Le grand bazar de l'évolution

REGARDER NOTRE TERRE

Contributeurs :
Conservatoire et Jardin botaniques de Genève : Yamama Naciri, conservatrice ;
Romain Dewaele, médiateur scientifique ; Philippe Clerc, conservateur
Muséum d'Histoire Naturelle de Genève : Nadir Alvarez, conservateur en chef
RTS Découverte : Tania Chytil, journaliste
Comité scientifique : Guillaume Lecointre, professeur, Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, France ; Alicia Sanchez-Mazas, professeure, Université de Genève, Suisse ;
Kostas Kampourakis, chargé d'enseignement, Université de Genève, Suisse ;
Patrick Charlier, enseignant, Département de l'Instruction Publique, Genève, Suisse
Financement : Bioscope (Université de Genève), RTS Découverte, Muséum d'Histoire Naturelle de Genève, Conservatoire et Jardin botaniques de Genève

Tirages : 25'000 exemplaires / Année de parution : 2020

Le grand bazar de l'évolution

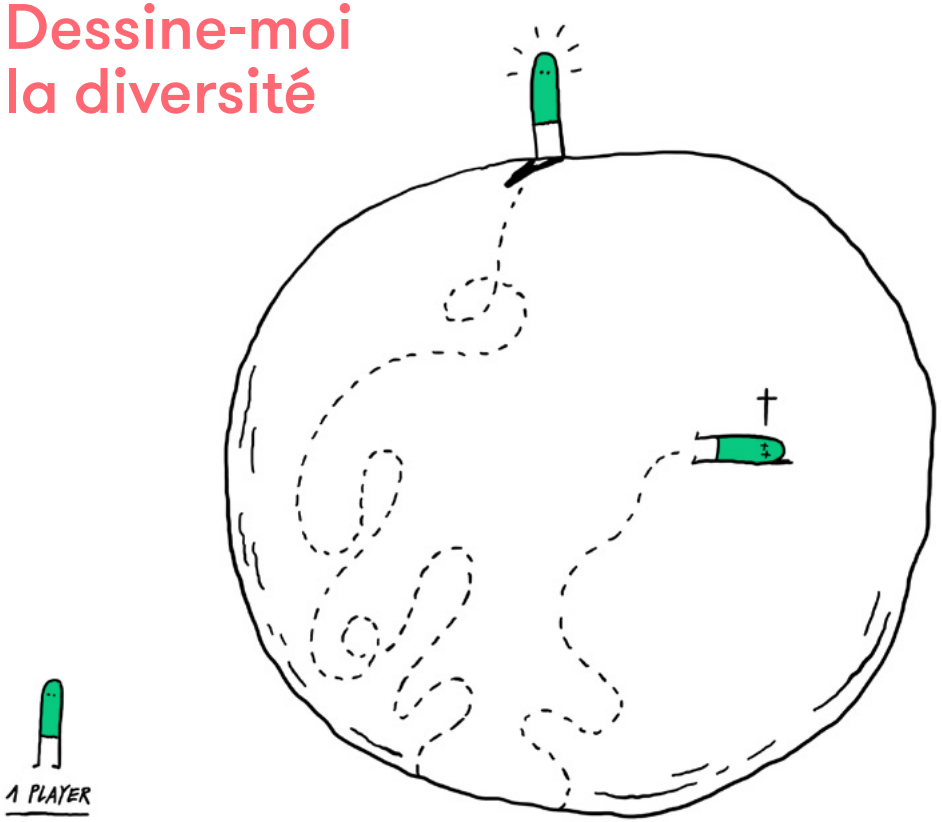
Savez-vous quel est le carburant de l'évolution ? Que le hasard joue un rôle important et qu'il n'y a pas de but ou de destin ? Que la diversité n'est pas uniquement le produit de la compétition, mais également celui de la coopération, de l'entraide et de l'entrelacement ? Que les organismes vivants se font souvent la «courte échelle»? Qu'il n'y a pas d'organismes «inférieurs» ou «supérieurs»? Que les «mal fichus» d'aujourd'hui pourraient devenir les «mieux fichus» de demain, si le milieu venait à changer?

Cette brochure vous propose d'aborder l'évolution à la lumière des dernières découvertes de la science, notamment en génétique. Vous le verrez, les mécanismes de l'évolution sont assez simples, mais ils donnent lieu à des formes de vie très diverses, complexes et parfois surprenantes.

Comprendre l'évolution, c'est apprécier ce qui nous entoure, respecter et protéger l'extraordinaire biodiversité de notre planète.

Vous êtes curieux de nature? Convaincus? Sceptiques? Quoi qu'il en soit, laissez-vous embarquer et commençons par un jeu.

Dessine-moi la diversité



Simulons l'évolution de la vie sur une exoplanète imaginaire, appelée Glurb. Notre jeu vise à créer une vie similaire à celle sur Terre avec une grande variété d'espèces différentes. Vous allez le voir, il suffit de quelques mécanismes simples pour voir émerger une diversité fascinante.

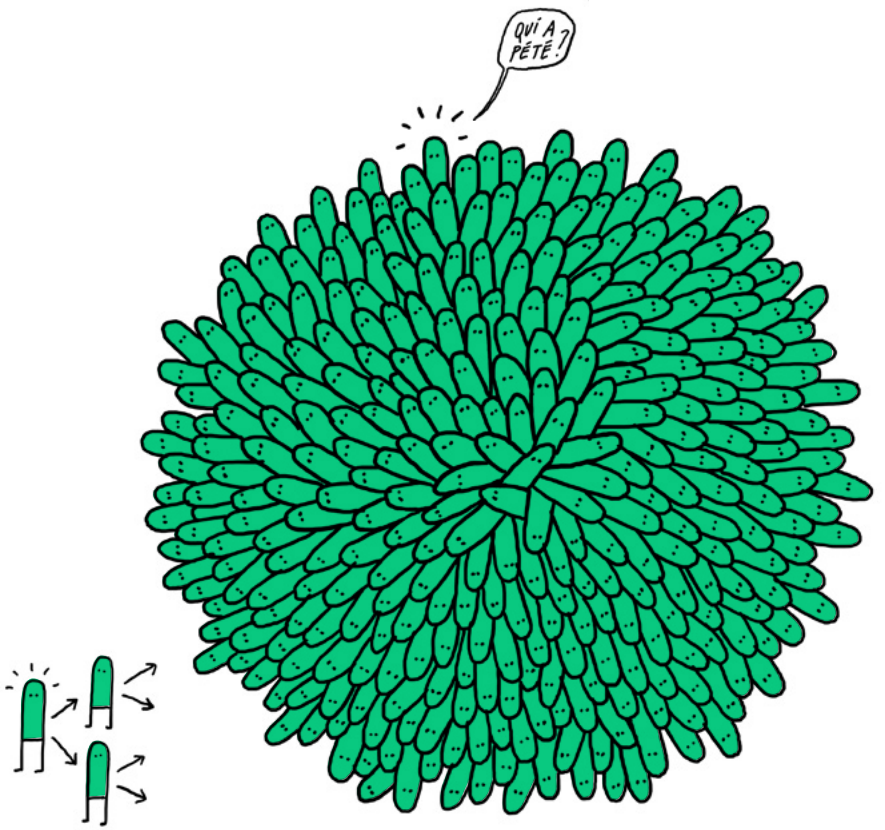
❶

Vie et mort

Commençons donc par imaginer un être vivant sur Glurb. Il est seul et sait se déplacer et manger.

Il se déplace donc, mange, se déplace, mange, se déplace. Petit à petit, l'environnement abîme notre ami. Il vieillit. Un an plus tard, il meurt.

Ce premier essai ne fonctionne pas très bien. Un être vivant a bien vécu sur Glurb, mais pendant très peu de temps. Il faut donc améliorer notre scénario.

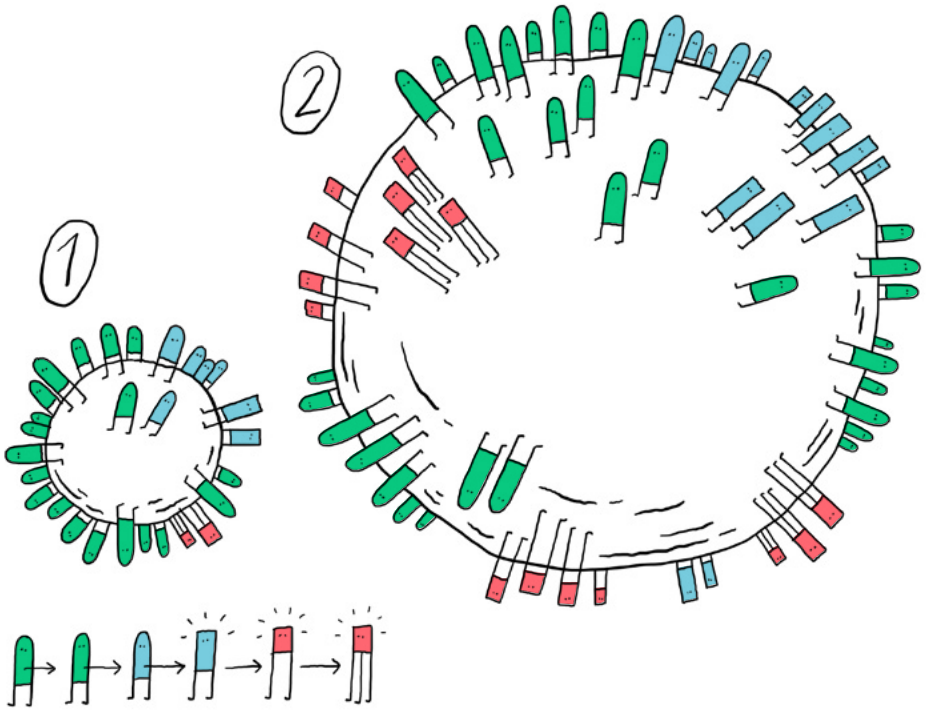


❷

Reproduction et transmission

Relançons notre jeu en attribuant une nouvelle capacité à notre ami: celle de se reproduire et de transmettre ses caractéristiques à la génération suivante. Disons que tous les soirs, s'il est encore vivant, **il se duplique pour former un clone parfait de lui-même**, mais en plus jeune. Pour cette nouvelle simulation d'évolution sur Glurb, l'espérance de vie est toujours d'un an, mais le taux de reproduction est de 2 par jour. Au jour 2, ils sont donc 2; le lendemain, ils sont 4; puis 8, 16, 32, 64, 128! En un mois, ils sont déjà plus d'un milliard sur Glurb!

Nous savons que sur Terre, aucune population ne se comporte de la sorte. En cause notamment: la quantité de nourriture à disposition. La croissance de la population est également modulée par **la compétition entre individus**. On peut introduire ces nouvelles règles dans notre jeu pour réguler la taille de la population. Cependant, il n'y a toujours pas de diversité: la population est toujours composée d'individus semblables. Notre scénario doit donc être ajusté à nouveau.



3

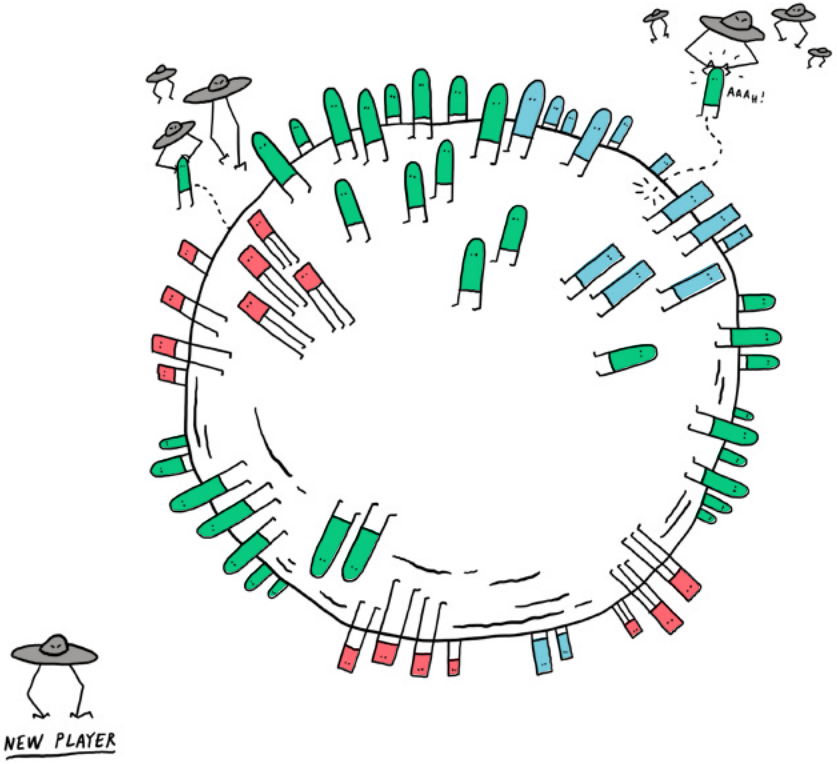
Variation, hasard et dérive génétique
Il faut ajouter une autre règle à notre simulation. Lorsque nos individus se reproduisent, donnons-leur une petite chance de **fabriquer des descendants un peu différents**, qui ne seront pas des clones parfaits de leur parent. Nous introduisons ainsi de la variation d'une génération à l'autre.

Relançons la simulation. Après quelques générations de clones identiques, on voit apparaître un individu avec une nouvelle caractéristique: une couleur différente. Puis un autre avec une nouvelle forme. Des variants sont ainsi produits, qui présentent une combinaison de caractères qui les rendent uniques. Ils apparaissent par hasard, mais peuvent disparaître assez rapidement. Nous avons maintenant de la variation, mais il y en a peu. Glurb n'est en effet pas très grande et les ressources ne sont pas importantes: la population sur Glurb reste petite.

Imaginons alors une plus grande planète: Glurb 2. Elle a davantage de place et de ressources. On voit ainsi apparaître une population plus grande, globalement plus variée, et chaque variant a plus de chance de persister dans la population, du seul fait du hasard.

Il est impossible de prédire quelles couleurs et quelles formes seront les plus nombreuses sur Glurb et Glurb 2 car leur nombre évolue de manière aléatoire. Mais on sait qu'en moyenne, la population sera plus variée sur Glurb 2 que sur Glurb et que sa composition sera plus stable, uniquement du fait de sa plus grande taille.

Ce phénomène de changement de composition au cours du temps, et au hasard, s'appelle la dérive génétique.



4

Sélection naturelle: favoriser certains variants apparus par hasard
Sur Glurb 2, on a obtenu une grande diversité de formes de vie, comme celles observées sur Terre. Cependant, on n'explique toujours pas pourquoi certaines populations semblent si bien adaptées à leur milieu. Est-ce seulement dû au hasard?

Jusque-là, être rouge ou vert, carré ou triangulaire n'influençait pas les chances de survivre et de se reproduire. C'est pour cela que les nombres de ces variants évoluaient au hasard au fil du temps. Maintenant, introduisons des aliens prédateurs visitant régulièrement notre planète. Ils sont très attirés par la couleur verte, bien qu'ils ne rechignent pas à manger du rouge ou du bleu s'ils ne trouvent rien d'autre.

Les variants verts risquent donc davantage de se faire manger par les prédateurs. Leur espérance de vie est ainsi plus faible. En revanche, les individus rouges ou bleus ne sont pas autant mangés par les aliens et survivent plus longtemps. Ils ont ainsi davantage de descendants que les individus verts.

Un tri s'opère. Si nous partons d'une population avec quantité de couleurs différentes, en quelques générations et du fait des prédateurs, la couleur verte risque fort de disparaître. La plupart des individus seront rouges ou bleus. **C'est le phénomène de sélection naturelle.**

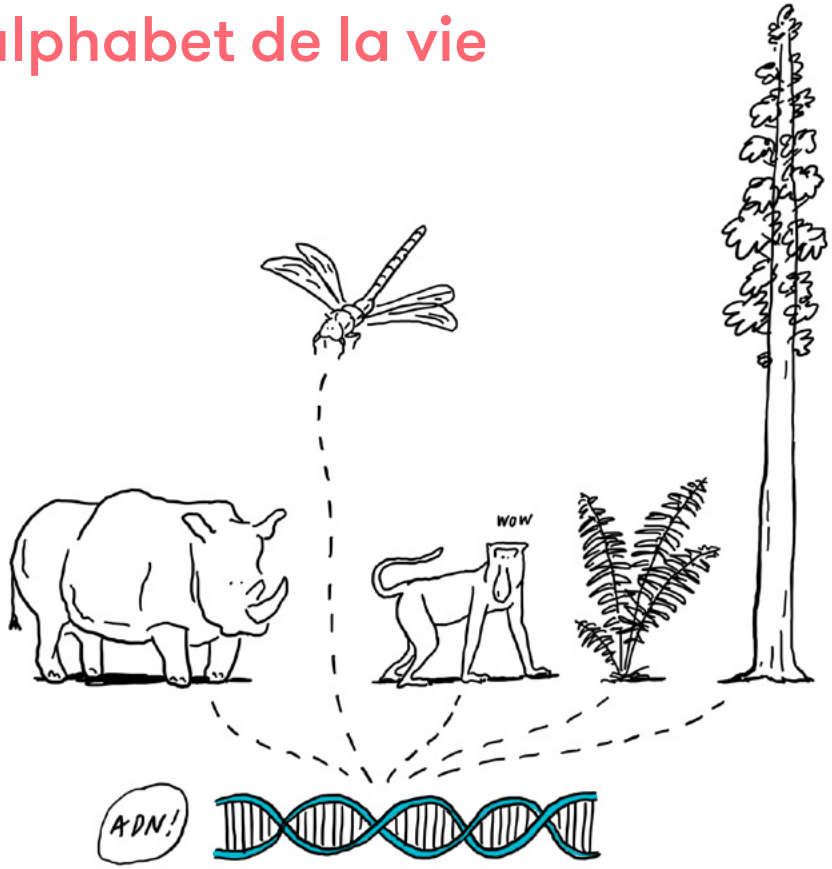
Les ingrédients de l'évolution

Les scénarios précédents ont montré qu'il faut peu de règles pour observer l'évolution de nouvelles formes de vie sur notre planète hypothétique, et aboutir à une grande diversité comme celle que nous observons sur Terre. En effet, il faut:

- des mécanismes créant de la **variation**, et nous verrons que celle-ci apparaît de multiples façons,
- une **transmission** des nouvelles caractéristiques d'une génération à l'autre,
- diverses **interactions** (entre individus de même espèce ou d'espèces différentes, entre individus et environnement), façonnant cette variation: il s'agit de la sélection naturelle, la dérive génétique, la migration, la compétition, la coopération, la prédation, la symbiose, etc.

Sur Terre, la vie est apparue il y a au moins 3,5 milliards d'années. Elle a connu bien des bouleversements. On sait maintenant que tous les êtres vivants qui peuplent notre planète sont apparentés à des degrés divers. Nous partageons ainsi des ancêtres avec les bactéries, les plantes, les insectes et les champignons. Incroyable, non?

L'alphabet de la vie



QU'EST CE QU'UN GÉNOME?

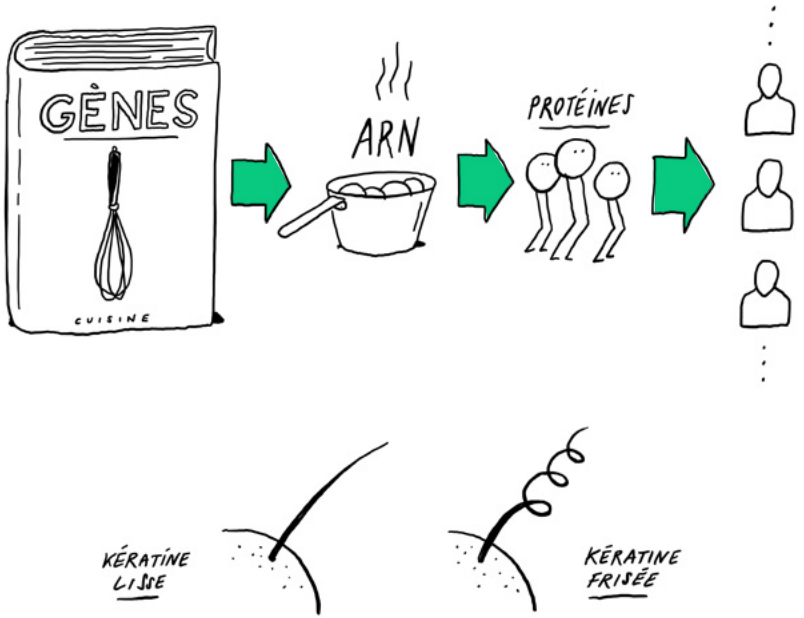
Il est contenu dans chaque cellule des organismes sous forme d'**ADN** (**A**cide **D**ésoxyribo**N**ucléique) organisé en longues molécules, généralement sous la forme de chromosomes. Tous les êtres vivants ont un génome: les rhinocéros, les séquoias, les fougères, les libellules, les bactéries, les champignons... et nous!

Ces molécules d'ADN constituent des chaînes plus ou moins longues, appelées séquences, dont les éléments sont constitués par 4 **bases chimiques**:

A = Adénine
T = Thymine
G = Guanine
C = Cytosine

Bien que cet **alphabet de la vie** ne comporte que 4 lettres, leurs combinaisons sont infinies. Celles-ci fournissent l'équivalent de «recettes de cuisine» (les gènes) pour fabriquer les protéines et assembler les cellules des organismes. Ces protéines permettent de faire fonctionner la machinerie de la cellule pour qu'elle vive et se multiplie.

Des gènes à l'organisme



Les gènes correspondent aux «recettes de cuisine» pour fabriquer les grandes lignes de ce que nous sommes.

Tout cela exige une machinerie complexe, impliquant notamment une **molécule proche de l'ADN, appelée ARN**, et qui participe à la fabrication des protéines. L'expression des gènes sous forme de protéines et les interactions entre les cellules guident la croissance et le développement des organismes.

Les protéines assurent diverses fonctions. Par exemple:

- ***la kératine*** *est une protéine structurelle. Les cheveux et les poils en sont constitués à 95% et lui doivent leur solidité.*
- ***l'hémoglobine*** *est une protéine de transport. Elle fixe l'oxygène dans les globules rouges et permet son transport à l'intérieur du corps.*
- ***Vin3*** *est une protéine régulatrice de la floraison, sensible à la température extérieure. Elle déclenche la floraison de certaines plantes après l'hiver.*

Le jeu des 2% de différence

Les génomes des chimpanzés et des humains sont similaires à 98% environ. Les différences entre chimpanzés et humains s'expliquent bien entendu par ces 2% restants, mais également par le moment où les gènes communs sont sollicités pour produire leurs protéines. Les différences proviennent donc également de la manière dont les gènes sont contrôlés et régulés au sein des cellules. Mais revenons aux trois ingrédients principaux de l'évolution.

1. Variation

Les différents niveaux de variation

La variation des caractéristiques et leurs différentes combinaisons expliquent pourquoi les individus sont tous différents. La variation apparaît sans cesse à tous les niveaux, par hasard. Au fil du temps et des générations, certains caractères apparaissent, se transmettent, sont conservés ou sont perdus. Ceci est vrai pour les molécules et les populations, en passant par les cellules et les organismes.

Ainsi, chacune et chacun d'entre nous est un variant unique parmi d'autres.

Notre ADN, notre microbiote, nos interactions avec les autres et avec l'environnement, notre culture, nos comportements sont autant de facteurs qui nous rendent uniques et qui peuvent se transmettre d'une génération à l'autre.

En général, la majorité des changements n'est pas perceptible à notre échelle de temps; raison pour laquelle nous avons souvent l'impression que rien ne change. Le défi est d'expliquer comment une certaine stabilité apparaît à nos yeux, alors que tout change sans cesse.

La variation génétique

Mais à quoi correspond cette variation génétique? Elle peut prendre plusieurs formes, dont la mutation, la duplication génique, la recombinaison ou la transposition.

La mutation crée des **variations dans l'ADN** des individus. Seules les mutations apparaissant dans les cellules destinées à la reproduction, comme les ovules, spermatozoïdes, spores, ou grains de pollen, sont potentiellement transmises à la génération suivante.

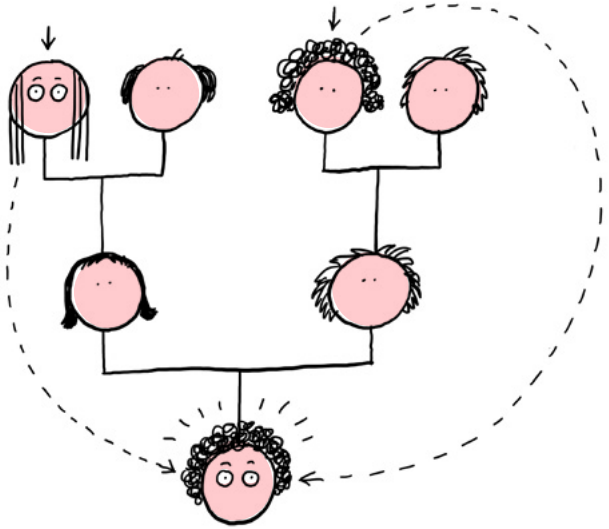
La mutation est une **erreur de copie** dans la suite des lettres (bases chimiques), lors de la multiplication cellulaire.

Elle se produit **très rarement** et **par hasard.** Environ une mutation pour 100 millions de bases apparaît à chaque génération. Chez l'humain par exemple, cela peut donner plusieurs dizaines de mutations par génération car notre génome est composé de 6,4 milliards de bases.

Selon les endroits où les mutations se produisent dans l'ADN, elles ont un effet positif, négatif ou neutre pour l'organisme. Ce dernier cas est le plus fréquent, notamment quand les mutations se produisent en dehors des zones codant pour des protéines. On dit alors que les mutations sont silencieuses, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas d'effets mesurables sur la survie de l'organisme.

Recombinaison et réarrangement: rebrasser les cartes !

Variation / Transmission / Interactions



La **recombinaison** génétique produit également de la variation. Cet événement a lieu lors de la formation des cellules sexuelles, comme les ovules, les spermatozoïdes, les spores ou les grains de pollen.

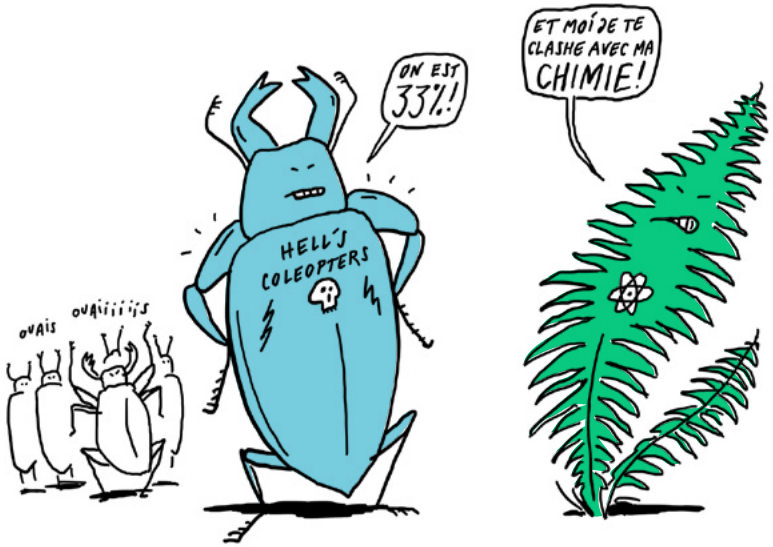
Lors de la recombinaison, **les chromosomes issus des deux parents échangent des morceaux d'ADN**. Cela crée ainsi de nouvelles combinaisons de caractères, uniques à chaque individu et qui n'existaient pas auparavant.

Il arrive parfois que des morceaux entiers d'ADN changent de chromosomes. On appelle cela un **réarrangement chromosomique**.

Un tel événement s'est produit, par exemple, *entre le génome de l'humain et celui du chimpanzé. Ces deux génomes sont similaires à 98%. Le chromosome n°2 de l'humain correspond à deux chromosomes présents chez le chimpanzé. Ils ont fusionné dans la lignée humaine après qu'elle a divergé de celle des chimpanzés.*

Duplication génique et nouvelles fonctions

Variation / Transmission / Interactions



La **duplication génique** est un mécanisme génétique aléatoire qui se produit au moment où les cellules se multiplient et que l'ADN se dédouble. La duplication génique est une **erreur de recombinaison**: un morceau d'ADN se retrouve à double dans de nouvelles cellules.

Quand cette duplication touche un gène, le gène copié peut, sous l'effet du hasard des mutations et de la sélection naturelle, acquérir une nouvelle fonction.

C'est ce mécanisme génétique *qui a probablement permis aux coléoptères* Polyphaga*, majoritairement végétariens, de devenir le groupe le plus diversifié d'insectes, comprenant 350'000 espèces. Ceci représente environ un tiers de toutes les espèces vivantes d'insectes connues aujourd'hui! Plus précisément, la duplication de certains gènes impliqués dans les fonctions de digestion ou de détoxification a permis aux* Polyphaga *de s'adapter à l'extraordinaire diversité des composés chimiques des plantes dont ils se nourrissent.*

À noter que la duplication génique peut toucher **l'entier du génome**. On parle alors de **polyploïdisation**.

Transposition

Variation / Transmission / Interactions

Le génome est mobile. Il change constamment d'une génération à l'autre, mais aussi au cours de la vie d'un organisme. Et ce changement s'opère par différents processus, comme la transposition et l'insertion d'ADN étranger.

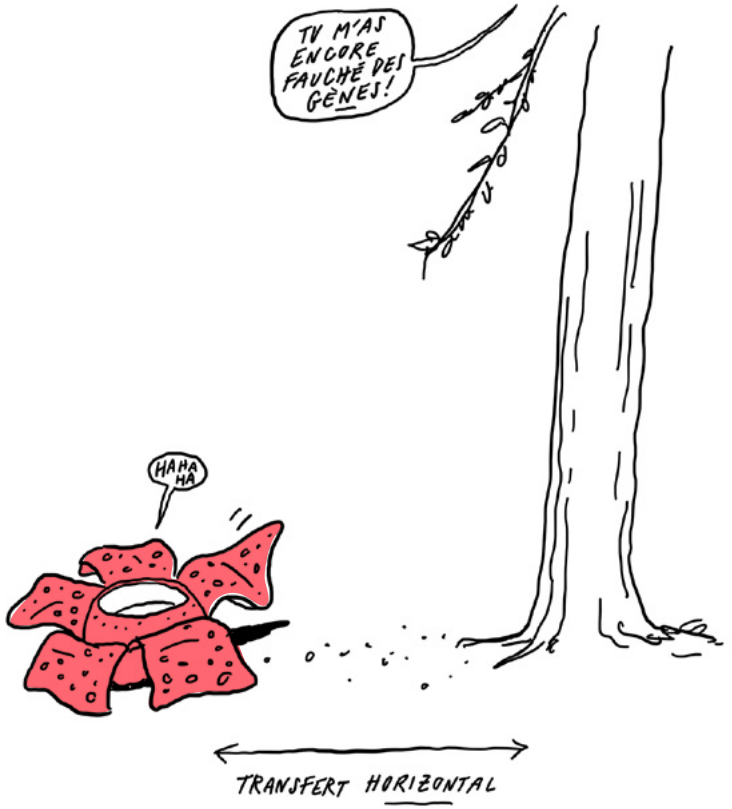
Les **éléments transposables** sont de petites séquences d'ADN qui peuvent être comparées à des **squatteurs**. Ils ont potentiellement la capacité de se multiplier et de se déplacer dans le génome de façon aléatoire, à tout moment de la vie d'un organisme.

Le plus souvent, ces éléments transposables n'ont pas d'effets visibles. Ils peuvent cependant influencer la façon dont les gènes sont exprimés, c'est-à-dire influencer leur efficacité à produire des protéines. On sait aujourd'hui que 45% du génome de l'humain et 70% de celui du maïs sont constitués d'éléments transposables.

Par exemple, la variation de couleur *des grains de maïs sur un même épi est due à des éléments transposables. Leurs mouvements au sein du génome modifient la couleur des grains.*

Insertion d'ADN étranger

Variation / Transmission / Interactions



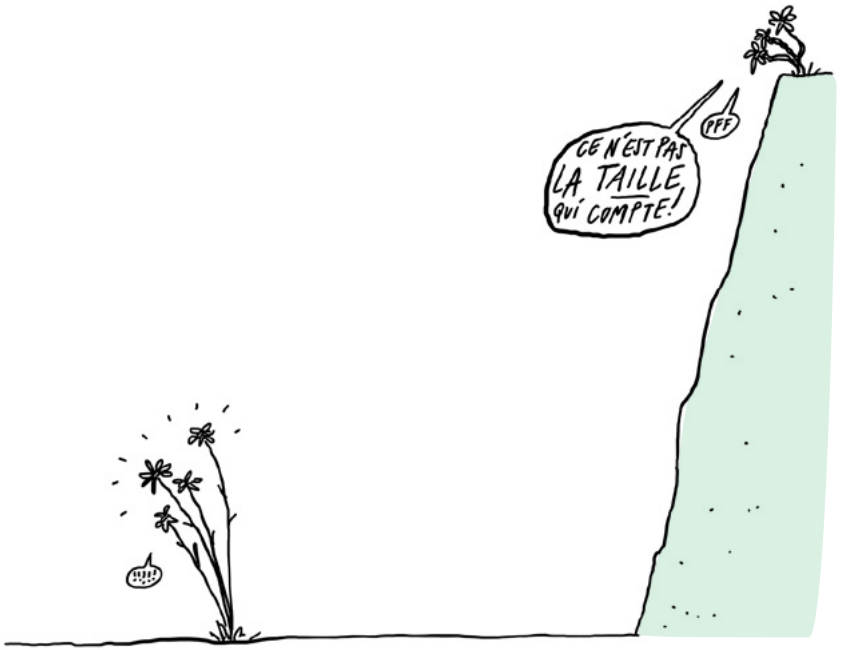
Il arrive que les organismes intègrent des morceaux d'**ADN d'autres espèces**. C'est assez commun chez les bactéries, mais on l'observe également chez les plantes et les animaux.

Grâce aux nouvelles techniques de séquençage d'ADN, on sait que ce **phénomène d'insertion est beaucoup plus courant que ce que l'on pensait jusqu'ici**. Ainsi, dans le génome humain comme dans celui d'autres organismes, on trouve, par exemple, les traces de nombreux virus s'étant introduits par le passé. Une petite partie de notre génome est donc constituée d'ADN d'origine virale.

Le parasitisme pourrait faciliter ces transferts, *comme dans le cas de la* rafflésie, *cette plante parasite d'un arbre tropical. Elle lui a emprunté environ 2% de ses gènes.*

La régulation épigenétique: de l'acquis qui dure !

Variation / Transmission / Interactions



Les variations entre individus ne s'expliquent pas uniquement par des changements génétiques. Certains changements, dits **épigénétiques**, sont influencés par l'**environnement**.

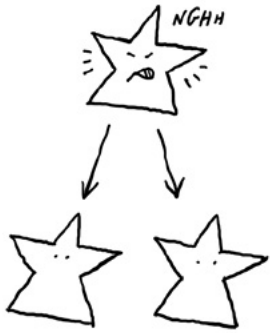
Ces changements sont dus à des **molécules qui se greffent sur l'ADN sans modifier la séquence des gènes**. En revanche, elles peuvent réguler l'utilisation d'un gène. Ces molécules peuvent changer d'emplacement dans le génome sous l'effet de l'environnement.

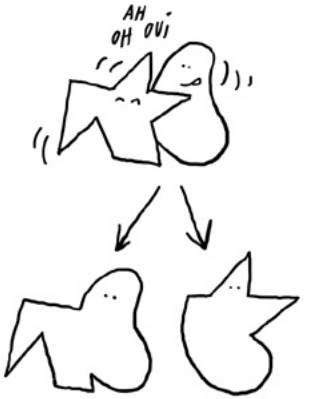
La variation épigénétique permet ainsi aux individus de s'adapter extrêmement rapidement à leur environnement. De plus, cette variation est **transmissible**, au moins sur quelques générations.

À noter que les protéines ne sont pas produites en tout temps par les gènes, bien au contraire. Bien que ces derniers soient présents dans toutes les cellules d'un organisme, chaque gène n'est utilisé que dans certaines cellules, ou à un moment donné du développement, ou encore en fonction de l'environnement. Cette utilisation est en partie régulée par l'épigénétique.

2. Transmission

Transmettre, c'est entre autres se reproduire.





Il existe plusieurs façons de fabriquer une nouvelle génération.

LE CLONAGE

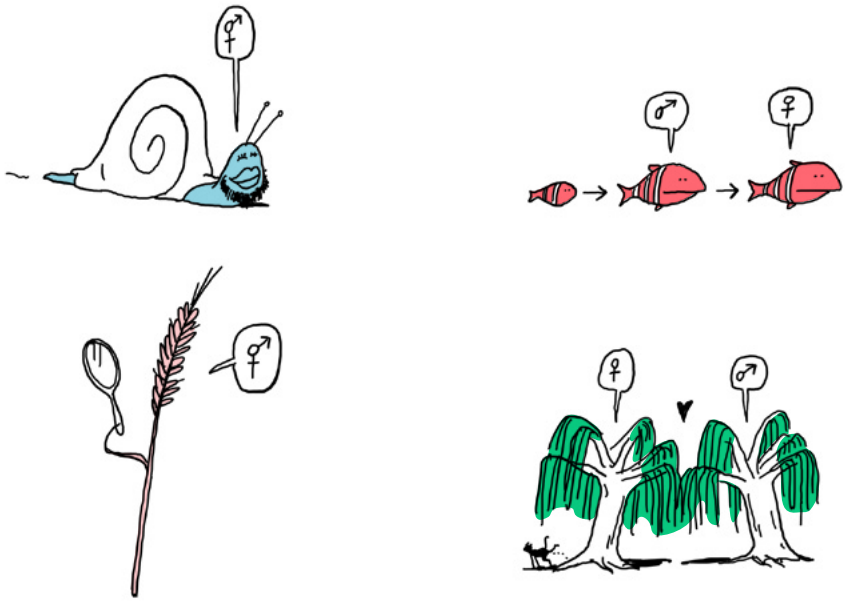
Certains organismes ne se reproduisent pas sexuellement, mais par clonage. Chaque individu se reproduit seul en créant une ou plusieurs **copies** de lui-même, à quelques mutations près, comme nous l'avons vu sur Glurb. Cette reproduction asexuée était le seul type de reproduction des êtres vivants sur Terre dans les premiers milliards d'années suivant l'apparition de la vie.

LE SEXE

La reproduction sexuée, elle, est apparue pour la première fois il y a environ un milliard d'années. Deux organismes sont alors nécessaires pour en créer un nouveau. Mais attention, le nouvel individu produit est génétiquement différent de ses deux parents. En effet, la reproduction sexuée mélange les gènes des deux lignées parentales, ce qui crée de **nouvelles combinaisons uniques**. C'est la force de la sexualité par rapport au clonage: elle apporte la nouveauté.

À noter que chez certaines espèces d'animaux et de plantes, l'évolution du sexe s'accompagne également de l'apparition de chromosomes sexuels, prédéterminant la nature mâle ou femelle des individus. En revanche, chez d'autres animaux comme les tortues, ou d'autres plantes comme les prêles, c'est l'environnement qui détermine le sexe: la température pour les tortues et la lumière pour les prêles.

Le sexe: une infinie variété

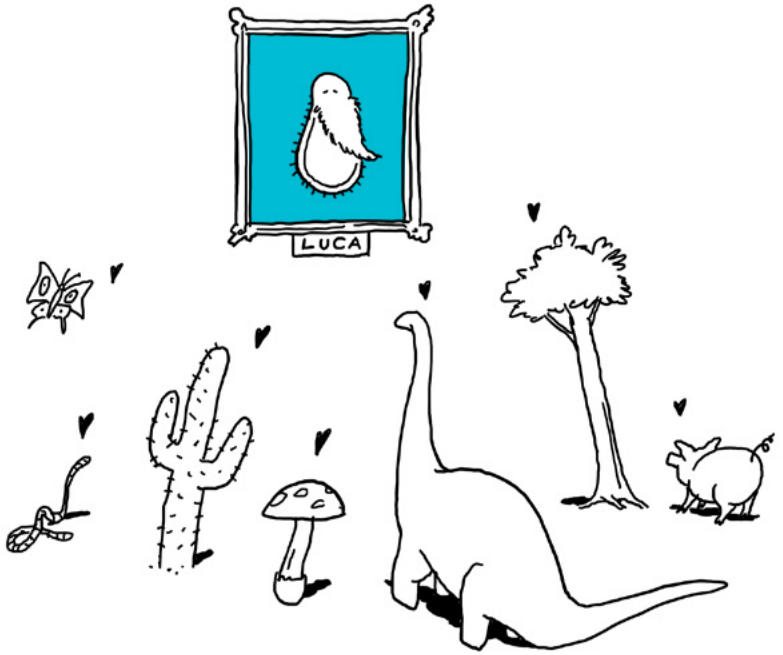


La **reproduction asexuée** est associée à l'origine de la vie et, aujourd'hui encore, de nombreux organismes se reproduisent de cette manière. Elle n'est pas réservée aux organismes simples. De nombreuses plantes et animaux la pratiquent à partir d'ovules non fécondés. Chez les plantes, on parle alors de **reproduction apomictique**: c'est le cas de la banane et des pissenlits par exemple. Chez les animaux, on parle de **parthénogénèse**: c'est ainsi que sont engendrées les abeilles mâles. Ce mode de reproduction existe aussi chez certains vertébrés, comme les poissons, les amphibiens et les reptiles.

Chez les organismes qui pratiquent la reproduction sexuée, le sexe est inventif. Par exemple:

- *les poissons-clowns sont d'abord mâles, puis deviennent femelles au cours de leur vie, comme les huîtres.*
- *les escargots sont en même temps mâle et femelle. Ils sont dits «hermaphrodites». Il leur faut cependant un autre individu pour se reproduire.*
- *les blés sont aussi hermaphrodites, mais ils peuvent s'autoféconder.*
- *les saules sont soit mâles, soit femelles.*

L'origine de la vie



On ignore combien de fois la vie est apparue sur Terre. Mais on sait aujourd'hui que tous les êtres vivants habitant notre planète sont issus d'un **même ancêtre commun**, que l'on prénomme «**LUCA**», pour **L**ast **U**niversal **C**ommon **A**ncestor (dernier ancêtre commun universel).

On pense aujourd'hui que **LUCA** était composé d'ARN, une molécule proche de l'ADN, ou de quelque chose de ressemblant et aujourd'hui disparu. Cet ARN était intégré dans une enveloppe de petites molécules de graisse. Ces petites sphères permettaient de séparer le milieu interne du milieu externe.

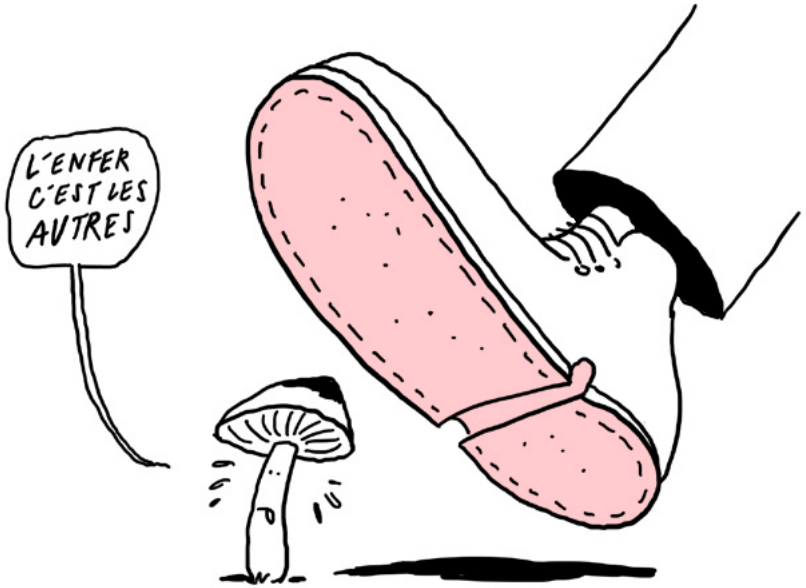
En étudiant les relations entre les organismes connus aujourd'hui, on a établi que **LUCA ressemblait probablement à une bactérie primitive**, ou à une population de telles bactéries. **LUCA** aurait vraisemblablement trouvé son origine dans les sources thermales du fond des océans. Il aurait utilisé l'hydrogène, le gaz carbonique et le fer pour fabriquer son énergie et se nourrir. Un tel environnement ne reçoit pas la lumière du soleil; la vie a donc pu se développer sans elle.

Et dire qu'Encélade, un satellite de Saturne, possède un océan d'eau liquide sous sa croûte de glace! On sait même depuis peu que des sources thermales s'y trouvent.

Et les exoplanètes? Ces planètes tournant autour d'autres étoiles que la nôtre nous réservent peut-être, elles aussi, quelques surprises.

3. Interactions

On l'a compris, la variation est partout, des molécules aux organismes. Cette variation, si elle est transmise, est soumise à différentes interactions qui conditionnent son organisation, son maintien et sa disparition.



La **sélection naturelle**, la **dérive génétique** et la **migration** découlent de toutes les **interactions** qui existent entre les différents organismes, ainsi qu'entre les organismes et leur environnement.

La sélection naturelle: pas forcément celle du plus fort

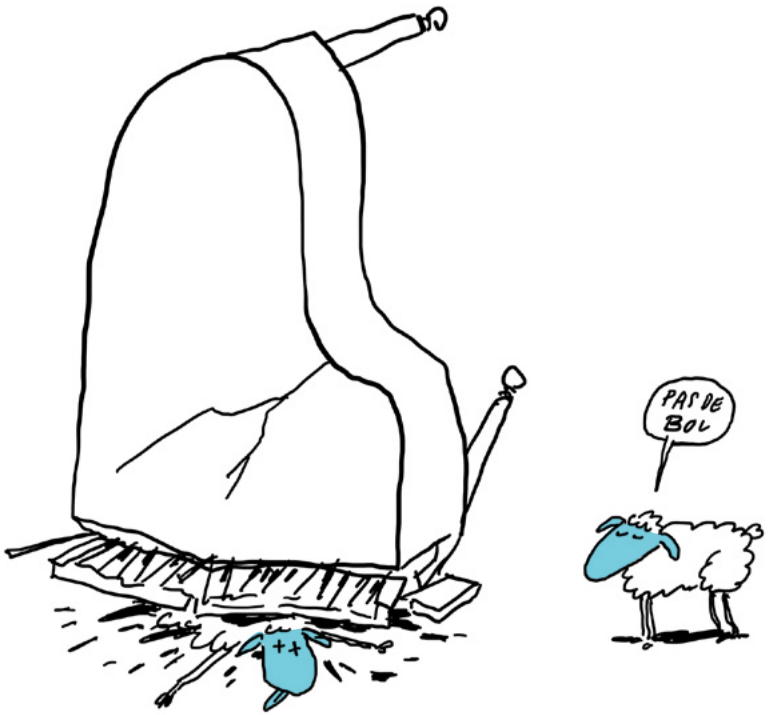
Le message de **Charles Darwin** à propos de la sélection naturelle a souvent été mal compris. Pour beaucoup, la sélection naturelle favorise forcément le plus fort. Mais c'est faux. Il y a bien d'autres façons de laisser plus de descendants à la génération suivante que d'être le plus fort. Par exemple en coopérant.

Les organismes ayant plus de chances de survivre et de se reproduire seront ceux qui transmettront leurs caractéristiques à la génération suivante. Cependant, un organisme peut être apte dans un milieu et à un temps donné, et complètement inapte ailleurs ou à un autre moment.

La sélection naturelle ne modifie pas les gènes eux-mêmes, mais la proportion de leurs différents variants dans les populations. Ainsi, au fil des générations, la sélection va tendre à diminuer la proportion des variants génétiques qui désavantagent leurs porteurs et donc augmenter la proportion des autres; simplement parce que les premiers auront moins de chances de se reproduire que les derniers. À noter que **la sélection artificielle**, c'est-à-dire effectuée par l'humain pour produire notamment des races d'animaux ou des variétés de végétaux adaptés à son usage, fonctionne selon le même principe.

Lézard *Podarcis sicula* sur une île de la mer Adriatique. *En 1971, cinq couples de lézards ont été introduits par des chercheurs sur une île de l'Adriatique. En quelque 30 générations et 33 ans plus tard, des modifications importantes ont été constatées chez les descendants de ces cinq couples: passage à un régime alimentaire herbivore et développement d'une symbiose avec des microorganismes facilitant la digestion de la cellulose, pattes raccourcies et tête plus haute et plus puissante.*

La dérive génétique : l'influence du hasard



La **dérive génétique** est l'effet du **hasard** sur la composition des populations, plus exactement sur la fréquence de leurs variants.

Plus la taille de la population est petite, plus les effets de la dérive génétique sont importants et rapides. Si un individu appartenant à une population de 10 individus meurt par accident avant de s'être reproduit, c'est un dixième de la variation génétique totale de la population qui disparaît. S'il fait partie d'une population de 1000 individus, ce n'est qu'un millième qui disparaît! La dérive génétique peut également contrecarrer l'effet de la sélection naturelle et faire que certains variants de gènes perdurent dans une population, même s'ils sont désavantageux. De la même façon, des variants favorables peuvent disparaître.

Tout est-il vraiment parfaitement adapté ?

Si un individu est adapté à un moment donné, cela ne veut pas dire que sa descendance le restera forcément si le milieu change. **Les individus les moins bien adaptés à leur milieu seront éliminés par la sélection naturelle, mais cela ne veut pas dire que ceux qui restent le sont parfaitement**.

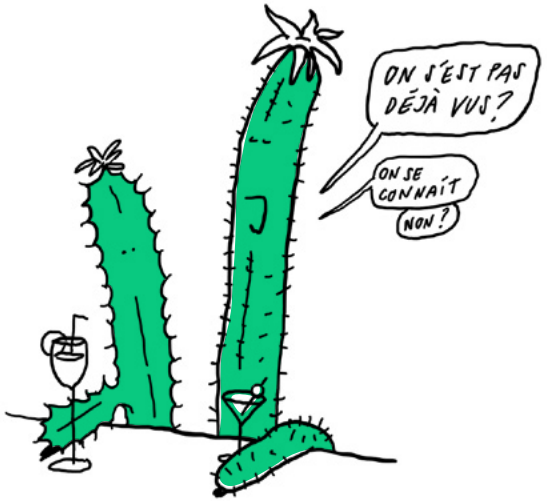
Prenons l'exemple de l'assimilation du sucre chez les êtres humains. *Durant des milliers d'années, il était difficile de trouver du sucre. Il était donc avantageux d'avoir un métabolisme qui l'assimilait rapidement. Aujourd'hui, en revanche, on trouve du sucre partout. Cette faculté à assimiler le sucre devient un inconvénient. L'épidémie d'obésité et de diabète se propage. Ce qui était auparavant un avantage s'est aujourd'hui transformé en inconvénient.*

Et comme nous l'avons vu, la sélection naturelle est parfois contrecarrée par la dérive génétique. Cela arrive notamment quand les individus ne sont pas très nombreux au sein d'une population. Des individus moins bien adaptés peuvent survivre simplement du fait du hasard.

Ainsi, un **environnement changeant** et **l'effet du hasard** expliquent en partie pourquoi tous les organismes ne sont pas parfaitement adaptés à leur milieu. Par ailleurs, la solution optimale n'a peut-être jamais existé!

Semblables mais différents: convergences évolutives

Variation / Transmission / **Interactions**



La sélection naturelle aboutit parfois à des formes semblables chez des organismes très différents. **Des espèces peuvent ainsi se ressembler sans être pour autant apparentées**. On parle alors de convergences. Elles sont dues à l'effet de contraintes environnementales similaires sur des organismes différents.

Par exemple, **les cactus** et **les euphorbes** sont des groupes de plantes ayant des histoires évolutives distinctes, tout en se ressemblant beaucoup morphologiquement.

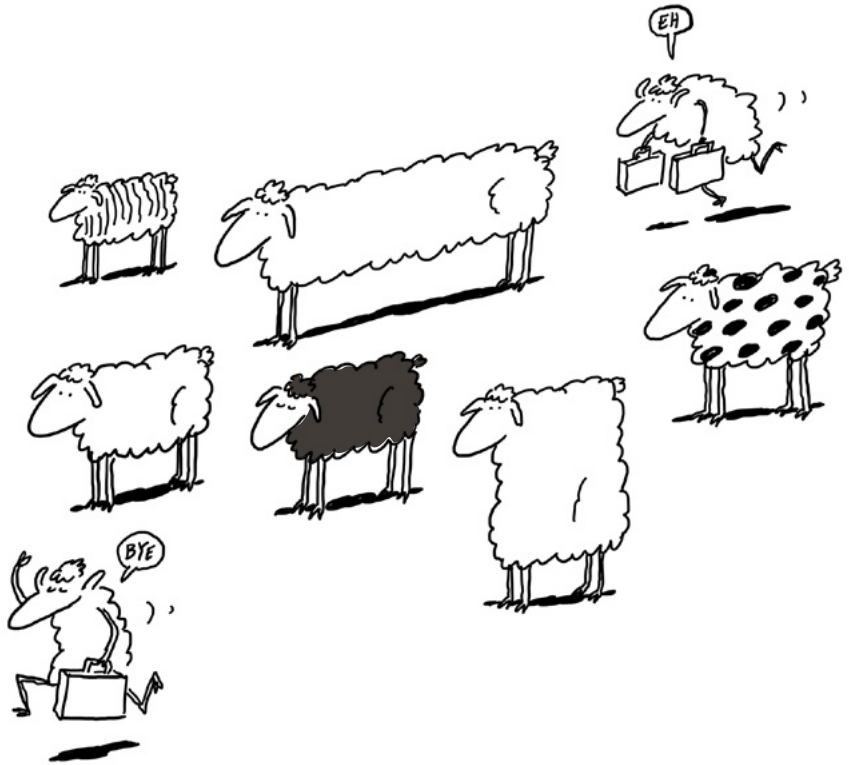
Ils présentent chacun des espèces en chandelles avec des épines. Mais leurs répartitions sont très dissemblables: les cactus se sont diversifiés quasi exclusivement dans les Amériques, alors que les euphorbes en chandelles sont surtout présentes en Afrique.

Ces deux groupes ont divergé il y a plus de 100 millions d'années, bien avant la disparition des dinosaures!

Les exemples de convergence évolutive sont très nombreux. *On peut citer chez les oiseaux, par exemple, les condors des Andes et les vautours fauves, qui ont divergé il y a 80 millions d'années. Chez les mammifères, les souris marsupiales et les soricidés (groupe comprenant la plupart des musaraignes) ont divergé il y a 160 millions d'années. Les thylacines (ou loup de Tasmanie) et les canidés (la famille du loup, du renard ou encore du fennec) ont également divergé au même moment. Chez les insectes, les mantispes de Styrie et les mantes religieuses ont divergé il y a 360 millions d'années.*

La migration ou comment modifier les populations

Variation / Transmission / **Interactions**



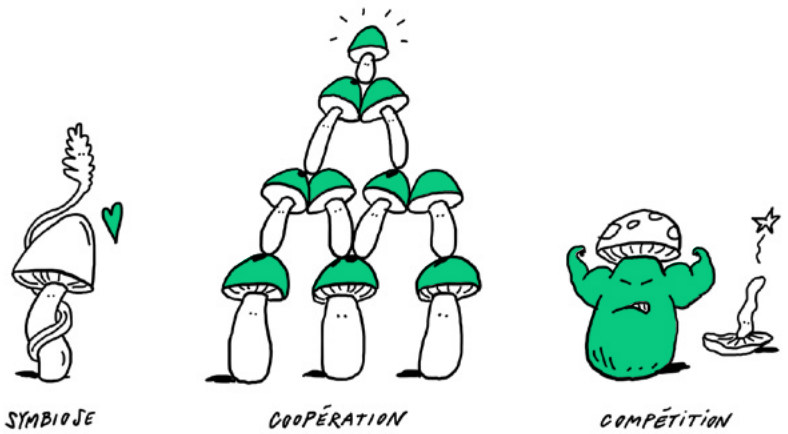
La **migration** est le fait d'**individus, de graines ou de pollens qui se déplacent**. Chez les plantes, les graines ou le pollen se déplacent grâce au vent, à l'eau ou encore accrochés aux animaux. Mais la migration a des limites. Il faut que les individus puissent survivre dans leur nouveau milieu. La température, l'humidité et la compétition avec les autres espèces sont des exemples de facteurs limitants.

La migration permet d'apporter de nouveaux variants là où les migrants s'installent. Elle a en général pour résultat de modifier la fréquence des variants dans les populations.

Elle a aussi pour conséquence de **réduire les différences entre populations**, tout en créant des populations plus grandes et plus variées. Donc potentiellement plus résistantes aux changements.

Symbiose / Coopération

Variation / Transmission / **Interactions**



On retient souvent de l'évolution qu'elle équivaut à la survie du «plus fort». Cependant, si la compétition entre individus de la même espèce ou d'espèces différentes joue un rôle important, l'entraide, la coopération et la symbiose sont des types d'interaction tout aussi essentiels dans la diversification et la survie des organismes vivant sur notre planète.

Au sein d'une même espèce

On parle ici d'**entraide** et de **coopération** dont il existe de nombreux exemples, notamment chez les espèces dites sociales, comme les primates, les dauphins ou les fourmis. Les marmottes, par exemple, se relaient pour monter la garde autour du terrier.

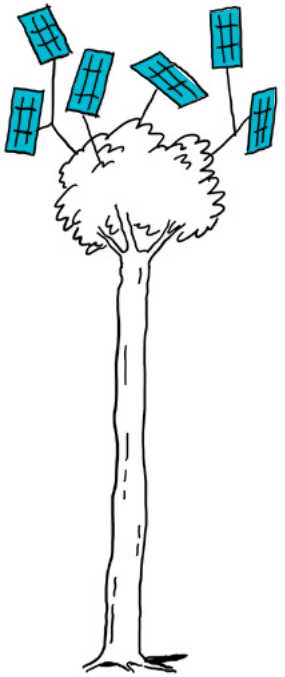
Entre espèces

La **symbiose** se définit très largement comme le **«vivre ensemble durable»** de deux ou plusieurs organismes différents. Lorsque chacun des organismes symbiotiques en tire des bénéfices, on parle de mutualisme. Les lichens en sont un exemple classique. Ce sont des champignons qui obtiennent leur nourriture en vivant en symbiose avec des algues vertes microscopiques. Le champignon constitue la «maison» protégeant l'algue et cette dernière «paie son loyer» au premier sous la forme de sucres qu'elle fabrique en utilisant l'énergie du soleil, l'eau et le gaz carbonique par la photosynthèse.

On réalise actuellement que la symbiose se rencontre partout dans l'arbre de la vie. Les organismes se font littéralement la **«courte échelle». Ce sont des collectifs qui évoluent et non des individus isolés**. *Ainsi, par exemple, les micro-organismes qui colonisent notre intestin, notre peau et nos muqueuses (le microbiote) sont aussi nombreux que l'ensemble des cellules de notre corps. Certains ne font que passer, alors que d'autres, plus spécifiques et essentiels à notre survie, nous ont accompagnés durant toute notre évolution. Nous sommes de véritables écosystèmes microbiens –des holobiontes– et il en est de même pour la grande majorité des organismes multicellulaires vivant sur notre planète.*

Deux symbioses révolutionnaires

Variation / Transmission / **Interactions**



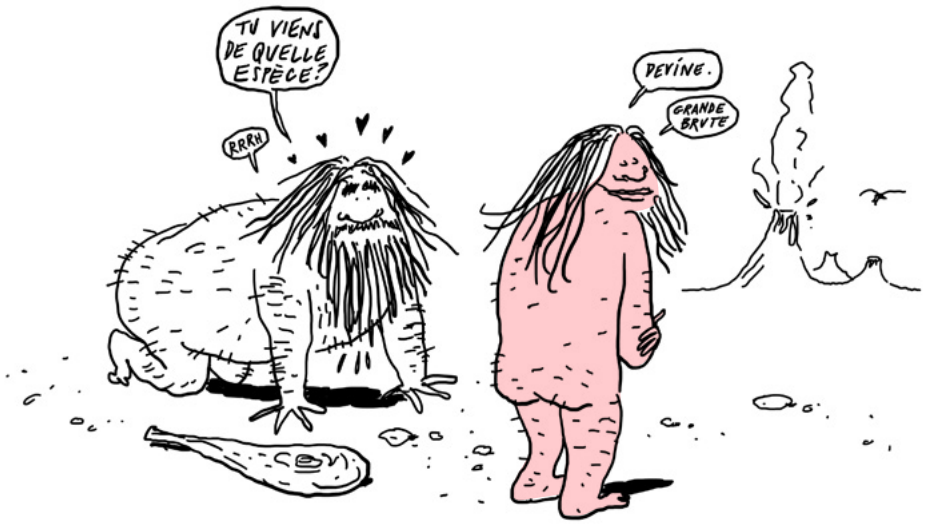
Apparition des usines énergétiques: les mitochondries

Il y a environ deux milliards d'années, dans l'eau, une bactérie s'est fait piéger à l'intérieur d'une cellule hôte primitive ou primordiale. Au cours de l'évolution, cette bactérie s'est transformée en une «petite usine» –appelée **mitochondrie**– spécialisée dans la production d'énergie pour la cellule hôte. Cette symbiose a donné naissance au grand groupe d'organismes auquel nous appartenons: les eucaryotes. Ainsi, quasi toutes les plantes, les champignons et les animaux ont aujourd'hui, dans chacune de leurs cellules, des mitochondries les approvisionnant en énergie grâce à l'oxygène absorbé au cours de la **respiration**. C'est l'émergence des mitochondries qui a vraisemblablement permis l'apparition au cours de l'évolution des organismes complexes que nous connaissons aujourd'hui.

Apparition des panneaux solaires intégrés: les chloroplastes

Quelques centaines de millions d'années plus tard, toujours dans l'eau, un événement similaire a donné naissance aux organismes qui allaient être à l'origine de tous les végétaux que nous connaissons aujourd'hui. Une bactérie capable d'utiliser l'énergie solaire pour transformer le gaz carbonique de l'atmosphère et l'eau en sucres, tout en rejetant de l'oxygène, s'est à son tour retrouvée piégée à l'intérieur d'une cellule eucaryote. Au cours de l'évolution, cette bactérie s'est transformée en panneau solaire intégré –le **chloroplaste**– permettant cette chaîne de réactions appelée **photosynthèse**. C'est ainsi qu'aujourd'hui tous les végétaux, arbres, herbes, mousses et algues, sont capables de photosynthèse et peuvent ainsi synthétiser des sucres, tout en produisant de l'oxygène.

L'espèce: parfois difficile à reconnaître



Décrire des espèces est très utile pour nommer et classer les êtres vivants: un cheval, une mouche, un edelweiss. Il est cependant difficile d'avoir une définition de l'espèce qui s'applique à tous les organismes. En général, on reconnaît l'espèce à un moment donné comme un ensemble de populations dont les individus sont capables de **se reproduire les uns avec les autres** en donnant une **descendance viable et fertile**. Cependant, certaines espèces bien reconnaissables ne se reproduisent presque jamais sexuellement. C'est le cas des pissenlits, de nombreux lichens, et de certains vers et insectes. Chaque critère a ses limites et nombre d'espèces restent difficiles à cerner.

Par exemple, on sait aujourd'hui que la grande majorité des espèces végétales peut s'hybrider avec des espèces proches. Elles bénéficient ainsi d'un apport de nouveaux variants, potentiellement utiles pour de futures adaptations.

On se rend compte maintenant que ce phénomène est également beaucoup plus fréquent chez les animaux que ce que l'on imaginait.

Chez l'humain par exemple, *notre génome d'*Homo sapiens *garde des traces d'hybridation avec les Hommes de Néanderthal et les Hommes de Denisova, deux espèces que nous avons côtoyées en Eurasie et qui ont disparu il y a 30 à 40'000 ans.*

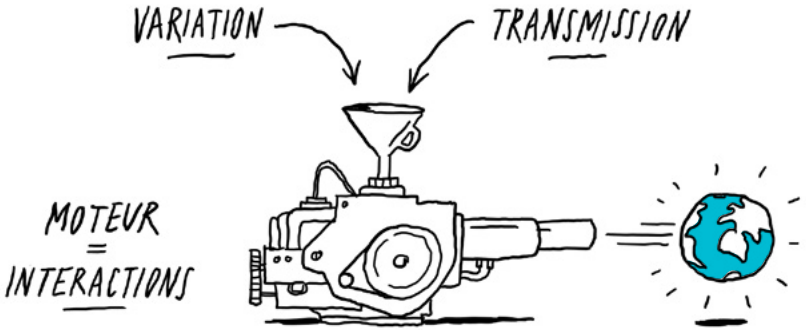
Comment les espèces apparaissent-elles ?

Imaginez une population d'une espèce. Elle se sépare en deux populations, parce que deux continents se sont détachés l'un de l'autre, ou parce qu'une chaîne de montagnes s'est érigée. Par conséquent, ces populations ne sont plus en contact et ne peuvent plus se reproduire entre elles.

Chacune d'entre elles va alors évoluer de manière indépendante à la faveur des mutations qui seront retenues ou éliminées du fait de la sélection naturelle et de la dérive génétique. Si les deux populations restent séparées suffisamment longtemps, les différences seront telles qu'elles ne pourront plus se reproduire entre elles, même si elles se rencontrent à nouveau. Nous devrons alors les appeler différemment. Cela peut aussi se passer au même endroit, du fait d'adaptations ou de comportements différents.

C'est ce qui se passe avec *Rhagoletis pomonella*, *une mouche américaine dont les larves se développaient exclusivement sur les aubépines américaines. Depuis l'introduction de la pomme européenne en Amérique du Nord, certains variants de cette mouche ont acquis, par mutations, la capacité de s'y développer. Deux populations de mouches ont ainsi commencé à se différencier il y a un peu plus d'un siècle. Comme les pommes mûrissent un mois plus tôt que les fruits de l'aubépine, la saison de développement de ces deux populations de mouches s'est décalée. Elles ne se rencontrent quasi plus, et n'échangent donc plus de gènes. Nous assistons actuellement à la formation d'une nouvelle espèce!*

Ce que nous dit l'évolution



L'évolution est à l'origine de toute la diversité du vivant telle que nous la voyons actuellement. Seule une infime partie de ce qui a existé perdure aujourd'hui, car les espèces naissent et s'éteignent lorsqu'elles ne sont plus suffisamment adaptées à leur milieu. C'est ce qui se passe en tout temps, et plus particulièrement lors d'extinctions de masse.

Celle que nous traversons aujourd'hui est liée à l'action de notre espèce, mais elle fait suite à au moins cinq autres, survenues depuis 500 millions d'années. Ces extinctions de masse ont vraisemblablement été causées par du volcanisme massif ou par des météorites qui ont percuté la Terre.

L'évolution a une grande part de hasard. Si les conditions prévalant il y a plus de 3,5 milliards d'années étaient à nouveau réunies, un monde très différent du nôtre existerait maintenant.

L'évolution est une combinaison de coopération entre individus et d'interactions symbiotiques entre espèces, mais aussi de compétition, de prédation et de parasitisme.

L'évolution n'est ni morale ni prédictible. Ni belle ni moche. Elle ne mène jamais à la perfection et tend vers une adaptation minimale des organismes à leur milieu. Elle fait feu de tout bois et s'apparente parfois à du bricolage.

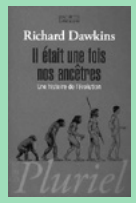
Il n'y a pas d'organismes plus évolués ou moins évolués, mais simplement des organismes plus ou moins bien ajustés à leur milieu. L'évolution est fascinante par la diversité des formes qu'elle a pu produire.

Nous avons aujourd'hui un impact immense sur cette biodiversité. En prendre soin et la préserver revient à prendre soin de nous-mêmes. Nous en avons tant besoin!

Pour aller plus loin

Tous entrelacés! Des gènes aux super-organismes: les réseaux de l'évolution.
BAPTESTE Eric
(2017). Éditions Belin

La Nature est-elle bien faite? Sous la direction de BRETON Cécile (2016).
Le Cavalier Bleu éditions



Il était une fois nos ancêtres: Une histoire de l'évolution.
DAWKINS Richard
(2007). Robert Laffont

Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations.
SELOSSE Marc-André
(2017). Actes Sud

Descendons-nous de Darwin?
LECOINTRE Guillaume
(2015). Éditions le Pommier

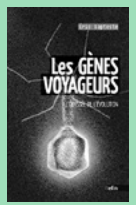
L'évolution, question d'actualité?
LECOINTRE Guillaume
(2014). Quae éditions

Darwin et les grandes énigmes de la vie.
GOULD Stephen J.
(1997). Éditions du Seuil

Un hérisson dans la tempête.
GOULD Stephen J. (1994).
Éditions Grasset

Le jeu des possibles.
JACOB Francois
(2009). Éditions J'ai lu

L'origine des espèces
DARWIN Charles (2009).
Éditions Honoré Champion



Les gènes voyageurs L'odyssée de l'évolution
BAPTESTE Eric
(2013). Éditions Belin

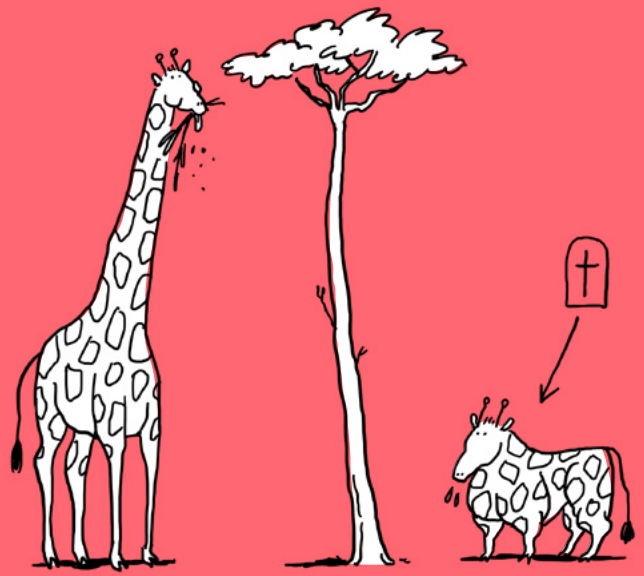
Pour les amateurs de vidéos

Dirty Biology
www.youtube.com/user/dirtybiology/videos

PBS Eons
www.youtube.com/channel/UCzR-rom72PHN9Zg7RML9EbA

Primer
www.youtube.com/channel/UCKzJFdi57J53Vr_BkTfN3uQ

RTS Découverte
www.rts.ch/decouverte-evolution



Impressum
Graphisme et illustrations : Atelier Poisson
Impression : Coprint, papier FSC

Comprendre l'évolution, c'est comprendre ce qui nous entoure, mieux respecter et protéger l'extraordinaire biodiversité qui peuple notre planète.

Conservatoire et Jardin botaniques Genève

RTS Découverte

Bioscope UNIGE

Muséum genève

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

VILLE DE GENÈVE