

Un parcours pour enseigner la théorie de Darwin dans la Grande Galerie de l'Evolution du Muséum national d'Histoire naturelle

En rouge, il est fait référence entre guillemets aux arrêts proposés dans la visite virtuelle de la plateforme de formation en ligne des enseignants

A différentes étapes de sa conception, ce parcours a bénéficié des conseils de Pierre-Henri Gouyon, Guillaume Lecoindre et de Pascal Tassy pour les aspects scientifiques ; ainsi que de ceux de Sophie Mathé et Sophie Mouge pour les aspects pédagogiques.

Objectifs et contenus de la visite

L'objectif de cette visite est de mettre en évidence l'évolution des espèces par sélection naturelle telle que l'a proposée Charles Darwin dans l'ouvrage *L'origine des espèces* paru en 1859. Nous proposons ici une démarche méthodique permettant de construire pas à pas les différents éléments de la théorie, en tenant compte des exigences des programmes scolaires et à l'aide d'un discours pouvant être appréhendé par les élèves.

L'évolution n'est pas une discipline qui s'enseigne à l'aide « du tableau noir et de la craie ». Pour comprendre la théorie de l'évolution, il faut observer, décrire et comparer des organismes ainsi que leurs milieux de vie. Pour cela, nous utiliserons les éléments muséologiques présents à la Grande Galerie de l'Evolution (GGE). Notre démarche permettant de comprendre la théorie de l'évolution s'appuie donc sur de nombreux exemples exposés à la GGE.

« Arrêt 1 : Maquette de la Grande Galerie de l'Evolution »

La GGE comporte 4 niveaux : le rez-de-chaussée et le premier étage exposent la diversité des organismes dans leur environnement respectif. Le deuxième étage présente l'impact de l'homme sur la nature et le 3^{ème} étage montre des spécimens illustrant l'évolution des espèces. Lors de cette visite, nous allons parcourir ces 4 niveaux, en nous arrêtant à chaque fois devant des vitrines particulièrement pertinentes dans le cadre de notre objectif.

En primaire

Le contenu de la visite est en lien direct avec plusieurs éléments présents dans le **programme du cycle 3**. En effet, la théorie de l'évolution permet d'expliquer trois grandes notions qu'il est demandé de transmettre aux élèves. En premier lieu, le programme stipule que les élèves doivent « *parvenir à une première approche de la notion d'évolution à partir de l'**unité** et de la **diversité** du vivant* ». Par ailleurs, les élèves doivent « *savoir qu'il existe une interaction entre les organismes et leur milieu de vie* ». Autrement dit, ils doivent appréhender le fait que les organismes sont **adaptés** à des conditions de vie particulières.

Lors de cette visite, nous allons mettre en évidence ces trois faits que sont l'unité, la diversité et l'adaptation des êtres vivants à l'aide d'exemples démonstratifs présentés à la GGE. D'autre part nous allons voir comment la théorie d'évolution par sélection naturelle permet d'expliquer ces trois faits.

Enfin, le programme indique que les élèves doivent « *savoir pratiquer une démarche d'investigation : formuler une hypothèse et chercher à la valider [...] distinguer le **savoir scientifique** de ce qui relève d'une **opinion*** ». Ainsi, pour chaque observation nous prendrons le soin d'adopter une démarche propre à la méthodologie scientifique : description des faits (c'est-à-dire l'unité, la diversité et l'adaptation des organismes à leur milieu de vie) ; proposition des hypothèses permettant d'expliquer ces faits ; et recherche de nouveaux faits permettant de choisir parmi les différentes hypothèses celle qui est la plus plausible.

Au collège et au lycée

Cette visite permet d'«*observer, de recenser et d'organiser des informations afin d'étayer la théorie de l'évolution* » (B.O. de 3^{ème} du 28 août 2008).

Au cours de cette visite, nous vous proposons de mettre en évidence **l'unité**, la **diversité** et **l'adaptation** des êtres vivants et de voir comment la théorie de l'évolution par sélection naturelle permet d'expliquer ces trois faits, à l'aide d'exemples démonstratifs présentés à la GGE.

Cette visite est aussi l'occasion pour les élèves de développer une « *démarche d'investigation* » : pour chaque observation une méthodologie hypothético déductive propre aux sciences sera développée :

- Observation des faits (c'est-à-dire l'unité, la diversité et l'adaptation des organismes à leur milieu de vie).
- Proposition d'hypothèses pour expliquer ces faits.
- Déduction des conséquences possibles à partir des différentes hypothèses.
- Observation de nouveaux faits permettant de choisir parmi les différentes hypothèses celle qui est la plus plausible.

L'*approche historique* des travaux de Darwin est aussi un atout fort qui permet à l'élève de se construire une solide connaissance scientifique sur l'évolution des espèces par sélection naturelle. En terminale S, cette visite permet aussi, à l'aide de l'exemple de la phalène du bouleau ou des coquilles des escargots des haies, d'illustrer les relations entre mécanismes de l'évolution et génétique.

Les questions qui seront soulevées au cours de cette visite et auxquelles nous apporterons les réponses sont donc :

Comment l'unité, la diversité et l'adaptation des organismes à leur milieu sont expliquées grâce à l'évolution des espèces par sélection naturelle ?

Quel est le raisonnement scientifique qui permet de formuler ces explications ?

Arrêt 2 : Mise en évidence de l'unité et de la diversité du vivant (1)
« Des membres tous pareils, tous différents ? »

Ce panneau présente les membres antérieurs de différents animaux : deux oiseaux (manchot et huîtrier) et trois mammifères (dauphin, chauve-souris et martre). La description des spécimens de cette vitrine constitue un premier exemple afin d'appréhender l'unité et la diversité des êtres vivants. Commençons par décrire les différents os qui constituent le membre de la martre, de la gauche vers la droite dans la vitrine. La structure la plus à gauche est la ceinture scapulaire. Elle est suivie d'un seul os : l'humérus, puis de deux os : le radius et le cubitus, puis des carpes, du métacarpe et des phalanges. Si l'on décrit maintenant les membres des autres animaux présentés dans la vitrine, on retrouve tous ces os assemblés dans le même ordre. On met donc ici en évidence une unité au sein de ces animaux présentés : tous ont des membres antérieurs constitués de ces pièces osseuses assemblées dans le même ordre. Si l'on regarde maintenant plus en détail chacun des os, et qu'on les compare d'une espèce à l'autre, on s'aperçoit qu'ils présentent des différences. Par exemple, la chauve souris a des phalanges relativement grandes par rapport à celles de la martre. Il y a donc une diversité au sein du vivant.

Nous avons mis en évidence une unité au sein de ces différents animaux. A l'intérieur de cette unité, il y a une diversité. Maintenant nous pouvons nous questionner sur les causes de cette unité et de cette diversité. Comment l'expliquer ? C'est le moment de proposer différentes hypothèses pour rendre compte de ce fait. En effet, différentes explications peuvent venir à l'esprit. Nous pouvons toutes les garder pour le moment et nous verrons au cours de la visite des éléments qui nous permettront de trancher entre ces hypothèses :

- Hypothèse 1 : Ces animaux ont des membres similaires car ils font la même chose avec leurs membres. Autrement dit, l'usage d'un membre modifierait sa structure. Si ces animaux font des usages similaires de leurs membres alors ils se ressemblent. Il y a une diversité entre les organismes car ils ne font pas tous exactement la même chose.
- Hypothèse 2 : Ces animaux ont des membres similaires car ils vivent dans un environnement similaire. Autrement dit, le milieu dans lequel vit un organisme modifie directement sa structure. Il y a une diversité entre les organismes car ils ne vivent pas tous exactement dans le même environnement
- Hypothèse 3 : Ces animaux ont des membres similaires car ils descendent tous d'un unique ancêtre commun. Autrement dit, ils ont donc tous hérité de la même structure de base (on parle d'homologie secondaire). Il y a une diversité entre les organismes car au cours des générations, les différentes lignées issues de l'ancêtre commun ont acquis de légères modifications, faisant que certains ont un membre en forme d'aile, d'autres en forme de nageoire ou encore en forme de patte.

Une autre proposition peut venir à l'esprit pour expliquer l'unité et la diversité du vivant. Il s'agit de l'explication créationniste suivant laquelle l'unité et la diversité du vivant résultent d'une volonté divine. Cette explication ne peut être considérée comme une hypothèse car cela signifierait qu'elle rentre dans un cadre scientifique. Or, cette explication ne peut pas rentrer dans notre démarche scientifique. En effet, depuis un peu plus de deux siècles, par contrat, un scientifique ne peut pas faire appel à un élément surnaturel (Dieu) pour expliquer les phénomènes de la nature. Le scientifique se donne pour objectif d'expliquer les phénomènes observés dans la nature à l'aide d'autres observations faites dans la nature. Toute explication surnaturelle s'écarte d'une démarche scientifique car elle peut donner une réponse à toutes les observations d'entrée de jeu. Il ne serait donc pas nécessaire de mener une recherche scientifique.

Dans le cadre de cette visite nous cherchons justement à conduire une démarche scientifique pour expliquer les faits observés. Nous verrons donc par la suite les éléments permettant de trancher entre nos différentes hypothèses. Mais avant cela, voyons d'autres exemples permettant de mettre en évidence l'unité et la diversité au sein du vivant.

**Arrêt 3 : Mise en évidence de l'unité et de la diversité du vivant (2)
« *Des oursins tous pareils, tous différents ?* »**

Cette vitrine présente, entre autres, plusieurs espèces faisant partie du groupe des échinodermes. Toutes ont une symétrie pentaradiée (c'est-à-dire une même structure de base répétée cinq fois) et la plupart ont une peau comportant des épines. On reconstitue donc une unité au sein de ce groupe. Parmi les espèces présentées, il est facile de constituer des sous groupes. On peut distinguer les étoiles de mer, les oursins et les ophiures. Il y a donc également une diversité à l'intérieur de ce groupe. Pour chaque sous-groupe (étoiles de mer, oursins, ophiures) les différentes espèces exposées sont toutes différentes par leur taille, leur forme ou leur couleur.

A nouveau les 3 hypothèses évoquées précédemment peuvent être proposées pour expliquer l'unité et la diversité. Gardons ces hypothèses en tête et voyons maintenant la troisième notion que doivent appréhender les élèves : l'adaptation.

Arrêt 4 : Mise en évidence de l'adaptation des êtres vivants aux milieux arctique et antarctique (1) - « *Qu'est-ce qu'une adaptation ?* »

Une adaptation est une caractéristique d'un organisme lui permettant de mieux accéder aux ressources, de mieux échapper aux prédateurs, de mieux résister aux conditions environnementales ou encore de mieux accéder aux partenaires sexuels, et donc de mieux se reproduire dans un environnement donné, par rapport à un autre individu ne possédant pas cette caractéristique. Une adaptation peut se présenter sous la forme d'un organe, d'une physiologie ou encore d'un comportement.

Les organismes vivant dans des milieux dits extrêmes permettent de bien cerner des exemples d'adaptations. Par exemple, les milieux de l'arctique et de l'antarctique présentent des caractéristiques particulières : il fait froid, la couleur dominante du paysage est le blanc, et dans certains habitats, les ressources alimentaires sont présentes de façon très sporadique. En observant les organismes présentés dans cet espace, pouvons-nous discerner des caractéristiques communes qui leurs sont propres et qui leur permettent de vivre et de se reproduire dans ce type de milieu ?

Arrêt 5 : Mise en évidence de l'adaptation des êtres vivants aux milieux arctique et antarctique (2) - « *Être adapté au milieu antarctique* »

On distingue ici trois types différents d'adaptations : anatomiques, physiologiques et comportementales.

Comme adaptation physiologique, nous pouvons relever que les animaux représentés, en particulier l'éléphant de mer et les manchots, ont une importante capacité de stockage de graisses. Ceci se remarque par la présence de tissus adipeux volumineux. Ces deux animaux passent la majeure partie de leur temps dans une eau à basse température. Or, chez ces organismes, les organes vitaux doivent rester à 37°C ou 40°C (comme chez tous les autres oiseaux et mammifères). L'épaisse couche de graisse périphérique sert de gradient de température et on peut donc supposer qu'il s'agit là d'une adaptation. Par contraste, les poissons osseux et les poissons cartilagineux n'ont pas de tissus adipeux importants et leur température interne est celle de l'eau. Nous voyons donc que, chez certains mammifères et certains oiseaux est apparue une adaptation leur permettant la vie dans les eaux froides. Il s'agit bien d'une adaptation car un mammifère ou un oiseau vivant dans de telles conditions et n'ayant cette couche de graisse protectrice dépenserait beaucoup d'énergie pour maintenir ses organes vitaux à la bonne température. Il lui resterait par conséquent moins d'énergie à consacrer aux autres fonctions vitales, par rapport à un individu disposant d'une telle couche protectrice.

Comme adaptation anatomique, nous pouvons relever que les animaux vivant dans ces milieux extrêmes sont relativement grands, par rapport à leurs congénères vivant sous des

températures plus douces. Par exemple, les manchots empereurs présentent une taille bien plus grande que d'autres espèces de manchots (par exemple le manchot adélie) vivant sous des températures plus « clémentes ». Ceci peut être considéré comme une adaptation vis-à-vis des basses températures. En effet, le principal problème rencontré par les animaux homéothermes (c'est-à-dire ceux qui sont capables de réguler leur température interne indépendamment de la température extérieure) dans les milieux froids est la perte de chaleur au travers de la surface de leur corps en contact avec l'extérieur. Or, une façon de maintenir une température interne de façon efficace, c'est d'avoir un métabolisme qui produit beaucoup de chaleur, ce qui s'obtient en étant très volumineux. Ainsi, les organismes de grande taille vivant dans des milieux froids sont favorisés par rapport à des congénères plus petits car l'augmentation du volume est la meilleure façon de minimiser son rapport surface/volume, c'est-à-dire avoir un volume le plus grand possible (donc un métabolisme important), tout en ayant une surface (c'est-à-dire des pertes de chaleur) les plus faibles possible.

Enfin, comme adaptation comportementale, on peut relever chez les manchots empereurs le fait qu'ils se regroupent en constituant des « tortues » (voir la vidéo), ce qui à nouveau minimise le contact avec l'extérieur et donc les pertes de chaleur.

Maintenant que nous avons mis en évidence des adaptations de ces organismes à leurs conditions de vie, il est temps de se demander comment expliquer le fait que les organismes soient adaptés à leur milieu de vie. A nouveau, différentes hypothèses, c'est-à-dire différentes explications possibles, peuvent venir à l'esprit :

- Hypothèse 1 : Les organismes sont adaptés à leur milieu de vie car l'usage qu'ils font de leurs organes les modifie afin qu'ils puissent mieux réaliser ce pour quoi ils sont utilisés. Suivant cette hypothèse, l'usage d'un organe crée sa fonction. Les organismes qui utilisent un organe donné pour la même fonction présentent donc des adaptations similaires pour cet organe.
- Hypothèse 2 : Les organismes sont adaptés à leur milieu de vie car les caractéristiques de l'environnement modifient directement l'anatomie, la physiologie et le comportement des organismes, ce qui rend ces différents caractères adaptés à l'environnement. Les organismes qui vivent dans les mêmes conditions de vie présentent ainsi les mêmes types d'adaptations.
- Hypothèse 3 : Les organismes sont adaptés à leur milieu de vie car ils évoluent sous l'action du processus de la sélection naturelle. Selon ce processus, des variations (qui sont provoquées par des mutations) peuvent apparaître au sein de la descendance des organismes, et c'est par l'accumulation de ces variations au cours de nombreuses générations qu'évoluent les espèces. De façon tout à fait hasardeuse, il peut arriver qu'une variation permette à l'individu qui la porte de mieux survivre, et donc de se reproduire de façon plus abondante que les autres dans un environnement donné (parce que cette variation lui permet par exemple de mieux résister au froid). Si cette variation est héréditaire, à la génération suivante, la descendance de cet individu est donc plus nombreuse et remplace alors celle des autres individus de la population. Les organismes qui vivent dans les mêmes conditions de vie présentent donc les mêmes types d'adaptation car c'est le même type de variation qui est sélectionné.

Nous avons donc trois hypothèses scientifiques afin d'expliquer le fait de l'adaptation des organismes à leur milieu de vie. A nouveau, l'explication suivant laquelle l'adaptation des organismes résulte d'une volonté divine n'est pas considérée car elle ne répond pas aux critères de la démarche scientifique suivant laquelle la validité des hypothèses peut être vérifiée ou rejetée à l'aide d'observations. Nous verrons par la suite de la visite les observations et les faits qui permettent de trancher parmi ces différentes hypothèses. Avant cela, voyons d'autres exemples d'adaptations des organismes à leur milieu de vie.

Arrêt 6 : Mise en évidence de l'adaptation des êtres vivants aux milieux pélagiques et benthiques aquatiques - « Être adapté au milieu pélagique »

Un autre milieu propice pour trouver des organismes possédant des adaptations singulières est l'espace des profondeurs, et plus particulièrement si on compare les organismes vivant près des fonds océaniques (le milieu benthique) et ceux vivant dans les eaux libres (milieu pélagique).

Les représentants des organismes vivant dans le milieu pélagique exposés ici sont le dauphin, l'anchois et la liche. Lorsque l'on regarde les couleurs de ces trois organismes, on distingue deux tons de coloration différents. Sur leur face ventrale, ces trois animaux présentent une coloration plutôt claire tandis que sur la face dorsale, celle-ci a un ton plutôt de couleur sombre. Cette différence de coloration entre les faces ventrales et dorsales de ces organismes appartenant à des groupes totalement différents (le dauphin est un mammifère ; l'anchois et la liche des actinoptérygiens) peut être interprétée comme une adaptation, c'est-à-dire un caractère qui permet de mieux survivre dans un environnement donné, et donc de se reproduire de façon plus abondante que les individus ne possédant pas ces caractéristiques. En effet, la coloration claire de la face ventrale fait que lorsque l'organisme est vu du dessous, celui-ci peut se confondre avec les tons clairs de la surface des eaux. De même, la coloration sombre sur la face dorsale fait que lorsqu'un de ces organismes est vu du dessus, il peut se confondre avec les fonds océaniques. Nous pouvons donc penser que les organismes possédant cette coloration à deux tons échappent plus facilement aux prédateurs que ceux qui n'en ont pas : ils sont adaptés à leur environnement.

Par ailleurs, ces trois organismes ont une forme oblongue qui leur offre un profil hydrodynamique pour la nage. On peut noter que le manchot empereur, qui n'est ni un actinoptérygien ni un mammifère, mais un oiseau « aquatique », possède également ces caractéristiques (coloration à deux tons et profil hydrodynamique). Nous voyons donc que des organismes appartenant à des groupes totalement différents mais vivant dans un même milieu possèdent des adaptations semblables.

Si l'on décrit maintenant les organismes vivant dans le milieu benthique, c'est-à-dire près des profondeurs, on s'aperçoit que leur profil tout comme leur coloration sont différents. En effet, ces organismes ont une forme aplatie et leur coloration mime plus au moins la couleur du sédiment qui compose les fonds marins. On peut donc à nouveau penser que ces organismes sont mieux adaptés à leur environnement que d'autres individus ne possédant pas ces caractéristiques.

Cet espace nous a permis de montrer à nouveau le fait de l'adaptation des organismes à leur milieu de vie. Les trois hypothèses évoquées ci-dessus pour expliquer l'adaptation sont toujours possibles, et nous verrons plus loin les éléments nous permettant de trancher entre ces trois hypothèses. Voyons maintenant d'autres exemples d'organismes adaptés à leurs conditions de vie, cette fois dans la zone intertidale du littoral.

Arrêt 7 : Mise en évidence de l'adaptation des êtres vivants au milieu littoral
« Être adapté au milieu littoral »

L'estran (appelé aussi zone intertidale) est le nom donné à la zone des bords de mers se trouvant entre le niveau des eaux à marée basse et celui à marée haute. Les conditions de vie dans ce milieu sont tout à fait particulières car c'est un milieu qui se trouve pour la moitié du temps immergé, et à l'air libre pour l'autre moitié du temps. Les conditions de vie pour les organismes qui s'y trouvent sont donc extrêmement variables : l'oxygène est tantôt dissout dans l'eau, tantôt dans l'air (alors que les organismes de l'estran respirent uniquement l'oxygène dissout dans l'eau). La température et la luminosité varient énormément en fonction du cycle des marées.

L'estran est divisé en trois niveaux : le supra-littoral est le niveau qui occupe la partie la plus haute de l'estran, vient ensuite le médio-littoral puis l'infra-littoral. Chacun de ces niveaux est

caractérisé par des conditions de vie très précises. En effet, plus un niveau est élevé sur l'estran et plus sa période d'immersion est courte. Les organismes qui y vivent passent donc la plus grande partie de leur vie à l'air libre. Inversement, les organismes se trouvant sur la partie basse de l'estran passent la majorité de leur temps en immersion. Une autre caractéristique de l'environnement qui varie en fonction de la position sur l'estran est la profondeur de l'eau à marée haute : celle-ci sera beaucoup plus grande sur les niveaux inférieurs que supérieurs. Donc, nous devons nous attendre à ce que les organismes vivant sur ces niveaux aient des adaptations aux conditions de vie (température ; temps d'immersion ; profondeur à marée haute) propres au niveau de l'estran sur lequel ils vivent.

Les organismes vivant dans ces conditions de vie si particulières présentent-ils les adaptations conséquentes ? La répartition des espèces vivant sur l'estran montre que oui. En effet, les espèces sont réparties dans l'estran sous forme de ceintures. Autrement dit, à chaque niveau de l'estran se trouvent des groupes d'espèces bien précis. Les organismes pour lesquels cette répartition en ceintures est la plus frappante sont les algues. En effet, lorsque l'on traverse l'estran d'une plage atlantique de haut en bas, on trouvera successivement trois ceintures d'algues. La ceinture se trouvant sur la partie supérieure de l'estran (supra-littoral) est composée de pelvéties. Juste après se trouve une ceinture composée d'algues de type « fucus » et enfin une ceinture composée d'algues dites « laminaires ». Ces trois groupes d'algues présentent des caractères adaptés aux conditions de vie propres à leur niveau. En effet, les pelvéties sont celles qui tolèrent le plus grand temps d'exposition à l'air libre, notamment grâce à la production d'une matière visqueuse (le mucus) à leur surface les protégeant des rayons du soleil et leur permettant d'absorber l'oxygène se trouvant dans l'air. Les laminaires possèdent des pigments qui leur permettent de capter les rayons lumineux malgré le fait qu'elles soient situées à des profondeurs relativement importantes à marée haute.

Les littorines, qui font partie du même groupe que les escargots (le groupe des gastéropodes), présentent également un exemple intéressant d'adaptation aux conditions de vie des différents étages de l'estran. En effet, sur les étages supérieurs de l'estran vivent des espèces de littorine relativement grosses par rapport aux espèces vivant sur les parties inférieures de l'estran. On peut penser qu'un gros volume peut être adaptatif pour une littorine vivant sur la partie supérieure de l'estran, car celle-ci se trouve hors de l'eau pour une plus grande partie du temps. En effet les littorines ne peuvent respirer que l'oxygène dissout dans l'eau de mer et lorsque la mer se retire, elles s'enferment dans leur coquille avec un peu d'eau de mer et elles continuent ainsi à respirer. Or, un grand volume entraîne un rapport surface/volume relativement faible, ce qui permet de renfermer une quantité d'eau relativement grande, tout en minimisant les pertes au travers de la surface de la coquille se trouvant au contact du soleil. Les espèces de littorines vivant dans la partie plus basse de l'estran semblent également être adaptées à ces conditions de vie. En effet, la mer est plus agitée à ce niveau que dans les niveaux plus élevés. Ainsi, une petite taille constitue un avantage qui résulte dans la possibilité de pouvoir se fixer dans les fissures de la roche et de ne pas subir l'assaut des vagues.

Les algues et les littorines de l'estran constituent donc de nouveaux exemples d'organismes adaptés à des conditions de vie spécifiques.

Arrêt 8 : Mise en évidence de l'adaptation des êtres vivants à la savane et à la forêt tropicale - « *Être adapté au milieu tropical* »

En passant au premier étage de la GGE, nous arrivons dans les espaces consacrés aux animaux vivant dans la savane d'une part, et dans la forêt tropicale d'autre part. Sans entrer dans les détails de ces deux types de milieux, nous pouvons néanmoins constater qu'à nouveau les colorations des animaux sont proches de celles des milieux dans lequel ils vivent. Tandis que les animaux de la savane présentent des colorations plutôt claires, les animaux de la forêt tropicale ont des colorations plutôt sombres. Ce contraste nous amène également à penser que les couleurs de ces animaux sont des adaptations faisant qu'ils sont relativement bien camouflés.

Arrêt 9 : Mise en évidence de l'unité et de la diversité du vivant (3)
« Des glands tous pareils, tous différents ? »

Tous les exemples auxquels nous avons fait appel jusqu'à maintenant pour illustrer l'unité et de diversité des êtres vivants se sont basés exclusivement sur des animaux. L'unité et la diversité des organismes se retrouvent également dans le monde végétal. La vitrine suivante illustre cela avec la représentation du fruit et de la feuille de différentes espèces de chênes. Lorsque l'on compare les fruits de ces différentes espèces, on constate qu'elles produisent toutes un fruit de type akène appelé « gland », ce qui est une caractéristique propre aux chênes. Cette caractéristique commune justifie que toutes ces espèces sont regroupées sous l'appellation « chêne » (*Quercus* en latin), qui désigne un nom de genre. Cependant, chaque espèce produit des glands avec des caractéristiques propres. On retrouve donc à nouveau une diversité au sein de l'unité. Il en est de même avec les feuilles de toutes les espèces présentées. En comparant les feuilles les unes aux autres, on découvre là aussi une unité. En effet, la plus grande partie des espèces présentées possède une feuille comportant un bord avec des lobes. Cependant, ces lobes sont plus ou moins marqués. Ceci met à nouveau en évidence une diversité certaine au sein de tous les individus regroupés sous l'appellation « chêne ». Cette diversité est illustrée dans notre langage par la distinction de différentes espèces au sein du genre « chêne » comme par exemple le chêne liège (*Quercus suber*) ou chêne du Liban (*Quercus libani*).

Arrêt 10 : Bilan de mi-parcours : mise en évidence de 3 faits et propositions d'hypothèses qui permettent d'expliquer ces trois faits :
« Un temps pour la réflexion : récapitulons ! »

Nous arrivons au terme de la première partie de cette visite, au cours de laquelle nous avons mis en évidence trois grandes classes de faits à l'aide d'exemples trouvés dans la nature et que nous avons observés à la GGE.

Fait numéro 1 : Les êtres vivants présentent une unité, qui se reflète par le fait qu'ils partagent des caractéristiques communes. Ces ressemblances nous permettent de faire des regroupements parmi les espèces, en constituant des groupes d'organismes définis par des caractéristiques partagées. Lorsque plusieurs individus ont des caractéristiques communes qu'ils sont les seuls à avoir, on les regroupe sous le nom d'une même espèce (par exemple l'espèce humaine, *Homo sapiens*). De même lorsque plusieurs espèces ont des caractéristiques communes qu'elles sont les seules à avoir, on les regroupe sous l'appellation d'un genre (par exemple le genre *Homo* qui comprend les espèces *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis*). Et lorsque plusieurs genres ont des caractéristiques communes qu'ils sont les seuls à posséder, on les regroupe sous l'appellation d'une même famille (par exemple la classe des mammifères, qui comprend entre autres les genres *Homo*, *Canis* (chiens), *Pan* (chimpanzés)...).

Classe	Famille	Genre	Espèce	Noms vernaculaires
Mammifères	Canidés	<i>Canis</i>	<i>C. lupus familiaris</i>	Chien
			<i>C. lupus</i>	Loup
	Hominidés	<i>Pan</i>	<i>P. troglodytes</i>	Chimpanzé
			<i>P. paniscus</i>	Bonobo
		<i>Homo</i>	<i>H. neanderthalensis</i>	Homme de néanderthal
			<i>H. sapiens</i>	Homme moderne

Fait numéro 2 : À l'intérieur de cette unité, il existe une certaine diversité. En effet, malgré le fait que certaines caractéristiques soient partagées par de nombreux organismes, au sein d'un genre par exemple, ces caractéristiques ne sont pas exactement identiques chez tous les membres du groupe. C'est ce qui nous permet de discerner des espèces au sein d'un

genre. Le nombre d'espèces connues des scientifiques, 2 millions, donne une idée de cette diversité. Elle est largement sous-estimée puisque les scientifiques décrivent environ 16000 nouvelles espèces chaque année et que la diversité totale d'espèces est estimée entre 5 et 30 millions d'espèces.

Fait numéro 3 : Les organismes sont adaptés à leur environnement, c'est-à-dire qu'ils ont des organes, une physiologie et des comportements leur permettant de mieux survivre dans un environnement donné, et donc de s'y reproduire de façon plus abondante par rapport aux individus qui en seraient dépourvus.

Nous avons, pour chaque classe de faits, proposé différentes hypothèses possibles afin de les expliquer. Les différentes hypothèses proposées sont rappelées ci-dessous.

Fait n°1 et 2 : unité et diversité du vivant

Hypothèse 1 : Les êtres vivants ont des similitudes car ils font la même chose avec leurs organes. Autrement dit, l'**usage** d'un organe modifierait sa structure. Il y a une diversité entre les organismes car ils ne font pas tous exactement la même chose.

Hypothèse 2 : Les êtres vivants ont des similitudes car ils vivent dans un **environnement** similaire. Autrement dit, le milieu dans lequel vit un organisme modifie directement sa structure. Il y a une diversité entre les organismes car ils ne vivent pas tous exactement dans le même environnement.

Hypothèse 3 : Les êtres vivants ont des similitudes car ils descendent tous d'un unique **ancêtre commun**. Ils ont donc tous hérité la même structure de base. Il y a une diversité entre les organismes car au cours des générations, les différentes lignées issues de l'ancêtre commun ont acquis de légères modifications, faisant qu'il y a une diversité au sein de l'unité.

Fait n°3 : adaptation des êtres vivants à leurs conditions de vie

Hypothèse 1 : Les organismes sont adaptés à leur milieu de vie car l'**usage** qu'ils font de leurs organes les modifie afin qu'ils puissent mieux réaliser ce pour quoi ils sont utilisés. Autrement dit, l'usage d'un organe crée sa fonction.

Hypothèse 2 : Les organismes sont adaptés à leur milieu de vie car les caractéristiques de l'**environnement** modifient directement l'anatomie, la physiologie et le comportement des organismes, ce qui rend ces différents caractères adaptés à l'environnement.

Hypothèse 3 : Les organismes sont adaptés à leur milieu de vie car ils évoluent sous l'action du processus de la **sélection naturelle**. Selon ce processus, des variations peuvent apparaître au hasard au sein de la descendance des organismes. De façon tout à fait hasardeuse, il peut arriver qu'une variation permette à l'individu qui la porte de mieux survivre, et donc de se reproduire de façon plus abondante que les autres dans un environnement donné (parce que cette variation lui permet par exemple de mieux lutter contre le froid). Si cette variation est héritable, à la génération suivante, la descendance de cet individu est donc plus nombreuse et supprime alors celle des autres individus de la population.

Nous arrivons maintenant à la deuxième étape de la visite. Cette fois-ci, l'objectif est de chercher de nouvelles observations dans la GGE nous permettant de trancher parmi les différentes hypothèses que nous avons proposées pour expliquer les trois classes de faits que nous avons observées.

Considérons notre troisième hypothèse afin d'expliquer l'unité et la diversité du vivant. Selon cette hypothèse, l'unité retrouvée au sein d'un groupe d'organismes s'explique par une ascendance commune, laquelle a subi depuis le phénomène de « descendance avec modification » : tous les membres du groupe considéré partagent un ancêtre commun exclusif duquel ils descendent tous. Ils ont ainsi hérité de cet ancêtre commun la même structure de base ce qui explique leurs ressemblances. Par ailleurs, au cours des générations, chacune des lignées acquiert des variations qui lui sont spécifiques, faisant que chacune possède des particularités. Pour vérifier cette hypothèse, les êtres vivants doivent avoir deux propriétés essentielles : 1/ Il doit y avoir descendance ; 2/ Au fil des générations, il doit y avoir de la variation héritable, c'est-à-dire que les ancêtres diffèrent des descendants, et que les descendants diffèrent entre eux. Si ces deux propriétés sont retrouvées, alors les conditions de possibilité du processus de descendance avec modification seront réunies, ce qui apporterait des éléments en faveur de la troisième hypothèse afin d'expliquer l'unité et la diversité du vivant.

La première condition à vérifier, la descendance, est triviale et il n'est pas nécessaire de la démontrer. Les organismes font de la reproduction sexuée et/ou asexuée.

La deuxième condition n'est pas triviale. La diversité au sein de la descendance nécessite une observation à l'échelle de la population.

Arrêt 11 : La diversité au sein des populations.

« Les littorines valident une hypothèse »

Dans cette vitrine sont représentées trois différentes populations de littorines. Une population est un ensemble d'individus appartenant à la même espèce vivant plus proches les uns des autres qu'ils ne le sont des individus des autres populations. Une conséquence de cette proximité est que les individus d'une même population ont une plus forte probabilité de se rencontrer et donc de se reproduire entre eux qu'ils n'en ont de se reproduire avec les individus d'une autre population. Ainsi, à l'échelle de la population, les individus présentent un degré d'apparentement relativement important.

Lorsque l'on compare les coquilles des individus au sein de chacune des trois populations (mais aussi entre les trois populations), il saute aux yeux qu'il existe une diversité. Les individus varient au niveau de la taille, de la couleur et des ornements de leur coquille. D'autre part, comme nous l'avons vu précédemment, tous les individus d'une population sont fortement apparentés.

La variation à l'intérieur de la population a une très grande importance car elle permet de montrer qu'au cours de la reproduction, des variations apparaissent. Ces nouvelles observations réunissent les conditions de possibilité du processus de « descendance avec modification » et vont donc dans le sens de la troisième hypothèse. Par ailleurs, ces nouvelles observations invalident la première hypothèse suivant laquelle l'unité résulte d'une action directe de l'environnement puisqu'on trouve de la diversité au sein d'un groupe d'individus formant une même population et vivant sous les mêmes conditions environnementales.

Nous avons donc réuni les conditions de possibilité pour qu'un processus de descendance avec modification ait lieu ; mais le fait qu'il y ait de la descendance, et que de la variation apparaisse au cours de cette descendance ne nous prouve pas que pendant de nombreuses générations des variations puissent s'accumuler de telle sorte à donner deux lignées très différentes à partir d'un unique ancêtre commun. Ce qui nous montre que ceci est possible,

c'est l'étude de la domestication des espèces par l'homme. En effet, la domestication est un processus au cours duquel les espèces peuvent être transformées, sous l'action de l'homme. Des exemples de transformation d'espèces sous l'effet de la domestication sont proposés au 2^{ème} étage de la GGE, celui dédié aux interactions entre l'homme et la nature.

NIVEAU 2 de la GGE

Arrêts 12 et 13 : **La domestication des espèces animales**
« La domestication renforce la 3^{ème} hypothèse »

Nous sommes maintenant au deuxième étage de la GGE, qui est dédié aux actions et à l'impact de l'homme sur la nature. Les thèmes abordés sont l'exploitation (chasse, pêche), la domestication, la pollution, le transfert d'espèces, le développement durable et les espèces menacées/disparues.

La partie qui nous intéresse est celle de la domestication. Elle apporte en effet des faits supplémentaires en faveur de l'hypothèse de la descendance avec modification. La domestication des espèces sauvages commence lors de la sédentarisation de l'homme, il y a plus de 10 000 ans. La domestication consiste à transformer une espèce sauvage sur de nombreuses générations en vue de satisfaire un besoin (alimentation, textile...). Pour cela, l'homme sélectionne chez une espèce sauvage les individus qui présentent une caractéristique pour laquelle il porte un intérêt particulier. Il élève (ou cultive) ensuite ces individus à proximité de son foyer. Les éleveurs sont par la suite parvenus à modifier les caractéristiques de leurs bêtes. Par exemple, dans son troupeau de bovins, si certains mâles produisent des descendants plus gros que les autres, l'éleveur ne va faire se reproduire que ces individus, si bien qu'à la génération suivante il n'y aura que des descendants provenant des gros individus du troupeau. La taille moyenne du troupeau aura ainsi augmentée. En répétant ce processus pendant de nombreuses générations, éleveurs et horticulteurs ont réussi à créer de nombreuses variétés nouvelles, par accumulations de variations successives, lesquelles allaient dans le même sens parce que des reproductions différentielles étaient produites sous l'influence des éleveurs.

Plusieurs exemples sont illustrés ici. Le premier exemple est le sanglier et le porc. Le premier est sauvage tandis que le deuxième est une variété domestique. Tous deux partagent un ancêtre commun exclusif. Il y a environ 8 000 ans, l'homme a commencé à domestiquer le sanglier, mais depuis les XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècle les européens se sont mis à sélectionner chez les descendants les individus qui avaient un poids et une taille conséquents, un nombre de mamelles important ainsi qu'une forte vitesse de croissance. Le résultat de cette sélection systématique est le porc domestique. D'un autre côté, la partie des descendants de cet ancêtre commun qui ne présentait pas ces caractéristiques est restée à l'état sauvage dans la nature et est maintenant représentée par le sanglier. Nous voyons dans ce cas comment à partir d'un ancêtre commun unique il est possible d'obtenir, par accumulation de variations successives, deux lignées (le sanglier et le porc) sensiblement différentes.

Le même processus s'est produit avec le chien domestique, qui partage un ancêtre commun avec le loup et dont le début de la domestication est estimé à 12000 ans.

Arrêt 14 : La domestication d'une espèce végétale
« Le maïs : un exemple de domestication »

La botanique apporte également de nombreux exemples de domestication d'espèces, et donc des faits supplémentaires appuyant la théorie de l'évolution par descendance avec modification. L'exemple exposé ici est celui de la domestication du maïs. Les différentes variétés de maïs utilisées dans nos sociétés résultent de la domestication de la téosinte. Des données archéologiques et biologiques indiquent que ce processus de domestication a débuté il y a plus de 7000 ans. La comparaison des épis d'une variété de maïs domestique avec l'épi issu d'un pied de téosinte révèle que la variété domestique a des fruits charnus, plus nutritifs, et qui ne sont pas disséminés par le vent. Les premiers cultivateurs auraient donc sélectionné (peut être même de façon inconsciente), chez l'ancêtre commun du maïs et de la téosinte, les graines provenant des individus présentant ces caractéristiques. En sélectionnant les semences de cette façon pendant de nombreuses générations, les cultivateurs ont peu à peu modifié des lignées de téosinte, desquelles résultent toutes les variétés de maïs actuelles.

La domestication de certaines espèces par l'homme offre trois grands atouts pédagogiques :

1/ Elle montre qu'il est possible de modifier les espèces par accumulation de variations pendant de nombreuses générations et d'obtenir ainsi, à partir d'un même ancêtre commun, deux lignées (la lignée domestique et la lignée sauvage) très différentes l'une de l'autre.

2/ Elle l'aide à comprendre que les espèces actuelles ne descendent pas les unes des autres mais sont reliées par l'intermédiaire d'un ancêtre commun. Par exemple, le chien actuel ne descend pas du loup actuel ; tous deux descendent d'un ancêtre commun qui a vécu il y a environ 12000 ans (de même, l'homme actuel ne descend pas d'un singe actuel...).

3/ Elle permet de comprendre que les variations apparaissent indépendamment des besoins et de l'environnement. En effet, éleveurs et horticulteurs ne déclenchent pas les variations qui leur seraient utiles chez les plantes qu'ils cultivent et les animaux qu'ils élèvent. Ce n'est qu'une fois qu'elles sont apparues que les variations peuvent être sélectionnées. De même, chez les espèces sauvages, les variations apparaissent indépendamment des besoins des espèces et des environnements dans lesquels elles se trouvent ; mais lorsqu'une variation favorable apparaît, elle peut être sélectionnée.

A ce stade de la visite, nous avons accumulé plusieurs faits qui confortent l'hypothèse suivant laquelle l'unité et la diversité du vivant résultent du processus de descendance avec modification. Il apparaît donc relativement aisé d'expliquer l'unité et la diversité du vivant, sur la base d'un processus très simple, qui ne nécessite que trois conditions : (1) la possibilité de laisser des descendants, (2) l'apparition de variations hérissables chez ces descendants, (3) l'accumulation, chez une lignée, de variations successives pendant de nombreuses générations. Ce processus suffit pour expliquer une grande partie de l'évolution.

Nous avons des preuves en faveur d'une modification des espèces au cours du temps mais il nous reste un autre élément à expliquer. En effet, en plus de l'unité et de la diversité du vivant, nous avons pour objectif d'expliquer un fait supplémentaire : l'adaptation des espèces à leur environnement. L'explication aujourd'hui retenue pour rendre compte de l'adaptation des espèces à leur environnement est celle proposée par Darwin : l'évolution par sélection naturelle. Nous allons maintenant voir quelle a été la démarche empruntée par Darwin pour élaborer cette explication, puis nous allons observer d'autres spécimens exposés à la Grande Galerie de l'Evolution qui rendent cette explication hautement vraisemblable. Avant cela, nous allons faire un rapide survol concernant l'histoire des idées en évolution, à l'aide de l'espace prévu à cet effet au dernier niveau de la grande galerie de l'évolution.

Petite histoire des idées en évolution

La biologie est une science relativement jeune comparée à d'autres disciplines telles que les mathématiques ou la physique. En effet, au début du 18^{ème} siècle, alors que Newton élabore des lois universelles pour expliquer une grande quantité de phénomènes, les naturalistes ne possèdent pas de théorie scientifique au sens actuel du terme. On relève même des cas extrêmes comme par exemple des traités de zoologie dans lesquels sont décrits des phénomènes supposés de métamorphose d'une espèce dans l'autre (de type loup-garou). Un autre exemple pour illustrer le retard relatif des biologistes est la « théorie des signatures » adoptée par les botanistes. Suivant cette théorie, les différentes parties d'une plante permettraient de guérir la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Par exemple, les cerneaux de noix, de part leur forme cérébroïde, guériraient le cerveau. De même, les plantes à fleurs jaunes guériraient de la jaunisse.

Lors de la première moitié du 18^{ème} siècle, deux naturalistes vont marquer un tournant décisif pour la biologie. Il s'agit du naturaliste français Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) et du botaniste suédois Carl von Linné (1707-1778).

Buffon et Linné étaient tous les deux fixistes, c'est-à-dire qu'ils ne croyaient pas à l'idée d'une transformation des espèces mais à l'idée que la diversité des espèces était issue de la volonté divine. Ils ne s'intéressaient donc pas à la question de l'origine des espèces (puisque résolue d'entrée de jeu) mais plutôt à la façon dont on peut décrire le monde naturel. Ces deux naturalistes n'ont pas contribué directement à l'élaboration de la théorie de l'évolution mais on peut cependant penser qu'ils y ont contribué de façon indirecte, de part leurs apports méthodologiques pour l'étude de la nature.

Louis Leclerc de Buffon était intendant du roi au jardin des plantes médicinales de Paris. Il s'inscrit dans le cadre intellectuel de l'encyclopédie de Diderot et D'Alembert, et entreprend la rédaction de *L'Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du cabinet du Roy*, véritable encyclopédie en 36 volumes, dont un *fac simile* est exposé à la Grande Galerie de l'Evolution. Le mot *histoire* n'est pas à prendre ici au sens temporel du terme : Buffon ne se donne par pour objectif de décrire l'évolution du vivant au cours du temps mais de réaliser une investigation objective sur la nature. Cette œuvre est constituée d'une grande quantité de descriptions d'animaux, de plantes et de minéraux. *L'Histoire naturelle* de Buffon se démarque des autres travaux naturalistes de l'époque non seulement par l'étendue des connaissances qui s'y trouvent mais aussi par le souci permanent de faire des descriptions les plus objectives possibles, dénuées de toute intervention divine.

Buffon franchit un pas important dans l'étude des êtres vivants, en ce sens qu'il se propose d'expliquer la nature uniquement avec les ressources de la nature, sans avoir recours aux éléments surnaturels. Par exemple, lorsqu'il se questionne sur l'âge de la Terre, Buffon ne se satisfait pas de l'estimation obtenue à partir des différentes générations évoquées dans la Bible et il décide de mettre au point un dispositif expérimental afin d'estimer l'âge de la Terre. L'âge obtenu grâce à ce dispositif diffère beaucoup de celui reconnu actuellement mais cela n'a pas d'importance ici. Ce qui compte, c'est le tournant méthodologique qu'il amène ; visant à étudier la nature sur des bases relativement objectives. D'autre part, en se basant sur l'étude de la généalogie de races de chiens, Buffon pointe le fait que l'on retrouve beaucoup de variation à l'intérieur des espèces. Bien que ne remettant pas en cause la fixité des espèces, Buffon marque donc un pas en avant en montrant la variation existant à l'intérieur des espèces, en rallongeant l'âge de la Terre, et en adoptant une méthodologie dépourvue d'appellations surnaturelles.

L'apport du botaniste suédois **Carl Von Linné** est également d'ordre méthodologique. Linné était fixiste et expliquait l'origine de la diversité du vivant de manière créationniste. Son objectif était d'ordonner la biodiversité en systèmes, afin de retrouver l'ordre divin de la nature. Pour cela, il a fait deux propositions qui ont marqué des avancées importantes pour l'étude de la nature.

La première innovation apportée par Linné concerne la nomenclature, c'est-à-dire l'ensemble des règles suivant lesquelles on décrit et nomme les espèces. Avant Linné, le nom que l'on donnait à une espèce variait en fonction du naturaliste. Ainsi, une même espèce de plante pouvait avoir un nom donné par un botaniste français, et un autre nom différent du premier que lui aurait donné un botaniste italien. On voit bien comment un tel système handicape l'étude la nature. En effet, si une même espèce a plusieurs noms, on se retrouve dans la situation où plusieurs botanistes étudient la même espèce sans le savoir. Par conséquent, il devient difficile de centraliser toutes les connaissances liées à cette espèce. Linné rompt avec ce système en instaurant le système de nomenclature binomiale. Ce nouveau système de nomenclature impose que chaque espèce soit nommée suivant un binôme en latin constitué d'un nom de genre et d'un nom d'espèce. Par exemple, le chien domestique est nommé par Linné *Canis domesticus* (*Canis* est le nom de genre et *domesticus* le nom d'espèce à l'intérieur de ce genre, qui comprend également le loup, *Canis lupus*). Une fois qu'une espèce a ainsi été nommée, la description de l'espèce, ainsi que le nom qui lui a été donné, sont portés à la connaissance des autres naturalistes par la publication d'ouvrages (par exemple les faunes et les flores). A partir de là, le nom de l'espèce ne changera plus et sera utilisé par les naturalistes du monde entier, qui peuvent désormais centraliser leurs connaissances.

La deuxième innovation apportée par Linné est l'établissement d'un système de classification des plantes. Deux botanistes français, **Adanson** (1727-1806) et **Tournefort** (1656-1708), avaient déjà proposé des systèmes de classification mais celui de Linné a eu un impact plus important. Le système classificatoire de Linné comporte 12 classes, dans lesquelles peuvent être rangées toutes les espèces de plantes, en fonction de critères concernant les organes reproducteurs. L'établissement d'un tel système est indispensable pour l'étude de la biodiversité (et donc de son évolution), dans la mesure où il permet d'ordonner et de classer des objets à étudier (c'est-à-dire les êtres vivants). L'analogie avec une bibliothèque est ici utile. Imaginons une bibliothèque dans laquelle les livres ne sont pas ordonnés mais rangés de façon totalement aléatoire et non catalogués. Une telle bibliothèque n'est pas fonctionnelle. Il en est de même pour la biodiversité. Dans la vision pré-linéenne, la biodiversité est anarchique : les espèces ont plusieurs noms, elles se transforment les unes en les autres (métamorphoses) et elles ne sont pas ordonnées. Si l'on considère que pour élaborer sa théorie de l'évolution, Darwin a eu besoin d'avoir un système naturel ordonné qui pouvait être appréhendé dans son ensemble afin d'être étudié et expliqué, alors nous pouvons raisonnablement penser que Linné a, tout comme Buffon, contribué de façon indirecte à l'élaboration de la théorie darwinienne, en laissant à ses successeurs un système naturel ordonné et stable.

Dans l'espace dédié à l'histoire des sciences de la Grande Galerie de l'Evolution se trouvent également des vitrines consacrées à Georges Cuvier (1769-1832) et Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829). Ces deux personnages ont également fourni un apport important (mais toujours indirect) pour l'élaboration par Darwin de la théorie de l'évolution des espèces.

Georges Cuvier était professeur au Muséum national d'Histoire naturelle. Il est considéré comme un des précurseurs de la paléontologie. En effet, les études de Cuvier ont considérablement accru l'attention portée par les naturalistes aux organismes fossiles. Grâce aux enseignements de Cuvier, les fossiles furent par la suite considérés comme des restes d'organismes ayant vécu dans le passé. A cette époque, il était en effet courant de considérer que les fossiles étaient de simples pierres, et que leur ressemblance avec des organismes était purement fortuite. Pour resituer cet esprit, il est intéressant d'écouter l'opinion de Voltaire, qui explique la présence de coquillages (fossilisés) dans les Pyrénées en disant qu'ils ont été oubliés là par les pèlerins du chemin de Saint-Jacques de Compostelle !

La plupart du temps, seule une infime partie de l'organisme est retrouvée sous forme de fossile. Cuvier a élaboré une méthode qui permet d'inférer l'organisme entier à partir d'un fragment de fossile isolé. Cette méthode se base sur la comparaison des fossiles avec les

organismes actuels, qui servent ainsi de référence afin d'interpréter les fossiles. Cuvier comparait donc les restes fossiles avec les organismes actuels. Un exemple est illustré dans l'espace dédié à Cuvier dans la Grande Galerie de l'Evolution. Des mâchoires de différents crocodiliens, fossiles et actuelles, y sont représentées. Une comparaison entre la mâchoire fossile et la mâchoire actuelle permet de détecter rapidement des différences entre les deux.

Grâce à ces nombreuses comparaisons entre les organismes fossiles et les organismes actuels, Cuvier était parvenu à l'idée suivant laquelle les espèces qui ont vécu dans le passé (et que l'on retrouve sous forme fossile) sont différentes des espèces actuelles. Par ailleurs, il identifie 6 couches géologiques différentes possédant chacune une flore et une faune fossile particulière. D'une certaine façon, nous pouvons dire que Cuvier avait sous les yeux des éléments lui permettant de penser à une transformation des espèces au cours du temps mais c'est une toute autre explication qu'il proposa. Afin de rendre compte des changements de faune et de flore entre les 6 couches géologiques, Cuvier proposa que chacune de ces couches correspondait à un acte de création indépendant, et qu'un événement de nature catastrophique s'était produit entre chacune de ces couches. Cuvier reste donc sur une position fixiste, mais nous pouvons penser qu'il a marqué un tournant de la biologie, en montrant que les fossiles représentaient la faune et la flore du passé, et que celles-ci étaient différentes des faunes et flores actuelles. Les données fossiles seront largement utilisées par Darwin pour appuyer sa théorie d'évolution par sélection naturelle.

La première explication faisant allusion à une transformation des espèces est propagée par **Jean-Baptiste Lamarck**, collègue de Cuvier au Muséum. Lamarck est l'auteur de *Philosophie zoologique* paru en 1809 (dont le *fac simile* est exposé à la Grande Galerie de l'Evolution). L'objectif de cet ouvrage est d'établir un ensemble de principes généraux permettant d'étudier les animaux. Bien que rendu célèbre par ses travaux de botaniste, Lamarck fut un très grand spécialiste des « invertébrés » notamment des mollusques fossiles, groupe pour lequel il fut le premier à proposer une systématique (c'est-à-dire une mise en ordre sous forme rationnelle). La vitrine qui lui est dédiée à la Grande Galerie de l'Evolution illustre quelques unes des nombreuses espèces de mollusques qui ont été décrites par Lamarck.

Lamarck propose le premier schéma transformiste des espèces, et il suggère également un mécanisme pour expliquer l'adaptation des espèces à leur milieu. Ce mécanisme est celui dit de « l'hérédité des caractères acquis », c'est-à-dire que les organismes voient leur conformation modifiée au cours de leur vivant et que cette modification est héritée par les descendants. Ces modifications peuvent être causées soit par l'environnement soit par « l'usage et le non-usage ». Dans le premier cas, l'environnement modifie directement l'organisation des êtres vivants en vue d'adapter cette organisation à l'environnement. Dans le deuxième, l'usage de tel ou tel organe que produit un individu pour subvenir à ses besoins, lesquels sont ressentis en rapport avec les conditions de l'environnement, induit la modification de l'organe considéré : soit il est stimulé et il se développe, soit il ne l'est pas et régresse. Ainsi l'environnement « instruit » la variation inter-individuelle et produit un effet indirect d'optimisation, pour ne pas dire d'adaptation.

Un exemple resté célèbre est celui des membranes inter-digitales du canard, qui naîtront, d'après Lamarck, des efforts que le canard fait pour se mouvoir à la surface de l'eau. Les membranes ainsi apparues, aussi petites soient-elles, seront transmises à la descendance. Ce mécanisme implique donc bien une transformation des espèces au cours du temps (ici, la transformation résulte en un développement des membranes inter-digitales) ainsi qu'une adaptation des organes au cours de ces transformations. Pour Lamarck le milieu instruit directement la variation et les variants apparaissent en rapport aux besoins des espèces. La transformation est individuelle et transmise. Pour Darwin, plus tard, les variations apparaissent indépendamment des besoins de l'espèce (et même parfois à l'encontre), et la transformation est populationnelle et transmise.

Lamarck peut être considéré comme le premier biologiste non fixiste. Il est le premier à affirmer sans retenue l'idée d'une transformation des espèces au cours du temps, et il propose également le premier mécanisme qui, bien qu'étant erroné, constitue la première explication non créationniste pour rendre compte de l'adaptation des espèces à leur environnement. Ses compétences ont attiré à Lamarck de nombreux admirateurs ainsi que beaucoup d'ennemis, au premier rang desquels figurait Cuvier. Les enseignements de Lamarck au Muséum furent fréquentés par plus d'un millier d'étudiants venus de France et de toute l'Europe. Lamarck a donc diffusé une doctrine évolutionniste aux naturalistes européens dès le début du 19^{ème} siècle, dont l'étendue ne sera que grandissante suite aux travaux ultérieurs qu'allait apporter Charles Darwin.

NIVEAU 3

Arrêt 15 : L'évolution des espèces par sélection naturelle

« La démarche scientifique de Darwin »

La théorie d'évolution des espèces par sélection naturelle qu'a proposée **Charles Darwin** (1809-1882) constitue le socle sur lequel se fonde une grande partie de la biologie contemporaine. Elle représente l'élément explicatif principal pour rendre compte de l'unité, la diversité, et l'adaptation des organismes à leur milieu. En nous appuyant sur l'espace dédié à Darwin à la Grande Galerie de l'Evolution, nous allons retracer la démarche qui a permis à Darwin de construire cette théorie.

Issu d'une famille aisée, Darwin naquit en 1809 dans le Shropshire anglais. Après des études de médecine à Édimbourg, il est encouragé par son père à devenir pasteur. Il entreprend pour cela des études de théologie à Cambridge, mais c'est là surtout pour lui l'occasion de faire ses premières sorties naturalistes dans la campagne anglaise. En 1831, il s'embarque en qualité de naturaliste à bord d'un vaisseau affrété pour une mission cartographique autour du monde, le *Beagle*. Ce voyage offre à Darwin l'occasion de s'adonner à une lecture approfondie (il avait embarqué une bibliothèque naturaliste), mais aussi de récolter de nombreux échantillons et de faire de nombreuses observations. L'espace dédié à Darwin dans la Grande Galerie présente une carte avec une partie de l'itinéraire emprunté par le *Beagle* ainsi que des exemples d'oiseaux tels que ceux échantillonnés par Darwin. A son retour de ce voyage qui dura presque 5 années, Darwin étudia le matériel rapporté puis épousa Emma Wedgwood en 1839. Emma Wedgwood est issue d'une famille de céramistes renommés. Ce mariage accorda à Darwin une situation confortable lui permettant de se consacrer à ses investigations.

En 1858, alors que l'idée d'une transformation des espèces a déjà bien mûri dans sa tête, Darwin reçoit un manuscrit d'un jeune collègue, Alfred Wallace, dans lequel sont exposées des idées fort similaires. Après une présentation conjointe à la *Linnean Society* de Londres des travaux de Wallace et de Darwin, ce dernier publie en 1859, *L'Origine des espèces*, dont la première édition s'épuise dès sa parution. Cet ouvrage pose les bases de la théorie de l'évolution par la sélection naturelle, et présente une quantité phénoménale d'exemples qui corroborent cette théorie. Après six éditions de *L'Origine des espèces* et de nombreux autres ouvrages, Darwin s'éteint en 1882. Sa dépouille repose dans l'Abbaye londonienne de Westminster, aux côtés de celles de Shakespeare et de Newton. Nous allons maintenant décortiquer dans le détail la théorie que nous a léguée Darwin.

La théorie darwinienne de l'évolution est exemplaire au niveau de sa méthodologie scientifique. Elle s'insère très bien dans le cadre hypothético-déductif propre aux sciences.

Afin de bien comprendre la scientificité de la théorie darwinienne, nous allons d'abord présenter la démarche hypothético-déductive. Une démarche hypothético-déductive est une des méthodes permettant d'élaborer des connaissances et des explications vraisemblables sur le monde qui nous entoure. Elle comporte quatre principales étapes, précédées d'un « préambule ».

Le **préambule** est un scepticisme vis-à-vis d'un phénomène que l'on ne sait pas expliquer, ou bien pour lequel il y a une explication mais que l'on désapprouve. L'explication de ce phénomène suivant une démarche hypothético-déductive se fera alors suivant la démarche suivante.

1/ La première étape consiste à décrire des faits, c'est-à-dire des événements singuliers observables ; qui se trouvent en relation avec le phénomène que l'on cherche à expliquer.

2/ A partir de ces faits observés, on formule une explication générale – c'est-à-dire une hypothèse - du phénomène se trouvant à l'origine de notre scepticisme initial.

3/ La troisième étape vise à tester la validité de l'hypothèse proposée dans l'étape précédente. Pour cela, on va déduire des faits qui, si ils sont avérés, valident – ou rejettent - l'hypothèse.

4/ La quatrième étape consiste à rechercher où à provoquer expérimentalement les faits déduits lors de l'étape précédente, afin de tirer des conclusions vis-à-vis de l'hypothèse.

Voici un exemple simple¹:

Préambule : supposons que l'on ignore la façon dont apparaissent les nouveaux nés de notre espèce, et que l'on cherche une explication.

1/ Description de faits en relation avec le phénomène que l'on cherche à expliquer :

Fait 1 : des nouveaux nés apparaissent.

Fait 2 : il existe une corrélation positive entre la densité des cigognes et le taux de natalité², c'est-à-dire qu'il naît en moyenne plus d'enfants dans les pays où la densité des cigognes est la plus forte.

2/ Proposition d'une explication (= hypothèse) :

Ce sont les cigognes qui apportent les nouveaux nés.

3/ Dédution des faits permettant de tester la validité de l'hypothèse :

Si mon hypothèse est vraie, alors si je capture toutes les cigognes d'une région donnée, il ne devrait plus y avoir de naissances.

4/ Test de l'hypothèse et conclusion :

En retirant les cigognes d'une région donnée, on constate que cela n'a pas d'impact sur les naissances. Ce ne sont donc pas les cigognes qui apportent les nouveaux-nés ! La corrélation positive entre la densité des cigognes et le taux de natalité (fait 2) s'explique par le fait que les pays qui ont les plus faibles taux de natalité (c'est à dire les pays industrialisés) sont ceux qui ont les habitats correspondant aux besoins des cigognes les plus dégradés (et donc les plus petites populations de cigognes).

¹ Cet exemple est inspiré de celui proposé dans l'ouvrage *Ecologie comportementale*. Etienne Danchin, Luc-Alain Giraldeau et Franck Cézilly. Editions Dunod, Collection Sciences SUP, 2005.

² L'étude montrant cette corrélation est détaillée dans l'ouvrage cité ci-dessus.

En suivant la structure de l'ouvrage principal de Darwin, *L'Origine des espèces*, nous allons maintenant voir comment la théorie darwinienne s'insère dans un cadre hypothético-déductif propre à la démarche scientifique.

Préambule : Comme nous l'avons vu, avant l'arrivée de Lamarck et de Darwin, les naturalistes avaient une conception fixiste des êtres vivants. L'unité, la diversité et l'adaptation des êtres vivants s'expliquaient comme étant le résultat d'une volonté divine. Le scepticisme initial de Darwin part d'une insatisfaction vis-à-vis de cette explication surnaturelle pour rendre compte de l'unité, de la diversité et des adaptations des êtres vivants. Mais surtout, Darwin commence à travailler aussi, comme scientifique, selon le nouveau « contrat » qui veut qu'en science on n'explique plus la nature qu'avec les seules ressources de la nature, depuis Diderot, Buffon ou Maupertuis. Il y va de l'autonomie des sciences. Voyons maintenant les faits sur lesquels s'est appuyé Darwin afin de proposer une explication pour rendre compte de l'unité, la diversité, et l'adaptation des êtres vivants à leur milieu de vie.

1/ Description de faits en relation avec le phénomène que l'on cherche à expliquer :

Fait 1 (Arrêt 16 : « Observations des faits par Darwin ») : Les deux premiers chapitres de *L'Origine des espèces* sont consacrés à la description de faits sur la variation des populations à l'état domestique (chapitre 1) et sauvage (chapitre 2). *L'idée que retranscrit ici Darwin est qu'il existe, de façon générale, de la variation parmi les descendants, et que ces variations sont héréditaires. En d'autres termes, il montre qu'il y a de la variation entre les individus formant une population.* Ces variations sont principalement perceptibles sous la forme de différences morphologiques entre les individus. Nous avons déjà mis en évidence cette variation au cours de la visite (cf l'exemple des littorines du 11^{ème} arrêt), et nous avons ici une vitrine avec des exemples supplémentaires. Dans cette vitrine sont présentés différents individus du bivalve *Chlamys*, ainsi que différents individus de différentes espèces d'insectes, d'oiseaux et de mollusques, au sein desquelles on observe de la variation de forme, de couleur, de taille. Dans *L'Origine des espèces*, Darwin s'appuie notamment sur les exemples des chiens, des pigeons et des roses pour montrer qu'il existe de la variation parmi les descendants, et que cette variation est héréditaire.

Fait 2 (Arrêt 17 : « Les faits observés par Darwin ») : Toujours dans ces deux premiers chapitres, Darwin s'attarde sur la domestication des espèces sauvages (phénomène que nous avons déjà vu dans le détail lors des arrêts 12, 13 et 14). *Il montre que les éleveurs et les horticulteurs sont parvenus à créer de nouvelles variétés de plantes et d'animaux en jouant sur les variations héréditaires qui apparaissent au cours de la reproduction.* Il s'appuie pour cela sur l'exemple de la domestication du pigeon bizet, à partir duquel les colombophiles sont parvenus à créer une diversité remarquable de pigeons. Ce fait est illustré à la Grande galerie de l'Evolution par une vitrine présentant un échantillon de la diversité de pigeons que sont parvenus à créer les colombophiles. *Il est donc possible que deux lignées issues d'un même couple parent accumulent une grande quantité de variations dans des « directions » différentes, ce qui a pour conséquence qu'au bout d'un grand nombre de générations, les individus appartenant à ces deux lignées diffèrent radicalement entre eux et par rapport au couple parent.*

Fait 3 : Dans le troisième chapitre de *L'Origine des espèces*, Darwin met en évidence qu'il y a une limitation des ressources auxquelles ont accès les espèces. En d'autres termes, tous les individus ne peuvent satisfaire leurs besoins vitaux (tels que l'alimentation) car il naît plus d'individus que le milieu ne peut en contenir. Darwin illustre cela avec un exemple très simple. Il rapporte que chaque femelle éléphant produit dans sa vie en moyenne 6 éléphanteaux. Donc, si tous les individus avaient un accès suffisant aux ressources vitales, on obtiendrait, au bout de 500 ans, 15 millions d'éléphants, tous descendants d'un seul

couple. Comme il n'y a pas autant d'éléphants, on peut raisonnablement conclure que les éléphants qui naissent n'ont pas tous accès aux ressources car celles-ci sont en quantité limitée. Ils ne peuvent donc pas tous laisser de descendants. Cette limitation des ressources a pour conséquence que les différents individus formant une population vont se trouver en compétition pour accéder aux ressources.

Dans le chapitre 4 de *L'Origine des espèces*, Darwin articule les faits 1, 2 et 3 présentés ci-dessus afin de formuler une hypothèse permettant d'expliquer (entre autres) l'unité, la diversité et l'adaptation des êtres vivants à leur milieu.

2/ Proposition d'une explication (Arrêt 18 : « *L'hypothèse de Darwin* »)

L'hypothèse que formule Darwin se base sur les faits 1, 2 et 3 décrits ci-dessus. Il s'agit de l'hypothèse d'évolution des espèces par sélection naturelle. Cette hypothèse s'articule en deux temps :

1/ **Etant donné** qu'au cours de la reproduction des variations apparaissent, c'est-à-dire que les descendants diffèrent de leurs ancêtres (fait 1) et que d'autre part il est possible que deux lignées puissent, au bout de nombreuses générations, différer radicalement car elles ont accumulé une grande quantité de variations différentes (fait 2), **alors** on peut proposer l'hypothèse que les espèces se transforment suivant le processus appelé par Darwin de « *descendance avec modification* ». Suivant cette hypothèse, toute la diversité des espèces résulte d'un unique ancêtre commun. L'unité retrouvée au sein du vivant s'explique par le fait que les espèces descendent toutes d'un même ancêtre. Elles ont donc toutes héritées la même structure de base. Par ailleurs, il y a une diversité entre les organismes car au cours des générations, les différentes lignées issues de l'ancêtre commun ont acquis de légères modifications.

2/ **Etant donné** que les ressources sont limitées par rapport au nombre d'individus qu'il naît dans un environnement (fait 3) et qu'il apparaît de la variation au cours de la reproduction (fait 1), **alors** si certaines de ces variations permettent de mieux exploiter les ressources de l'environnement, les individus qui les portent laisseront plus de descendants que les autres. Puisque ces variations sont héréditaires, alors à la génération suivante les individus portant les variations favorables seront en plus grand nombre et au bout d'un certain nombre de générations, ils composeront la plus grande partie de la population. On parle alors de reproduction différentielle pour illustrer l'idée que tous les individus n'ont pas le même succès reproducteur. Ce processus, qualifié par Darwin de « sélection naturelle », explique pourquoi les espèces ont des caractéristiques qui sont spécifiques à des environnements précis, c'est-à-dire des adaptations. Il faut noter trois remarques importantes au sujet de la sélection naturelle :

Remarque 1 – Il peut y avoir évolution sans sélection naturelle. Dans ce cas, les variations continuent d'apparaître au cours de la reproduction (il y donc bien descendance avec modification et transformation des espèces), mais les variations qui apparaissent ne changent en rien la capacité des individus qui les portent à exploiter les ressources de l'environnement et donc leur succès reproducteur. On dit qu'il s'agit de variations neutres (car elles n'ont pas d'impact sur le succès reproducteur).

Remarque 2 – Les variations qui sont la source du processus de sélection naturelle causent le plus souvent des différences de succès reproducteurs très légères. Le processus de sélection naturelle est souvent perçu sous une forme extrême, dans laquelle les variations provoquent la mort des individus (ils n'ont donc aucun descendant) tandis que d'autres parviennent à « survivre » et à laisser des descendants. C'est beaucoup plus nuancé que cela. Dans la majorité des cas, les variations qui apparaissent ne causent que de très légères différences de succès reproducteur entre les individus. Ces légères différences

suffisent cependant à ce que les descendants des individus portant les variations favorables « envahissent » la population en l'espace de quelques générations. La sélection naturelle résulte d'une reproduction différentielle entre les individus d'une même espèce (c'est-à-dire des différences au niveau du nombre de descendants laissés par les individus).

Remarque 3 – Les variations apparaissent au hasard, c'est-à-dire indépendamment des besoins de l'organisme (et c'est d'ailleurs là le principal point de divergence avec Lamarck). L'apparition d'une variation permettant de mieux exploiter les ressources de l'environnement et d'augmenter le succès reproducteur n'est qu'une pure coïncidence.

L'hypothèse d'évolution par descendance avec modification par la sélection naturelle est résumée dans l'encadré ci-dessous :

HYPOTHESE : Les espèces descendent les unes des autres par descendance avec modification. Au cours de ce processus, il y a une conservation des variations favorables au détriment des variations défavorables (car les ressources sont limitées). C'est le principe d'évolution par sélection naturelle, qui est un des moteurs du processus de descendance avec modification, et qui est à l'origine des adaptations.

A ce stade de la démarche hypothético-déductive, nous avons vu les faits sur lesquels s'est basé Darwin pour proposer son hypothèse, ainsi que l'hypothèse dans ses détails. Nous allons maintenant procéder au test de l'hypothèse, en nous basant sur de nouvelles observations.

3/ Déduction des faits permettant de tester la validité de l'hypothèse et observation de ces faits :

Une fois l'hypothèse d'évolution par descendance avec modification sous l'action de la sélection naturelle exposée, Darwin consacre le reste de *L'Origine des espèces* à en tester la validité. Pour cela il déduit des conséquences de son hypothèse, avec un discours du type « si l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle est valide, alors je devrais observer tel ou tel événement dans la nature ». Ensuite, il rassemble une quantité considérable de faits, afin de voir s'ils s'accordent avec les conséquences déduites de son hypothèse. Comme nous allons le voir, il y a une grande quantité de faits indépendants qui sont rendus cohérents grâce à l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle. Dans ces cas, les scientifiques ont pour usage d'élever une hypothèse au rang de théorie.

Déduction 1 : Si l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle est valide, les organismes doivent avoir des adaptations, c'est-à-dire des comportements, des structures qui résolvent les problèmes posés par l'environnement. Par ailleurs, lorsque l'environnement est modifié, les variations qui étaient autrefois favorables ne le sont plus et on s'attend à ce que le nombre d'individus portant de telles variations diminue. Il y a trois exemples exposés à la Grande Galerie de l'Evolution qui corroborent cette déduction, celui de la phalène du bouleau, celui de l'escargot des haies et enfin celui du mimétisme chez les papillons. Bien que Darwin n'ait pas fait appel à ces exemples, il est ici utile de les présenter.

Arrêt 19 : Fait en faveur de l'hypothèse darwinienne (1)
« La phalène confirme l'hypothèse de Darwin »

Cette vitrine illustre la variation morphologique qui existe chez un papillon nocturne, la phalène du bouleau (*Biston betularia*). Il existe chez cette espèce deux types de colorations, avec des individus plutôt sombres, et d'autres qui sont plutôt de coloration claire. Comme

leur nom l'indique, l'habitat préférentiel de ces papillons est la forêt de bouleaux (*Betula* sp.). Ces arbres ont un tronc de couleur claire. Par conséquent, les papillons de couleur claire sont mieux protégés des prédateurs (qui sont des oiseaux) puisqu'ils se camouflent mieux de par leur mimétisme. Ainsi, d'après la déduction 1, on s'attend à ce que les papillons de couleur claire soient majoritaires par rapport aux papillons de couleur sombre, le nombre de ces derniers étant régulé par les prédateurs. C'est effectivement ce qui a été observé par les naturalistes anglais de la première moitié du 19^{ème}. Seulement, lors de la révolution industrielle, les fumées libérées par l'activité industrielle ont noirci les troncs des bouleaux. L'effet de cette modification de l'habitat des phalènes s'est répercuté sur les fréquences des deux colorations. Les naturalistes ont observé une diminution du nombre d'individus de couleur claire, au profit des individus de couleur sombre qui sont devenus majoritaires. Ceci s'explique par le fait que c'étaient cette fois les individus sombres les mieux camouflés, ce qui leur permettait de laisser plus de descendants et donc d'augmenter en nombre par rapport aux individus clairs qui étaient quant à eux devenus visibles des prédateurs. Mais l'histoire ne s'arrête pas là. Dans les localités où des mesures anti-pollution ont été prises, les troncs des bouleaux sont redevenus clairs. On observe dans ces localités que les papillons de couleur claire sont à nouveau majoritaires en nombre par rapport aux individus sombres.

Ces observations sont en accord avec la déduction 1 exposée ci-dessus et donc étayent l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle. On voit en effet que parmi les différents variants d'une population, ceux qui détiennent la variation qui permet de vivre dans de meilleures conditions (dans le cas présent, il est question de mieux échapper aux prédateurs), de mieux exploiter les ressources de l'environnement, et donc de laisser plus de descendants, deviennent majoritaires en l'espace de quelques générations.

Arrêt 20 : Fait en faveur de l'hypothèse darwinienne (2) : évolution de la coquille des escargots des haies - « Les escargots confirment l'hypothèse de Darwin »

Cette vitrine fournit un deuxième exemple corroborant la déduction 1. L'espèce d'escargot *Cepea nemoralis* comporte des populations dont les individus ont majoritairement une coquille blanche uniforme, et d'autres populations dont les individus ont majoritairement une coquille blanche striée de bandes noires. Les populations d'individus à la coquille blanche sont trouvés préférentiellement dans les espaces « ouverts » (les prairies) tandis que ceux à la coquille striée se trouvent plutôt dans les milieux « fermés » (les milieux boisés). Ces escargots ont pour prédateurs des oiseaux. On peut donc penser qu'il y a eu sélection des individus à coquille striée dans les forêts (les individus clairs étant plus facilement repérés, et donc mangés) tandis qu'il y a eu sélection pour les individus de coquille blanche uniforme dans les prairies (les individus striés étant plus facilement repérables dans cet autre habitat).

A nouveau, cet exemple montre que les individus portant les variations favorables (en l'occurrence des variations permettant de mieux échapper aux prédateurs) à des conditions environnementales données laissent plus de descendants et sont donc observés en plus grand nombre.

Arrêt 21 : Fait en faveur de l'hypothèse darwinienne (3) : le mimétisme chez les papillons venimeux - « Les papillons confirment l'hypothèse de Darwin »

Le genre *Amauris* est un papillon toxique pour ses prédateurs tandis que le genre *Papilio* ne l'est pas. Ils ont chacun un patron chromatique différent. Ces deux genres présentent des aires de distribution séparées avec une aire de chevauchement et on relève que certains individus du genre *Papilio*, qui vivent dans cette aire de chevauchement, ont le même patron chromatique que les *Amauris*.

Ces observations corroborent également notre première déduction. Les individus du genre *Amauris* vivent avec des oiseaux prédateurs. Ainsi, ceux chez qui est apparue la toxicité ont été sélectionnés. Ceci ne peut se produire que si du côté des oiseaux, certains variants ont acquis la capacité à discerner les papillons toxiques des non toxiques et à ne manger que ces derniers. Les papillons du genre *Papilio* ne vivent pas en présence de prédateurs. Mais lorsque c'est le cas, toute modification fortuite de patron de coloration qui rapproche le *Papilio* de la coloration des *Amauris* aura avantagé ses porteurs. En effet, de proche en proche, ils sont davantage évités par les prédateurs car ces derniers les assimilent aux *Amauris*, qu'ils évitent. A nouveau, l'hypothèse de la sélection naturelle permet d'expliquer des observations.

Déduction 2 : Si l'hypothèse d'évolution par descendance avec modification sous l'action de la sélection naturelle est valide, alors on devrait pouvoir suivre l'évolution de certains caractères le long des couches fossilifères.

Arrêt 22 : Fait en faveur de l'hypothèse darwinienne (4) : la distribution stratigraphique des espèces - « La stratigraphie confirme l'hypothèse de Darwin »

La déduction 2 est corroborée par de nombreuses données fossiles. Un exemple est illustré par cette vitrine, dans laquelle sont représentés les membres postérieurs de cétacés actuels et fossiles. Lorsque l'on s'intéresse au membre postérieur d'un *Ambulocetus* (une forme de cétacé ayant vécu il y a environ 50 millions d'années dont on a retrouvé des fossiles), on s'aperçoit que les cétacés avaient à cette époque un membre postérieur très développé. Or, les cétacés actuels ont un membre postérieur quasi inexistant (cf l'illustration de baleine présentée dans la vitrine). Si l'on s'intéresse maintenant à la description du membre postérieur fossile d'un *Basilosaurus*, cétacé ayant vécu il y environ 40 millions d'années, on voit que ce membre est réduit par rapport à celui de l'*Ambulocetus*, mais fort développé par rapport à celui de cétacés actuels. La comparaison, dans un cadre temporel, des membres postérieurs de ces trois cétacés nous montre donc comment a évolué ce caractère au cours de l'évolution. Celui-ci a régressé et a pratiquement disparu chez les cétacés actuels.

Déduction 3 : Si l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle est valide, alors il y a une limitation pour accéder aux ressources. Ainsi, lorsqu'une extinction de masse se produit, cela libère une grande quantité d'habitats et donc de ressources. On s'attend donc à ce que la limitation pour accéder aux ressources soit levée de façon provisoire, favorisant ainsi l'émergence de nouvelles espèces.

Arrêt 23 : Fait en faveur de l'hypothèse darwinienne (5) : l'extinction d'une partie de la biodiversité à la fin du Crétacé.
« La crise Crétacé/Tertiaire confirme l'hypothèse de Darwin »

La crise crétacé/tertiaire s'est notamment soldée par la disparition des dinosaures non-aviens, ce qui a eu pour effet de libérer des niches écologiques (c'est-à-dire des ressources et des habitats). Les archives fossiles montrent que les mammifères, qui existaient déjà avant la crise crétacé/tertiaire, mais de petite taille, ont vu leur taille augmenter considérablement suite à la disparition des dinosaures.

A nouveau l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle explique ce fait de façon cohérente. Avant la crise crétacé/tertiaire, les mammifères chez qui apparaissaient les variations ayant pu leur permettre d'occuper les niches écologiques des dinosaures non-aviens se trouvaient en compétition avec ces derniers et étaient éliminés. Après la crise crétacé/tertiaire, les niches occupées par ces dinosaures se sont libérées. Ainsi, les mammifères porteurs de ces nouvelles variations ont pu occuper les niches laissées

vacantes, favorisant les conditions d'apparition de nouvelles espèces. On parle alors de radiation adaptative.

Ainsi, lorsqu'une extinction de masse se produit, une grande quantité d'habitats et donc de ressources se trouve libérée. La limitation pour accéder aux ressources est levée, de façon provisoire, favorisant ainsi l'émergence de nouvelles espèces.

Déduction 4 : Si l'hypothèse d'évolution par sélection naturelle est valide, alors nous partageons un ancêtre commun avec les autres organismes. Par conséquent il doit rester des traces de cet héritage commun.

Lorsque l'on regarde le développement embryonnaire d'un mammifère on aperçoit, lors des étapes précoces du développement, l'apparition de fentes branchiales (qui régressent par la suite). L'hypothèse darwinienne explique ce fait : si les mammifères partagent un ancêtre commun avec les organismes ayant des branchies et que cet ancêtre était muni de branchies, alors il n'est pas étonnant que les mammifères aient hérité de cet ancêtre une capacité rudimentaire à fabriquer des fentes branchiales. Quelle autre explication sinon pourrait-on donner au fait que des branchies apparaissent lors des étapes précoces du développement des mammifères ? Aucune autre explication n'explique cela de façon plus cohérente que l'hypothèse darwinienne.

Arrêt 24 : *Quoi de neuf depuis Darwin ?*
« *Quoi de neuf depuis Darwin ?* »

Deux éléments sont essentiels à la théorie darwinienne. D'une part il faut que des variations apparaissent et d'autre part, il faut que ces variations soient héréditaires. Darwin a observé ces variations et leur transmission héréditaire, mais il ignorait les modalités suivant lesquelles ces variations apparaissaient et se transmettaient. Les successeurs de Darwin ont largement précisé ces modalités. Ainsi, Gregor Mendel (1822-1884) a précisé les modalités suivant lesquelles se transmettaient les variations de génération en génération. Suite aux prédictions de Walter Sutton, le généticien Thomas Hunt Morgan et son école ont par la suite montré que l'information génétique était portée par les chromosomes. En 1953, Watson et Crick ont présenté la structure du support biologique de ces variations héréditaires : la molécule d'ADN, présente dans toutes les cellules des organismes vivants. A partir des années 1980, les généticiens du développement ont élargi les connaissances concernant la façon dont des modifications de l'ADN pouvaient modifier le développement des organismes, précisant ainsi les mécanismes à l'origine des variations. Ils ont par exemple été en mesure de modifier expérimentalement le développement de mouches, par l'obtention de mouches avec des pattes à la place des antennes...

Un des apports majeurs depuis Darwin est d'avoir reconnu à la fin des années 60, avec le biologiste japonais Motoo Kimura, qu'une part très importante de la variation génétique ne donnait pas prise à la sélection naturelle. Contrairement à ce qui a été trop souvent dit, ceci n'est pas une contradiction du fait sélectif mais un complément. En effet, cela n'empêche pas certains gènes d'être sous de fortes pressions sélectives. Il y a même mieux : d'un point de vue méthodologique, l'hypothèse nulle de neutralité rend plus efficace encore la possibilité de démonstration d'un effet sélectif. En d'autres termes, on peut partir de l'hypothèse que le caractère étudié n'est pas sous l'emprise de la sélection, et tester expérimentalement cette hypothèse.

Conclusion 1 : Quelles hypothèses privilégier pour expliquer l'unité, la diversité et l'adaptation des êtres vivants à leur milieu de vie ?

- **Unité et diversité du vivant** : les arrêts 11 à 14 nous ont apportés des observations qui appuient l'hypothèse n°3, (descendance avec modification). En effet, l'arrêt 11 montre que sur un petit nombre de générations, des variations apparaissent chez les descendants : ils diffèrent entre eux et ils diffèrent de leurs ancêtres. Par ailleurs, lors des arrêts 12,13 et 14 (portant sur la domestication) nous avons vu que ces variations pouvaient, si elles étaient accumulées pendant un grand nombre de générations, donner naissance à de nouvelles espèces. Toutes ces observations sont cohérentes avec l'idée que les organismes descendent tous d'un ancêtre commun unique et se sont diversifiés au cours des générations, par l'accumulation de variations apparues au cours de la reproduction.

- **Adaptations des êtres vivants** : les exemples présentés dans les arrêts 19, 20, 21 et 23 appuient tous l'hypothèse n°3. Dans ces quatre exemples, on assiste à une augmentation de la fréquence des individus qui présentaient les variations leur permettant de mieux survivre (et donc de mieux se reproduire) dans un milieu donné.

Les hypothèses 1 et 2 proposées pour expliquer l'unité, la diversité et l'adaptation des êtres vivants stipulent que l'usage d'un organe, ou bien l'environnement, modifierait la structure de cet organe. Ceci est une explication qui a été proposée par Lamarck pour rendre compte d'une évolution et d'une adaptation des organismes. Pour que ces hypothèses soient correctes, il faudrait que les modifications induites par l'usage et/ou l'environnement puissent être transmises à la descendance. Or, il n'existe aucune observation qui permette de corroborer ce mécanisme. Par conséquent on ne peut pas la considérer valide.

Conclusion 2 : La scientificité du raisonnement darwinien

Le raisonnement darwinien suit un cadre hypothético-déductif, suivant lequel on propose des hypothèses basées sur des faits, que l'on vérifie en s'appuyant sur des observations basées sur d'autres faits. Il s'agit donc d'un raisonnement scientifique.

L'hypothèse darwinienne est en accord avec de nombreux faits qu'elle explique simplement et de façon cohérente. Il s'agit donc d'une théorie.

Conclusion 3 : Les apports de la théorie darwinienne à la société.

La découverte et l'étude de l'évolution des espèces a beaucoup apporté à la société. La théorie de l'évolution explique l'origine de la diversité du vivant, ainsi que l'apparition des nouvelles espèces, y compris l'espèce humaine.

Par ailleurs, notre connaissance de l'évolution a de nombreuses applications pratiques, notamment dans les domaines de la médecine, de l'agriculture et de l'écologie. En **médecine**, la mise en pratique de la théorie de l'évolution nous permet de mieux lutter contre tous les microorganismes (bactéries, virus...), qui ont évolué, et évoluent encore, à l'intérieur de notre corps. En **agriculture**, nos connaissances sur l'évolution permettent de protéger nos champs et nos élevages contre leurs ennemis naturels (certains insectes par exemple), sans utiliser de produits chimiques. En **écologie**, les études sur l'évolution aident à prévoir et à anticiper les dégâts causés par l'homme dans la nature, du fait des modifications climatiques dont il est responsable.

Les sciences et les religions se sont entrechoquées tout au long de leur histoire sur l'origine des espèces et de l'homme. Comment expliquer cet état de friction permanent ? Ces deux activités opèrent chacune à l'intérieur d'un périmètre bien déterminé. **L'activité scientifique** consiste à décrire et à comprendre rationnellement le fonctionnement de la nature grâce à des théories, des faits, et des méthodes acceptés par tous les scientifiques. **L'activité religieuse** a pour objectif de construire un lien communautaire définissant ce qui peut être considéré comme « bien » ou « mal » et régissant des espoirs. Ces notions peuvent varier radicalement d'une religion à une autre, tandis que la méthodologie scientifique est relativement similaire entre tous les membres de la communauté professionnelle. La science et la religion répondent donc à des besoins existentiels différents : la compréhension rationnelle du fonctionnement de la nature et l'emprise sur le monde physique pour la science ; être rassuré sur demain, sur les questions qu'on ne résout pas, être dans une communauté spirituelle, l'emprise sur le monde métaphysique pour la religion. Les frictions entre les deux disciplines arrivent lorsque les religions débordent sur l'activité scientifique en essayant de dicter, sur la base d'une morale, ce qui est vrai ou faux au sujet de la réalité, ou bien lorsque les scientifiques débordent sur l'activité religieuse en construisant une morale concernant le « bien » ou le « mal » à partir des faits qu'ils mettent en évidence par leurs méthodes.

Bibliographie et sites internet

- **Plate-forme d'enseignement et de formation du Muséum national d'Histoire naturelle**
<http://plateforme-depf.mnhn.fr>
- **Site web du CNRS sur l'évolution :**
<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/accueil.html>
- **Actes du colloque INRP « enseigner l'évolution ». Paris. 2009.**
<http://acces.inrp.fr/acces/formation/formations/confs/enseigner-evolution>
- **Darwin, Charles** (Ed. 1985 ; Ed originale 1859). *L'Origine des espèces*. Paris. La Découverte.
- **Drouin, Jean-Marc**. *L'herbier des philosophes*. Science ouverte. Seuil. Paris. 2008
- **Fortin, Corinne**. *L'évolution à l'école – Créationnisme contre darwinisme ?* Armand Collin. 2009.
- **Gouyon, Pierre-Henri ; Henry, Jean-Pierre & Arnoult, Jacques**. *Les Avatars du gène*, Paris, Belin, 1997.
- **Jacob François**. *Le Jeu des possibles. Essai sur la diversité du vivant*. 1981 ; Fayard.
- **Lecointre, Guillaume (dir.)**. *Guide Critique de l'Evolution*. Belin. 2009.
- **Lecointre, Guillaume, Le Guyader, Hervé & Visset, Dominique** (2006). *Classification Phylogénétique du Vivant*. Paris : Belin. 2005.