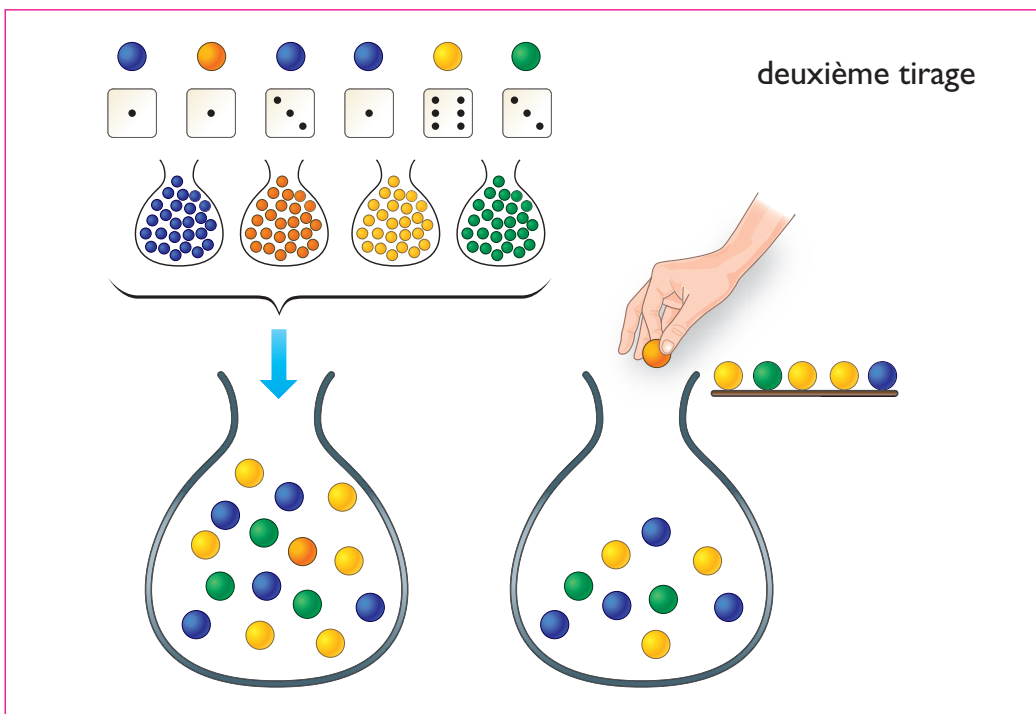
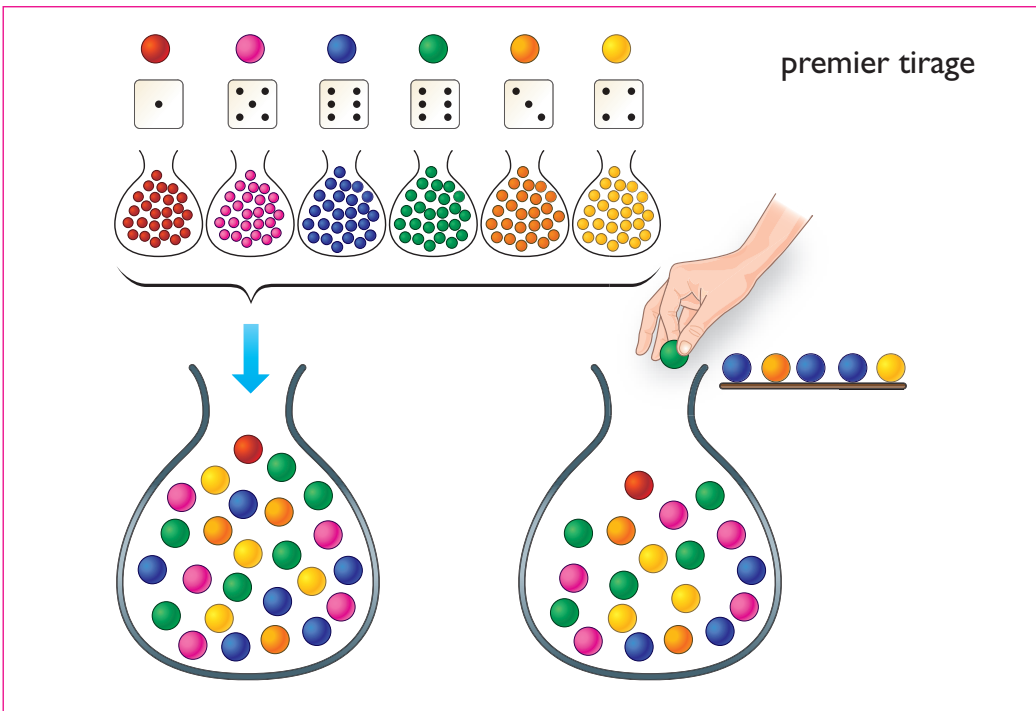
la seconde génération ? Pour chacun de ces individus, il faut faire un tirage. Les joueurs Vert, Orange et Jaune jouent une fois, alors que le joueur Bleu, qui a trois représentants, doit tirer trois fois le dé. Dans notre exemple, quinze perles sont déposées dans l'urne. La troisième génération est obtenue par tirage de six perles parmi ces quinze. On peut figurer les relations généalogiques entre les individus en les réunissant dans des « familles » grâce à leur couleur. Et le jeu continue ainsi. Inévitablement, par le simple fait du tirage des descendants dans l'urne, les joueurs vont être éliminés tour à tour. Le jeu sera fini quand les six places de la population seront de la même couleur. On peut répéter ce même jeu à plusieurs tables de six joueurs. Chaque table va obtenir une suite de tirages différents et, au bout d'un nombre différent de générations, une couleur va l'emporter. À chaque partie, nous pouvons enregistrer le résultat final en notant la couleur gagnante. Par exemple, sur vingt parties, on pourrait avoir les résultats suivants : Bleu → 3, Vert → 1, Orange → 0, Jaune → 6, Rose → 7, Rouge → 3. Plus le nombre de tirages sera grand, plus on obtiendra des valeurs proches pour chaque couleur. Par ailleurs, on pourrait aussi noter le nombre de générations au bout duquel la partie est finie, c'est-à-dire au bout duquel il ne reste plus qu'une seule couleur. On pourrait constater que ce nombre varie beaucoup. En jouant un grand nombre de parties, on constaterait qu'il faut en moyenne six générations.

Nous pouvons tirer plusieurs conclusions de ce jeu. Tout d'abord, à chacune des tables, le processus de tri aboutit inéluctablement à une perte de la diversité initiale : à condition que l'on joue suffisamment longtemps, une seule couleur subsiste. Les couleurs

représentant des lignées généalogiques, la seconde conclusion est qu'au bout d'un nombre de générations égal en moyenne à la taille de la population, tous les individus présents appartiendront à la même famille. Reprenons maintenant les résultats sur un ensemble de tables de jeu qui jouent en même temps. Au départ toutes les tables ont la même diversité : elles ont chacune six couleurs, chacune portée par un seul individu. Donc, deux tables prises au hasard au début du jeu sont strictement identiques. À la fin du jeu (quand toutes les tables ont fixé une couleur), chaque table a fixé une des six couleurs. Parmi nos six couleurs, peut-être que certaines n'ont « gagné » à aucune table de jeu et ont donc disparu. Cependant, plus le nombre de tables de jeu est grand, plus la probabilité de conserver chaque couleur au moins à une table est grande. Quel que soit le nombre de tables que l'on compare, à la fin du jeu, si l'on prend au hasard les résultats de deux tables, il n'y a qu'une chance sur six de tomber sur la même couleur. Ce processus de tri qui, globalement, conduit à diminuer la diversité au sein d'une population, conduit également à une divergence entre les populations. Cet effet d'échantillonnage stochastique est appelé **DÉRIVE GÉNÉTIQUE**.

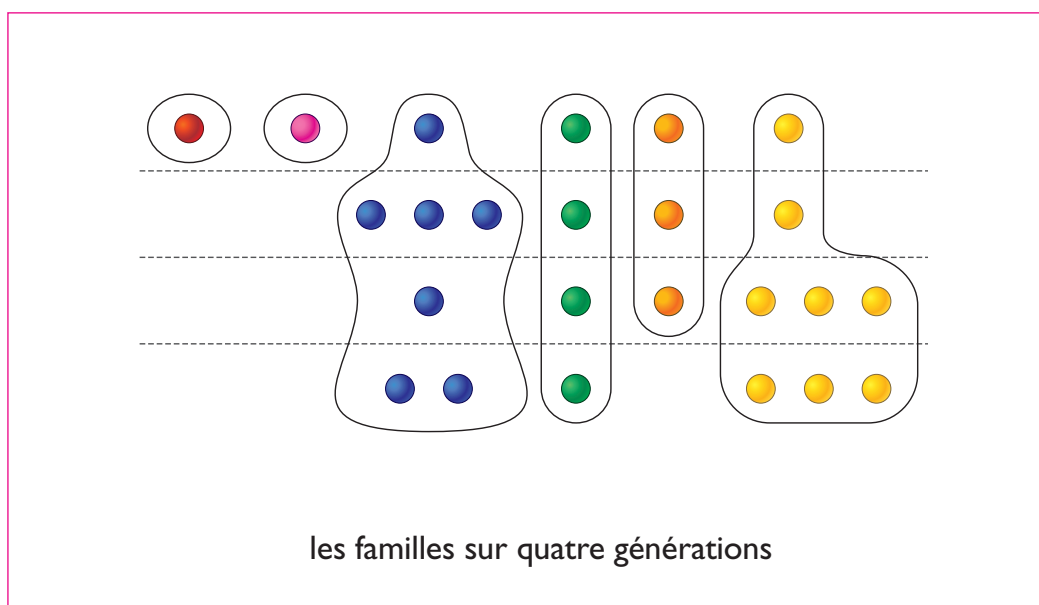
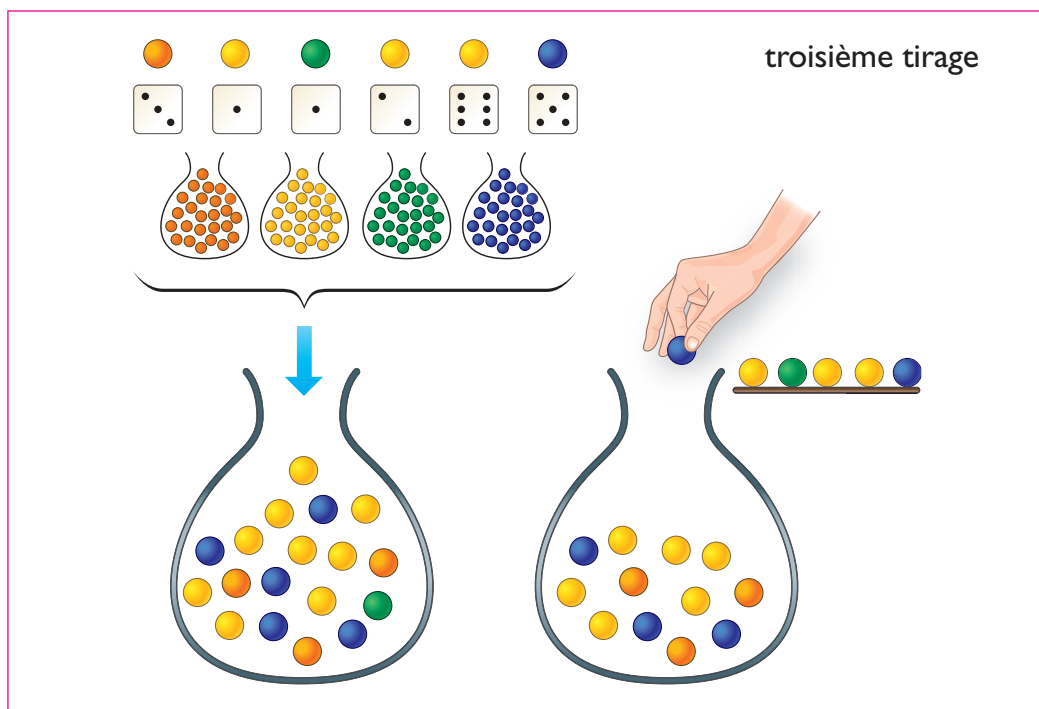
Deuxième jeu : les mutations

Dans le premier jeu, nous ne pouvons que différencier des populations en perdant des variants. Pour compléter notre compréhension des mécanismes de l'évolution, nous devons introduire le processus de création de variabilité entre les individus, c'est-à-dire la mutation. Nous allons donc ajouter à notre jeu la mutation, c'est-à-dire des variations fortuites transmissibles à la descendance.



De la même façon que pour la prédiction du nombre de descendants d'un individu, il n'est pas possible de prédire quel individu plutôt que tel autre verra un de ses caractères

modifié sous l'effet de forces physiques comme les rayonnements. On utilise donc là encore une modélisation probabiliste. Pour comprendre le devenir des variations, nous



pouvons proposer une nouvelle variante du jeu. Pour chaque joueur, nous prenons maintenant un sac rempli de perles lisses d'une même couleur ainsi que d'une faible proportion de perles crénelées pour modéliser le fait que les mutations sont rares. Ces perles crénelées sont nos « mutants ». Le jeu suit les

mêmes règles que celles du précédent jeu. À partir du moment où une perle mutante est tirée, il va falloir tirer les descendants de cet individu dans un sac de perles crénelées. Il faut donc reprendre les règles du jeu précédent. Les joueurs non mutants lancent le dé pour déterminer le nombre de descendants

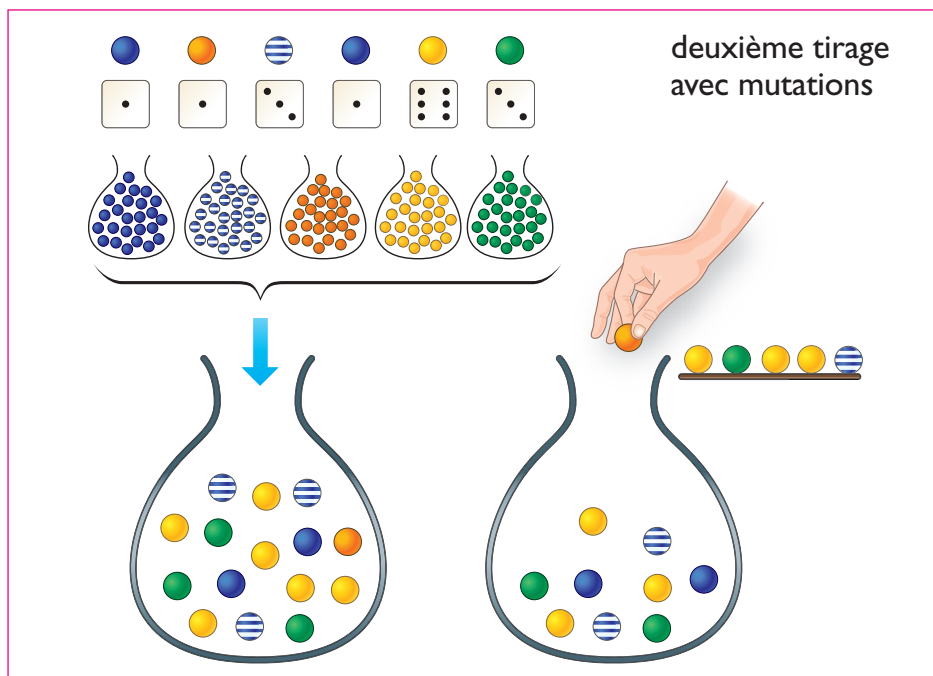
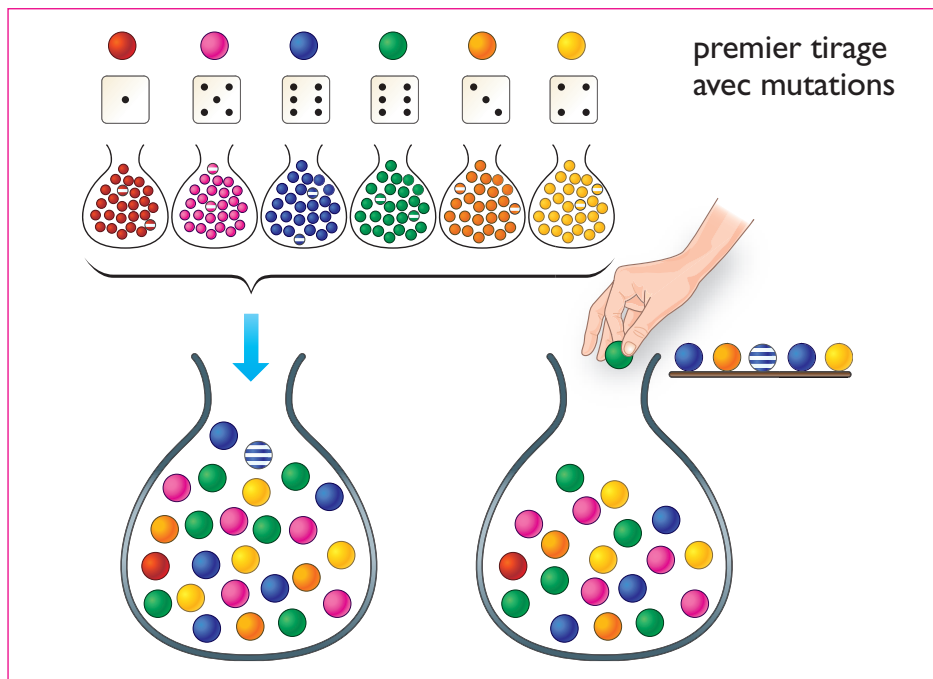
à mettre dans l'urne. Ils les choisissent dans le sac qui contient des perles lisses et crénelées de leur couleur et les mettent dans l'urne. Le joueur mutant tire ses descendants dans un autre sac contenant uniquement des perles crénelées. Chaque joueur tire ensuite une perle dans l'urne pour constituer une nouvelle génération. Comme précédemment, l'un ou l'autre des variants peut être fixé par simple effet d'échantillonnage stochastique. Au bout du compte, par la multiplication des tirages, la forme crénelée finira par se fixer. Ici, les mutations sont symbolisées par une seule forme (crénelée). Chez les organismes réels, elles seront le plus souvent diverses. Le fait que la forme crénelée ne se fixe pas suite à son premier tirage montre que pour une mutation fixée, de nombreuses autres ont été perdues par ce jeu d'échantillonnage des descendants.

Troisième jeu : des mutations qui trichent

Dans le deuxième jeu, les mutations apportent de la variabilité qui, par de simples effets d'échantillonnage stochastique, conduit à faire évoluer les caractères dans une lignée. Dans ce jeu, la mutation n'avait pas d'effet sur le nombre de descendants. Si l'on se remet dans le contexte de la sélection artificielle, un éleveur qui voudrait obtenir des perles crénelées chercherait un individu qui porte cette mutation et l'utiliserait comme unique parent de son élevage. Il piperait ainsi les tirages de notre jeu. Dans la nature, certains caractères vont également piper les dés. Les mutations peuvent par exemple toucher le taux de fécondité. Dans notre jeu, de telles mutations peuvent être modélisées de la façon suivante. Pour une mutation qui baisse le taux de fécondité, symbolisée par une perle cubique, le tirage

du dé sera 1 quand on obtient la face 1, et 2 quand on obtient n'importe quelle autre face. Les perles cubiques ne pourront donc avoir au maximum que deux descendants. Pour une mutation qui augmente le taux de fécondité, symbolisée par les perles rondes et crénelées, le nombre de descendants à mettre dans l'urne sera tiré à l'aide d'un tirage à deux dés.

Reprenons la configuration du premier jeu, dans lequel chaque joueur était symbolisé par une couleur différente. Le joueur, après avoir lancé son dé, tire dans un sac des perles de sa couleur. Ce sac contient majoritairement des perles rondes et lisses et, en plus faible quantité, des perles rondes et crénelées d'une part et cubiques d'autre part. À la génération suivante, les mutants tirés comme reproducteurs verront le résultat de leur tirage de dé modifié selon les règles énoncées. Même si cette règle confère un avantage fort aux mutants crénelés, la répétition du jeu montrera que, non seulement ce mutant avantageux ne sera pas systématiquement fixé dans la population, mais que, parfois, le mutant le plus désavantageux sera fixé. Cet effet, qui peut sembler paradoxal, est lié au fait que l'avantage ou le handicap apporté par ces mutations n'est pas très fort. Certaines mutations (comme celles observées lors des catastrophes nucléaires) apportent un tel désavantage que les organismes qui les subissent sont éliminés sans qu'ils puissent se reproduire. D'autre part, l'avantage ou le désavantage conféré par une mutation peut dépendre du contexte. Par exemple, les bactéries résistantes aux antibiotiques sont avantagées dans un contexte où l'on utilise des antibiotiques. Sans antibiotiques, ces mêmes bactéries peuvent être désavantagées car elles utilisent une partie de



leur énergie à produire cette résistance plutôt que, par exemple, à se reproduire. Chez l'homme, on peut citer l'exemple de l'anémie falciforme, qui est une modification héritable de la forme des globules rouges très handicapante. Cependant, cette malfor-

mation des globules rouges a pour conséquence de rendre les personnes touchées résistantes à l'infection par le parasite de la malaria. Donc, en zone infestée par ce parasite, les personnes atteintes par l'anémie falciforme sont avantagées. Ce

tri, où les dés sont pipés dans un sens ou dans un autre, est ce que Darwin a appelé la SÉLECTION NATURELLE. C'est ce processus que reproduisent les éleveurs dans leurs élevages. Si l'on reprend l'exemple des îles océaniques isolées, chacune a ses propres caractéristiques environnementales et, dans chacune d'elles, le mutant avantageux ne sera pas forcément le même. Les effets conjoints de la sélection naturelle et de la dérive génétique accéléreront donc la différenciation de populations isolées.

Et les espèces dans tout ça ?

Dans notre jeu, nous avons simplifié le système de reproduction, il n'y a pas de croisement entre les individus. Cependant, nous avons vu au début de ce chapitre que ce qui nous permet de distinguer un chat d'un chien, c'est qu'ils ne sont pas capables de se reproduire ensemble. Nous avons donc besoin de comprendre comment le jeu se passe si l'on prend en compte la reproduction sexuée. Dans la reproduction sexuée, deux partenaires apportent le matériel permettant de produire un œuf qui donnera naissance à un individu ressemblant à ses parents. Sans détailler outre mesure la modalité de transmission des caractères, il nous faut rappeler que, quand la reproduction est sexuée, chaque individu reçoit deux lots d'un même jeu de caractères : un lot maternel et un lot paternel. Au moment de la reproduction, chaque individu produit des gamètes (ovules pour les femelles et spermatozoïdes pour les mâles) qui contiennent un seul jeu de caractères. Ce jeu, propre à chaque gamète individuel, est le résultat d'un tirage de chacun des caractères parmi les deux lots parentaux. Sur un jeu de dix caractères, on peut par exemple avoir le tirage suivant :

caractères 1, 5 et 7 maternels et caractères 2, 3, 4, 6, 8, 9 et 10 paternels. Pour dix caractères, il y a ainsi 2^{10} combinaisons différentes possibles ! La reproduction sexuée ne crée pas de variabilité des caractères mais génère une grande diversité dans la combinaison *entre* les caractères. La rencontre de deux individus pour se reproduire peut être fortuite, mais peut également être influencée par les caractères de ces individus. En effet, parmi les caractères, certains concernent plus ou moins directement le système de reproduction. Comme nous l'avons vu dans l'exemple des chiens, la taille n'est pas directement liée au système de reproduction mais un chihuahua et un saint-bernard auront probablement quelques difficultés à se croiser. Un chihuahua isolé dans une population de saint-bernard aura donc une probabilité de se reproduire plus faible que celle qu'il aurait dans une population de chihuahuas.

Comme nous l'avons vu avec nos jeux, deux populations qui sont séparées vont diverger, que ce soit de façon stochastique ou par le fait que certains caractères affectent les capacités à laisser des descendants (ce que Darwin a appelé la « survie du plus apte »). Imaginons un archipel qui se forme suite à un changement climatique conduisant à une remontée du niveau des mers. Dans les îles de cet archipel, les populations d'organismes terrestres sont fragmentées en petites populations isolées les unes des autres. Sur chaque île, chaque population suit sa propre histoire évolutive de dérive et de sélection. Au bout d'un certain temps, nouveau changement climatique ou bouleversement géologique, le niveau des mers redescend et les populations se retrouvent en contact. Que se passe-t-il ? Comme les saint-bernard et les chihuahuas, les populations ont divergé.

Les combinaisons de caractères présentes dans chacune des populations peuvent être incompatibles les unes avec les autres. Cette incompatibilité peut par exemple faire que, même si les croisements entre individus issus des différentes îles sont redevenus possibles, la combinaison des différents lots de caractères produise des organismes peu viables. C'est le cas par exemple quand se croisent des individus d'espèces proches. L'hybride peut par exemple être viable, mais incapable de se reproduire (cas des croisements entre cheval et âne, qui donnent, suivant le sens du croisement, des mulets ou des mules stériles). Dans ce contexte, un individu qui, par mutation, acquerrait un caractère qui lui permettrait de choisir correctement son partenaire (c'est-à-dire un partenaire issu de la même île que lui) aurait plus de descendants et serait donc plus représenté dans les générations suivantes. Ce type de mécanisme explique donc comment, au cours du temps, grâce à ces simples processus de tri des mutations, de nouvelles espèces peuvent se former et augmenter la diversité des formes du vivant. Ce scénario « insulaire » n'est pas le seul possible, c'est le plus simple et le plus évident. Il permet d'expliquer par exemple les observations de Darwin sur la faune des Galápagos lors de son voyage à bord du *Beagle*. Les biologistes ont depuis proposé et étayé d'autres scénarios qui restent néanmoins fondés sur ces mêmes mécanismes (mutation et tri stochastique ou sélectif).

Conclusion : et l'adaptation dans tout ça ?

Quand on parle d'évolution, une des premières idées à sortir du chapeau est celle d'ADAPTATION. Elle n'a pourtant pas

encore été abordée dans ce chapitre. L'idée sous-jacente est que, globalement, les êtres vivants ont l'air « bien faits ». La réponse apportée par Darwin est que la sélection naturelle explique l'adaptation. Comme nous l'avons vu, le processus de la reproduction conduit à lui seul à un tri des variations héritables. Ce tri peut être modélisé en utilisant l'outil mathématique des probabilités. Dans le cas de la sélection artificielle, nous avons vu que l'homme biaise les probabilités de la reproduction en choisissant les reproducteurs en fonction des caractères qu'il veut « renforcer » ou fixer dans une lignée. Le poids probable d'un individu dans la génération suivante devient alors dépendant d'un caractère. Pour un même caractère, chaque variant a une probabilité différente. Dans la nature, ce n'est pas l'homme qui décide quels caractères biaiseront ou pas la probabilité de reproduction. La relation entre les traits d'un organisme et l'environnement dans lequel il se trouve conditionne cette probabilité. Cet environnement est caractérisé aussi bien sur le plan physico-chimique que par les autres organismes présents. Cette relation peut conduire, si elle est assez forte, à trier les variants les plus « efficaces » à laisser des descendants dans un environnement donné. C'est ce processus qui permet de mettre en place des caractères qualifiés d'« adaptatifs ». Cependant, l'environnement change et ce qui est une adaptation pour un parent peut ne plus l'être pour ses descendants. Une adaptation est donc une « variation » qui a permis aux individus qui la portaient de mieux passer au travers du filtre du tri.

Finalement, les combinaisons de caractères que l'on observe chez un organisme sont le produit d'une histoire de tri : cet organisme

a hérité de ses parents des caractéristiques et les mutations génèrent sur ce « patrimoine » des variations qui peuvent, si elles persistent face aux mécanismes de tri, être à l'origine d'« innovations ». Certaines combinaisons introduisent des contraintes : par exemple, une girafe doit avoir un cœur suffisamment puissant pour faire circuler le sang jusqu'à son cerveau. Une mutation qui donnerait un petit cœur à une grande girafe serait ainsi immédiatement éliminée. Certaines mutations vont donc être éliminées parce qu'elles seront apparues chez des organismes qui présentent par ailleurs une combinaison de caractères incompatible avec elles. Cette idée est importante car elle explique pourquoi, quand une forme particulière, c'est-à-dire une certaine combinaison de caractères, est retenue par le processus de tri, il peut être difficile ensuite de « défaire » cette combinaison. Cette idée introduit la notion de « contrainte ». Ces contraintes

sont le produit de l'histoire des mutations apparues et retenues par les processus de triage liés à la reproduction dans chaque lignée.

En conclusion, je soulignerai l'importance de la « contingence », c'est-à-dire de l'ensemble des causes fortuites qui conduisent à fixer plutôt tel ou tel caractère, mais aussi à générer des contraintes sur les combinaisons de ces caractères. L'histoire de la vie est donc celle d'un réseau généalogique dont certaines parties se séparent (les registres autonomes d'état civil). Ce réseau trace le lien généalogique entre les individus, mais aussi les paramètres démographiques (nombre de descendants par individu, taille de la population, taux de migrants entre les populations, etc.). L'évolution résulte des effets combinés de ces facteurs démographiques et des caractères des organismes.

Bibliographie

Agnès DESARTHE, avec des illustrations de Claude PONTI, *Petit Prince Pouf*, L'École des loisirs, 2002.

Patrice DAVID et Sarah SAMADI, *La théorie de l'évolution - Une logique pour la biologie*, Flammarion, « Champs Université », 2000.

Benoît RITTAUD, *Les mystères du hasard*, Le

Pommier, « Les minipommes », 2008. Pour bien comprendre les questions concernant la stochasticité que je traite dans le jeu.

Et sur la Toile

voir le site web proposé par le CNRS et notamment la bibliographie qui y est proposée :

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/>

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquérir ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes

75006 Paris

01 85 08 71 79

contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE