



CHAPITRE 1

La biologie, une science

Aperçu du chapitre

- 1.1 La science de la vie
- 1.2 La nature de la science
- 1.3 Un exemple de recherche scientifique : Darwin et l'évolution
- 1.4 Les thèmes unificateurs de la biologie

Introduction

Vous vous embarquez dans un voyage de découverte de la nature de la vie. Il y a plus de 180 ans un jeune naturaliste anglais nommé Charles Darwin s'embarqua, lui aussi, pour un grand voyage à bord du H.M.S. *Beagle*, dont une reproduction figure ci-dessus. Ce que Darwin apprit pendant son périple de cinq ans l'a conduit au développement de la théorie de l'évolution par sélection naturelle, théorie qui est aujourd'hui au cœur de la biologie. Le voyage de Darwin paraît donc un bon point de départ pour entreprendre notre exploration de l'étude scientifique des organismes vivants et de la façon dont ils ont évolué. Avant de commencer, consacrons cependant quelques instants à réfléchir à ce qu'est la biologie et aux raisons de son importance.

1.1 La science de la vie

Objectifs

1. Comparer la biologie aux autres sciences naturelles
2. Décrire les caractéristiques des systèmes vivants
3. Reconnaître l'organisation hiérarchique des systèmes vivants

L'époque actuelle est la plus passionnante de l'histoire de la biologie. La quantité d'informations disponibles sur la nature a explosé au cours des dernières décennies. Nous sommes actuellement en mesure de poser et de résoudre des questions auxquelles on ne pouvait que rêver jusque récemment.

La séquence complète du génome humain a été décrite dès le début du 21^e siècle. Ce projet, le plus important dans l'histoire de la biologie, a pris environ 20 ans. Quinze ans plus tard, le séquençage d'un génome n'est plus qu'une question de quelques jours. Ce flot de données de séquençages et d'analyses génomiques a profondément modifié le paysage de la biologie. Ces découvertes – et d'autres – ont eu un impact énorme dans le domaine médical en apportant de nouveaux outils de diagnostic et de traitement. Grâce à la robotique, au traitement d'image

avancé et aux techniques analytiques, nous disposons d'outils qui appartaient jusque récemment au domaine de la science-fiction.

Dans le présent ouvrage, nous tentons de présenter un tableau actualisé de la biologie mais aussi de fournir des bases historiques et des perspectives expérimentales de cette discipline en pleine évolution. Dans ce premier chapitre, introductif, nous examinons la nature de la biologie et les fondements de la science en général, en vue de placer dans son contexte l'information présentée dans la suite de l'ouvrage.

La biologie unifie une bonne part des sciences naturelles

L'étude de la biologie est un point de convergence de l'information et des outils fournis par l'ensemble des sciences naturelles. Les systèmes biologiques sont les systèmes chimiques les plus complexes sur terre, et leurs fonctions multiples sont déterminées et contraintes par les principes de la chimie et de la physique ; autrement dit, l'étude de la biologie ne permet pas de mettre en évidence de nouvelles lois de la nature, mais éclaire et illustre la mise en œuvre de ces lois.

Les activités chimiques complexes des cellules peuvent être comprises à partir des outils et des principes de la chimie. Chaque niveau d'organisation biologique est gouverné par la nature des transformations d'énergie, conformément à ce que nous a appris l'étude de la thermodynamique. Les systèmes biologiques ne représentent aucune forme nouvelle de matière, même s'ils constituent l'organisation la plus complexe connue de la matière. La complexité des systèmes vivants est rendue possible grâce à la présence d'une source constante d'énergie, le soleil. La conversion de cette énergie radiante en molécules organiques par la photosynthèse est l'une des réactions les plus belles et complexes connues en chimie et en physique.

Les problèmes posés par la science sont de plus en plus difficiles, ce qui oblige à modifier la manière de les appréhender. La science

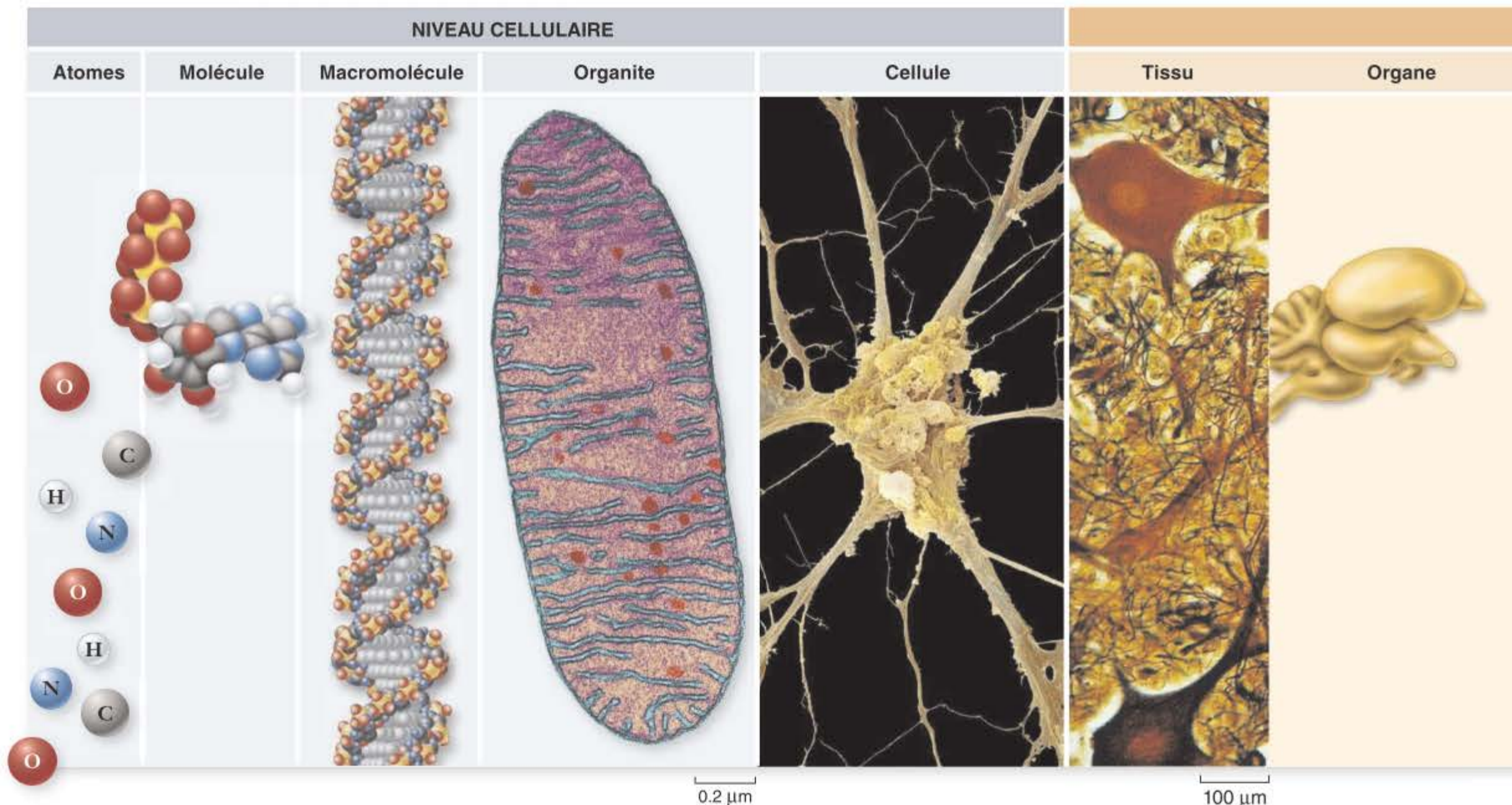
devient plus multidisciplinaire, combinant l'expertise de diverses disciplines traditionnelles avec de nouveaux domaines tels que celui de la nanotechnologie. La biologie est au cœur de cette approche multidisciplinaire étant donné que les problèmes biologiques requièrent souvent des approches variées pour aboutir aux solutions.

La vie ne se plie pas à une définition simple

Dans son sens le plus large la biologie est l'étude des êtres vivants, *la science de la vie*. Il existe une diversité stupéfiante d'êtres vivants, qui peuvent être étudiés sous différents angles : des biologistes vivent parmi les gorilles, d'autres récoltent des fossiles ou écoutent les baleines, certains déchiffrent les messages codés dans les longues molécules de l'hérédité ou mesurent le nombre de battements par seconde des ailes des colibris.

Qu'est-ce qui permet de dire qu'une chose est « vivante » ? Tout le monde conviendra qu'un cheval qui galope est vivant et qu'une voiture ne l'est pas, mais pourquoi ? On ne peut pas dire « s'il bouge, il est vivant » : une voiture peut se déplacer, de la gélatine peut trembler dans un bol, on ne dira cependant pas que ces objets sont vivants. Bien que nous ne puissions pas définir la vie par une seule phrase simple, nous pouvons la circonscrire par une série de sept caractéristiques partagées par les êtres vivants.

- **Organisation cellulaire.** Tous les organismes sont constitués d'une ou de plusieurs cellules. Généralement trop petite pour être visible à l'œil nu, une cellule réalise l'ensemble des activités de base du vivant. Toute cellule est délimitée par une membrane qui la sépare du milieu dans lequel elle se trouve.
- **Complexité ordonnée.** Tous les objets vivants sont complexes et hautement ordonnés. Notre corps est composé d'un grand nombre de cellules différentes et chacune d'elles possède des structures moléculaires complexes. Nombre d'objets non vivants



eux aussi sont complexes, mais ils ne manifestent pas ce degré de complexité ordonnée.

- **Sensibilité.** Tous les organismes répondent à des stimulus : les plantes s'orientent vers la lumière, les pupilles de nos yeux se dilatent quand nous sommes dans l'obscurité.
- **Croissance, développement et reproduction.** Tous les organismes sont capables de croître et de se reproduire et possèdent des molécules héritées qu'elles transmettent à leur descendance, assurant que celle-ci appartient à la même espèce.
- **Utilisation d'énergie.** Tous les organismes absorbent de l'énergie qu'ils utilisent pour effectuer divers travaux. Chacun de nos muscles est alimenté par l'énergie qui nous est fournie dans les aliments que nous ingérons.
- **Homéostasie.** Tous les organismes maintiennent des conditions internes relativement constantes, différentes de celles du milieu environnant, un phénomène dénommé **homéostasie**. C'est ainsi par exemple que la température de notre corps est pratiquement constante malgré les écarts de température du milieu extérieur.
- **Adaptation évolutive.** Tous les organismes interagissent avec d'autres organismes et avec leur environnement inanimé, qui influencent leur survie ; ils développent en conséquence des adaptations à cet environnement.

Les systèmes vivants manifestent une organisation hiérarchisée

L'organisation du monde vivant est hiérarchisée, c'est-à-dire que chaque niveau se construit sur le niveau sous-jacent.








1. **Le niveau de la cellule.** Au niveau cellulaire (figure 1.1) les **atomes**, éléments fondamentaux de la matière, se trouvent regroupés en

ensembles appelés **molécules**. Des biomolécules complexes sont assemblées en structures microscopiques dénommées **organites** ; ceux-ci sont intégrés dans des unités délimitées par une membrane, dénommées **cellules**. La cellule est l'unité de base de la vie.

Un grand nombre d'organismes – la plupart des bactéries et de nombreux protistes – sont constitués d'une seule cellule. Tous les animaux et végétaux, de même que la plupart des champignons et certains protistes sont par contre pluricellulaires.

2. **Le niveau de l'organisme.** Les cellules des organismes pluricellulaires complexes sont regroupées selon trois niveaux d'organisation. A la base on trouve les **tissus**, ensembles de cellules semblables formant une unité fonctionnelle. Plusieurs tissus différents sont à leur tour regroupés en **organes** qui constituent une unité de structure et de fonction. Notre cerveau par exemple est un organe constitué de cellules nerveuses et de divers tissus associés qui forment des recouvrements protecteurs et des éléments figurés du sang. Au troisième niveau d'organisation, les organes sont regroupés en **systèmes d'organes**. Le système nerveux par exemple comporte des organes sensoriels, le cerveau, la moelle épinière et les neurones qui transmettent des signaux.

Figure 1.1 Organisation hiérarchisée des êtres vivants. La vie est hautement organisée, hiérarchisée depuis l'atome jusqu'aux organismes pluricellulaires complexes. Des atomes se lient en formant des molécules, qui sont assemblées pour former des structures plus complexes, telles que des organites, qui à leur tour forment des sous-systèmes responsables de fonctions variées. Les cellules peuvent être organisées en tissus, puis en organes et en systèmes d'organes tels que le système nerveux des oies ici représentées. Cette organisation s'étend au delà des organismes individuels jusqu'aux populations, communautés, écosystèmes et finalement la biosphère dans son ensemble.

NIVEAU DE L'ORGANISME		NIVEAU DES POPULATIONS				
Système d'organes	Organisme	Population	Espèces	Communauté	Écosystèmes	Biosphère
						

3. **Le niveau de la population.** Les organismes individuels sont organisés selon différents niveaux de hiérarchie dans le monde vivant. Le niveau de base est la **population**, groupe d'organismes appartenant à une même espèce et regroupés géographiquement. L'ensemble des populations d'un type particulier d'organisme constitue une **espèce**, dont tous les membres se ressemblent et sont interféconds. Plus haut dans la hiérarchie, on trouve les **communautés biologiques**, comprenant toutes les populations des diverses espèces vivant dans un même lieu.
4. **Le niveau de l'écosystème.** Au plus haut niveau d'organisation biologique, des populations d'organismes interagissent entre elles et avec leur environnement physique. Ensemble, ces populations et leur environnement constituent un système écologique ou **écosystème**. C'est ainsi par exemple qu'une communauté biologique de prairie de montagne interagit considérablement et de diverses manières avec le sol, l'eau et l'atmosphère de cet écosystème de montagne.
5. **La biosphère.** Notre planète dans son ensemble peut être considérée comme un écosystème, que nous désignons biosphère.

À chaque niveau d'organisation du monde vivant apparaissent de nouvelles propriétés. Ces propriétés, dites **propriétés émergentes**, ne sont pas nécessairement prévisibles. L'examen des cellules individuelles d'un animal par exemple ne permet pas de se faire une idée de ce à quoi ressemble le dit animal dans son ensemble. Nombre de phénomènes météorologiques, tels les ouragans, sont en fait des propriétés émergentes de plusieurs variables météorologiques qui interagissent. La difficulté de définir la vie est liée au fait que le monde vivant manifeste de nombreuses propriétés émergentes.

Ce qui a été dit ci-dessus à propos des caractéristiques communes et de l'organisation des systèmes vivants aide à appréhender la nature de ce qui est vivant. La suite du présent ouvrage illustre et développe ces idées de base en vue de fournir une description plus complète des systèmes vivants.

Synthèse 1.1

La biologie est une science unificatrice qui regroupe d'autres sciences naturelles, telles que la chimie et la physique, en vue d'étudier les systèmes vivants. Il n'existe pas de définition simple de la vie, mais les systèmes vivants partagent un certain nombre de propriétés qui, ensemble, décrivent la vie. Les systèmes vivants sont organisés hiérarchiquement, depuis le niveau cellulaire jusqu'à la biosphère dans son ensemble ; à chaque niveau peuvent émerger des propriétés nouvelles, s'ajoutant aux propriétés antérieures.

- Est-il possible d'étudier la biologie sans étudier d'autres sciences ?

1.2 Nature de la science

Objectifs

1. Comparer les divers types de raisonnement utilisés par les biologistes
2. Montrer comment on formule une hypothèse

Pas plus que la vie, la science ne se prête à une définition simple. Pendant de nombreuses années des scientifiques ont parlé de la « méthode scientifique », comme s'il y avait une seule voie pour faire de la science. Cette simplification outrancière a contribué à la confusion régnant auprès des non-scientifiques quant à la nature de la science.

Fondamentalement la science tend à améliorer, par l'observation et le raisonnement, notre compréhension du monde qui nous entoure. Au départ, on admet que les forces naturelles actuellement en action l'ont toujours été, que la nature fondamentale de l'univers est inchangée depuis le commencement, et qu'il n'est pas en train de changer aujourd'hui. Les phénomènes naturels peuvent être étudiés de diverses manières, il n'y a pas une méthode scientifique unique.

Les scientifiques essaient d'interpréter objectivement les données et observations qu'ils ont collectées. Compte tenu de ce qu'ils sont des êtres humains, ceci n'est pas entièrement possible, mais la science étant une œuvre collective soumise à vérification, elle se corrige elle-même. Les résultats d'un chercheur sont vérifiés par d'autres chercheurs et, si ces résultats ne peuvent être reproduits, ils sont rejetés.

La science est en grande partie descriptive

Selon la vision classique de la méthode scientifique, les observations mènent à émettre des hypothèses ; celles-ci permettent d'établir des prédictions qui peuvent être testées expérimentalement. C'est ainsi que de nouvelles idées sont évaluées, avec impartialité, pour acquérir une vision de plus en plus exacte de la nature. Nous discuterons dans la suite de la présente section cette manière de faire la science, mais il est important de comprendre que la science est pour une large part purement descriptive : si l'on veut comprendre quelque chose, la première étape consiste à la décrire complètement. Une part importante de la biologie est consacrée à la description de plus en plus précise de la nature.

L'étude de la biodiversité est un exemple de science descriptive qui a des implications, non seulement sociétales mais également dans d'autres aspects de la biologie. Des efforts sont en cours en vue de classer tous les êtres vivants. Ce projet ambitieux est purement descriptif, mais il aboutira à une bien meilleure compréhension de la biodiversité ainsi que de l'impact de notre espèce sur celle-ci.

Un des plus importants accomplissements de la biologie moléculaire à l'aube du xxi^e siècle fut la description complète de la séquence du génome humain. Cette connaissance générera de nombreuses hypothèses nouvelles à propos de la biologie humaine, et de nombreuses expériences seront nécessaires pour tester ces hypothèses, mais la détermination de la séquence elle-même était de la science descriptive.

La science fait appel à des raisonnements déductifs et inductifs

La logique reconnaît deux voies opposées menant à des conclusions logiques : les raisonnements déductif et inductif. La science utilise ces deux méthodes, mais c'est l'induction qui constitue la principale voie de raisonnement de la science fondée sur l'hypothèse.

Le raisonnement déductif

Le **raisonnement déductif** prédit des résultats spécifiques sur base de principes généraux. Il y a plus de 2 200 ans le savant grec Eratosthène s'est basé sur la géométrie euclidienne et le raisonnement déductif pour estimer avec précision la circonférence de la terre (figure 1.2). Le raisonnement déductif est le mode de raisonnement des mathématiciens et des philosophes, mais il est également utilisé dans toutes les branches de la connaissance pour tester

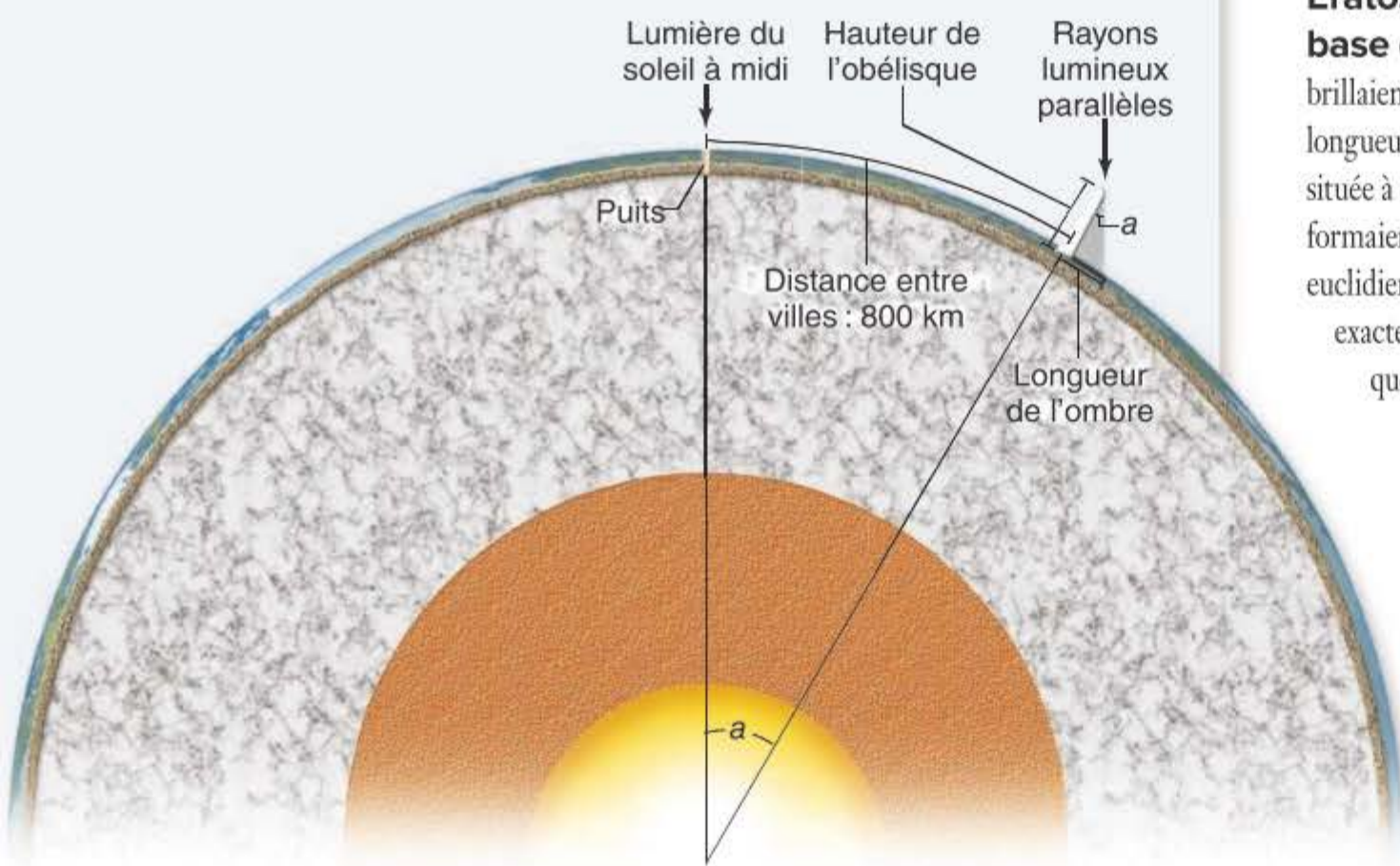


Figure 1.2 Raisonnement déductif : comment Ératosthène estima la circonférence de la terre sur base d'un raisonnement déductif. 1. Un jour où les rayons solaires brillaient au fond d'un puits situé à Syène, en Égypte, Ératosthène mesura la longueur de l'ombre portée par une grande obélisque dans la ville d'Alexandrie située à 800 kilomètres. 2. La longueur de l'ombre et la hauteur de l'obélisque formaient les deux côtés d'un triangle. Tirant parti des principes de la géométrie euclidienne récemment décrits, Ératosthène calcula l'angle a , soit 7° et $12'$ ou encore exactement $\frac{1}{50}^\circ$ du cercle (360°). 3. Si l'angle a vaut $\frac{1}{50}^\circ$ du cercle il en découle que la distance entre l'obélisque d'Alexandrie et le puits de Syène doit évaluer $\frac{1}{50}^\circ$ de la circonférence de la terre. 4. Ératosthène avait appris que le trajet à dos de chameau depuis Alexandrie jusqu'à Syène prenait cinquante jours. Estimant qu'un chameau parcourait une distance de 18,5 kilomètres par jour, il estima la distance entre l'obélisque et le puits à 925 kilomètres (il n'utilisait évidemment pas les mêmes unités de mesure). 5. Ératosthène conclut donc que la circonférence de la terre était de $50 \times 925 = 46\,250$ kilomètres. Selon les mesures actuelles la distance entre l'obélisque et le puits est un peu supérieure à 800 kilomètres. Si Ératosthène s'était basé sur cette valeur il aurait obtenu une valeur de $50 \times 800 = 40\,000$ kilomètres. La circonférence réelle est de 40 075 kilomètres.

la validité d'idées générales. Par exemple si, par définition, tous les mammifères possèdent des poils et si vous trouvez un animal dépourvu de poils, vous pouvez conclure que celui-ci n'est pas un mammifère. Le biologiste utilise le raisonnement déductif pour inférer, à partir des caractéristiques d'un spécimen, l'appartenance de celui-ci à une espèce donnée.

Le raisonnement inductif

Dans le **raisonnement inductif**, la logique évolue en sens opposé, du particulier au général. C'est à partir d'observations spécifiques que le raisonnement inductif construit des principes généraux. Par exemple, si les caniches ont des poils, de même que les terriers et tous les autres chiens que vous observez, vous pouvez conclure que tous les chiens sont poilus. Le raisonnement inductif mène à des généralisations qui peuvent ensuite être testées. C'est au XVII^e siècle que le raisonnement inductif prit de l'importance, en Europe, lorsque Francis Bacon, Isaac Newton et d'autres commencèrent à utiliser les résultats d'expériences pour induire des principes généraux concernant le fonctionnement du monde.

Le rôle des gènes homéotiques au cours du développement constitue un exemple de raisonnement inductif choisi dans la biologie moderne. L'étude de la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*, a mis en évidence des gènes capables de provoquer des modifications spectaculaires du programme de développement, telles que par exemple l'apparition d'une patte à la place d'une antenne. On a depuis trouvé de tels gènes dans pratiquement tous les animaux pluricellulaires analysés, ce qui a mené à l'idée générale que des gènes homéotiques contrôlent le programme de développement des animaux.

La science fondée sur l'hypothèse élabore des prédictions et les teste

Les scientifiques déterminent quels principes généraux sont vrais parmi tous ceux qui pourraient l'être ; pour ce faire, ils testent systématiquement les diverses propositions. Si celles-ci se montrent inconsistantes avec les résultats expérimentaux, elles sont rejetées comme fausses. La figure 1.3 illustre cette méthodologie.

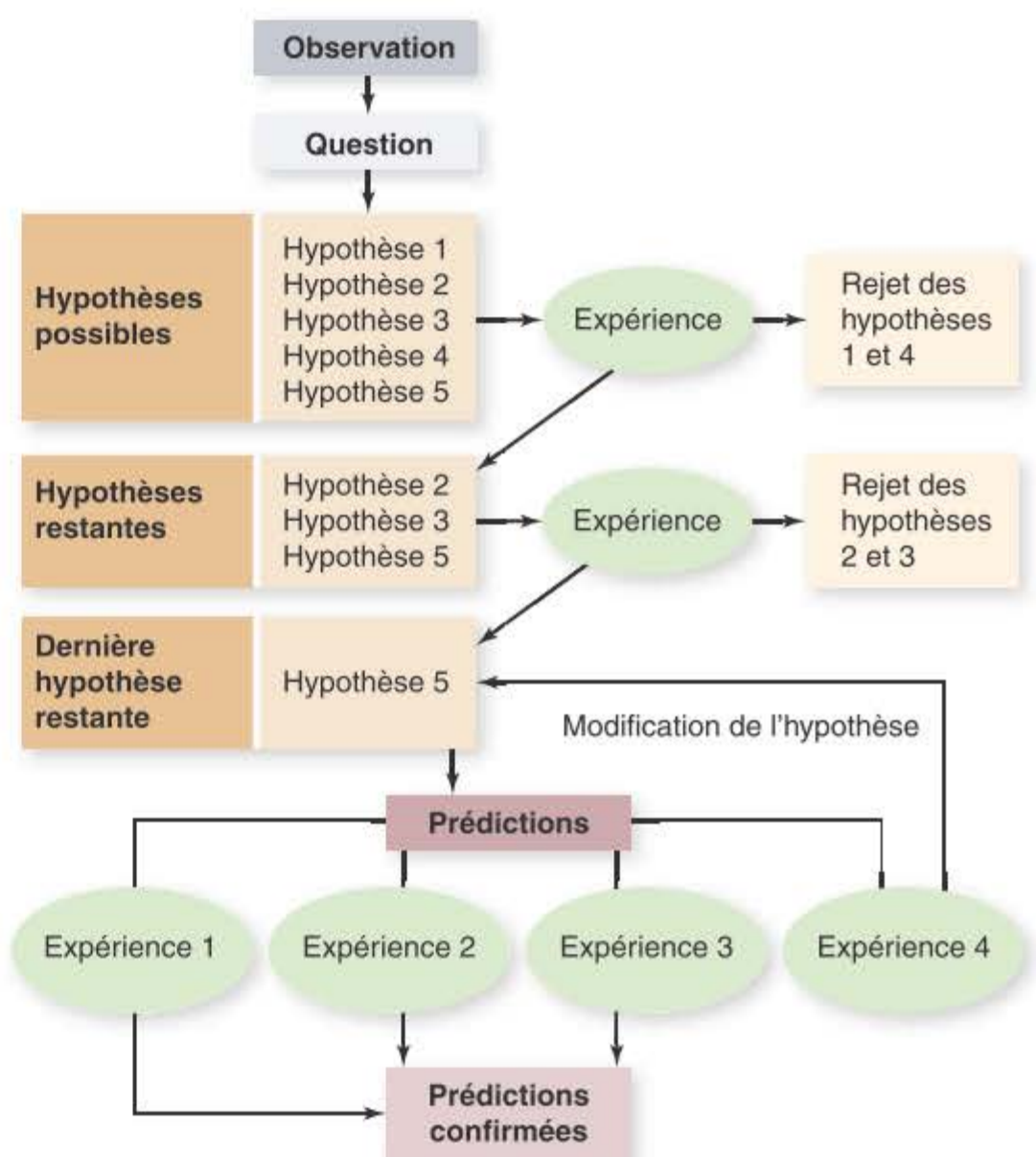


Figure 1.3 La démarche scientifique. Ce diagramme illustre la démarche scientifique. Dans un premier temps le chercheur fait des observations qui soulèvent une question. Il imagine alors diverses explications (hypothèses) pour répondre à la question. Il conçoit ensuite des expériences destinées à éliminer certaines de ces hypothèses. Celles qui résistent font l'objet de nouvelles prédictions et de nouvelles expériences sont conçues en vue de les mettre à l'épreuve. Le processus peut être itératif. L'information issue des résultats expérimentaux peut servir à modifier l'hypothèse originale de façon à la mettre en meilleure adéquation avec ces résultats.

Après avoir effectué des observations soigneuses, les scientifiques élaborent une **hypothèse**, c'est-à-dire une explication plausible tenant compte de leurs observations. L'hypothèse est une explication susceptible d'être vraie. Tant que les hypothèses n'ont pas été contredites, elles sont retenues. Elles sont utiles puisqu'elles s'accordent avec les faits connus mais elles restent toujours susceptibles d'être rejetées si, à la lumière d'informations nouvelles, on montre qu'elles sont incorrectes.

Cette procédure peut également être *itérative*, c'est-à-dire que, au vu de nouvelles données, une hypothèse peut être modifiée et affinée. C'est ainsi qu'en étudiant la nature de l'information génétique, les généticiens George Beadle et Edward Tatum aboutirent à l'hypothèse « un gène/une enzyme » (voir chapitre 15). Selon cette hypothèse, un gène représente l'information génétique nécessaire à la synthèse d'une enzyme donnée. Lorsqu'on connut plus en détail la nature de l'information génétique, l'hypothèse fut affinée sous la forme « un gène/un polypeptide », car une enzyme peut être constituée de plus d'un polypeptide. Lorsque la nature de l'information génétique fut encore mieux définie, d'autres chercheurs montrèrent qu'un simple gène peut spécifier plus d'un polypeptide, et l'hypothèse fut de nouveau affinée.

La mise à l'épreuve des hypothèses

La mise à l'épreuve d'une hypothèse est ce qu'on appelle une **expérience**. Supposez que vous entriez dans une pièce obscure. Vous élaborez diverses hypothèses en vue de comprendre pourquoi elle apparaît sombre. Une première hypothèse pourrait être par exemple que l'interrupteur n'est pas enclenché ; une autre hypothèse serait que l'ampoule est grillée ou encore que vous êtes devenu aveugle. En vue d'évaluer ces hypothèses vous devrez imaginer une expérience susceptible d'exclure une ou plusieurs d'entre elles. Vous pouvez par exemple changer la position de l'interrupteur ; si ce faisant la lumière n'apparaît pas, vous devez rejeter votre première hypothèse et admettre qu'il existe une autre raison à l'obscurité. Il faut noter que ce résultat ne démontre pas l'exactitude des hypothèses restantes. Une expérience est fructueuse si elle démontre l'inexactitude de l'une au moins des hypothèses qui ont été émises.

Dans ce livre nous aurons à plusieurs reprises l'occasion de faire la connaissance d'hypothèses qui ont résisté à l'expérimentation. Nombre d'entre elles continueront à le faire tandis que d'autres devront être abandonnées ou révisées à la suite de nouvelles observations. Comme toute science, la biologie est en évolution constante, de nouvelles idées apparaissant et remplaçant des idées antérieures.

La mise en œuvre de témoins

Il est fréquent que les scientifiques souhaitent étudier des phénomènes qui sont influencés par plusieurs facteurs, appelés **variables**. Si on veut tester diverses hypothèses concernant une de ces variables, il faut s'assurer que toutes les autres variables soient maintenues constantes. Pour ce faire, on met en place deux traitements parallèlement : dans le premier, on modifie une variable en vue de tester l'hypothèse ; dans la seconde, dénommée **témoin**, la dite variable n'est pas altérée. À part cela les deux traitements sont rigoureusement identiques, de sorte que toute différence observée dans les résultats des deux traitements ne pourra être imputée qu'à l'influence de la variable qui a été modifiée.

Un des défis majeurs de la recherche expérimentale est l'élaboration d'expériences permettant d'isoler une variable donnée de tous les autres facteurs pouvant influencer le phénomène étudié.

L'utilisation de prédictions

Pour être fructueuse une hypothèse doit être valide, mais en plus utile : elle doit nous apporter quelque chose qu'on désire connaître. Une hypo-

thèse qui permet des prédictions est particulièrement utile car celles-ci fournissent un moyen de tester sa validité. Si les résultats de l'expérience sont inconsistants avec la prédiction, l'hypothèse devra être rejetée ou modifiée ; dans le cas contraire elle sera renforcée. Une hypothèse est d'autant plus validée que le nombre de prédictions qui en découlent et qui sont confirmées par l'expérience est élevé. C'est ainsi par exemple qu'au début de l'histoire de la microbiologie on savait que l'exposition à l'air d'un bouillon de culture provoquait sa contamination. Deux hypothèses furent proposées pour expliquer cette observation : celle de la génération spontanée et celle des germes. La première hypothèse considérait que les molécules organiques possèdent une propriété inhérente pouvant mener à la génération spontanée de vie. La seconde hypothèse proposait que des microorganismes préexistants dans l'air peuvent contaminer le bouillon de culture.

Ces hypothèses concurrentes furent soumises à de nombreuses expériences impliquant la filtration de l'air et l'ébullition du bouillon de culture en vue de tuer tout germe contaminant. C'est Louis Pasteur qui réalisa l'expérience décisive, en fabriquant des flacons possédant un mince goulot courbé en « col de cygne » ; celui-ci constituait une sorte de chicane empêchant d'éventuels contaminants présents dans l'atmosphère d'atteindre le bouillon de culture, tout en maintenant le contact de celui-ci avec l'air extérieur. Lorsque de tels flacons étaient stérilisés par ébullition ils restaient stériles mais, si on brisait leur goulot courbé, ils se contaminaient (figure 1.4).

Ce résultat était prédit par l'hypothèse des germes : lorsque le flacon stérile est exposé à l'air, des germes en suspension dans celui-ci entrent en contact avec le bouillon de culture où ils croissent. L'hypo-

LA DÉMARCHÉ SCIENTIFIQUE

Question : *Quelle est la source de la contamination affectant un flacon de bouillon de culture exposé à l'air ?*

Hypothèse des germes : *des microorganismes préexistants dans l'air contaminent le milieu de culture.*

Prédiction : *le milieu de culture restera stérile si on empêche les microorganismes de pénétrer dans le flacon.*

Hypothèse de la génération spontanée : *des microorganismes sont spontanément générés à partir de molécules organiques non vivantes présentes dans le milieu de culture.*

Prédiction : *des microorganismes seront spontanément générés à partir de molécules organiques présentes dans le milieu de culture stérilisé.*

Expérience : *on utilise des flacons à col de cygne, pour empêcher l'entrée de microorganismes. Pour s'assurer que le milieu de culture est encore apte à assurer la vie, on casse le col d'un des flacons après stérilisation.*



Flacon stérilisé par ébullition du milieu de culture



Le flacon intact reste stérile



Col cassé
Le flacon dont le col a été cassé est contaminé après exposition à de l'air contenant des germes.

Résultat : *Il ne se produit pas de contamination dans le flacon intact. Si on casse le col, l'accès au milieu de culture de germes externes est facilité et il y a contamination.*

Conclusion : *ce sont des microorganismes préexistants qui se développent dans le milieu de culture.*

Figure 1.4 Expérience destinée à tester l'hypothèse de la génération spontanée et celle des germes.

thèse de la génération spontanée ne prédisait pas de différence dans les résultats selon que le goulot était intact ou brisé. Dans les conditions testées, cette expérience réfutait l'hypothèse de la génération spontanée et soutenait celle des germes.

Le réductionnisme divise les systèmes en leurs composantes

En vue de comprendre un système complexe, les scientifiques utilisent souvent l'approche philosophique appelée **réductionnisme**, qui consiste à diviser le système en ses composantes. L'approche générale de la biochimie a été le réductionnisme, ce qui a remarquablement réussi à démêler la complexité du métabolisme cellulaire en se concentrant sur des voies métaboliques individuelles et sur des enzymes spécifiques. C'est en analysant chaque voie et ses composantes que les scientifiques ont acquis une image globale du métabolisme des cellules.

Appliqué à des systèmes vivants, le réductionnisme a cependant des limites. L'une d'elles provient de ce que, isolées, les enzymes ne fonctionnent pas toujours de la même façon que lorsqu'elles sont intégrées dans leur contexte cellulaire normal. Un problème plus important provient de ce que l'interaction complexe de diverses fonctions interconnectées mène à l'apparition de propriétés émergentes imprévisibles à partir du fonctionnement des parties. On sait par exemple que les ribosomes sont les sites cellulaires de la synthèse des protéines ; cette fonction ne pourrait cependant pas être déduite de l'analyse des protéines et des ARN qui les constituent. À un niveau supérieur, la compréhension de la physiologie d'une bernache du Canada ne permettrait pas de déduire le comportement d'un vol de bernaches. Ce n'est que récemment que les biologistes se sont confrontés à ce genre de problème et ont commencé à réfléchir aux moyens de traiter le tout aussi bien que les parties. Cette nouvelle approche est le domaine de la biologie des systèmes, qui fait appel à des modèles mathématiques et informatiques.

Les biologistes construisent des modèles pour expliquer les systèmes vivants

Les biologistes construisent des modèles de diverses manières et pour une variété d'utilisations. Le généticien construit des modèles de réseaux interactifs de protéines contrôlant l'expression des gènes. Le biologiste des populations construit des modèles sur la manière dont les changements évolutifs se produisent. Le biologiste cellulaire construit des modèles sur les voies de transduction de signaux et sur les événements menant d'un signal externe à des événements internes. Le biologiste structural construit des modèles de la structure des protéines et des complexes macromoléculaires des cellules.

Les modèles fournissent un moyen pour organiser la manière dont on pense un problème. Ils permettent aussi de nous rapprocher de vues d'ensemble plutôt que de nous limiter à une approche réductionniste extrême. C'est l'analyse réductionniste qui fournit les composantes, et le modèle qui montre comment elles s'ajustent les unes aux autres. Il arrive souvent que ces modèles suggèrent de nouvelles expériences susceptibles de les affiner ou de les tester.

Au fur et à mesure que les scientifiques améliorent leurs connaissances des flux de molécules dans les systèmes vivants, des modèles cinétiques plus sophistiqués peuvent être utilisés pour appliquer à leur contexte cellulaire l'information sur des enzymes isolées. En biologie des systèmes, cette modélisation est appliquée à grande échelle aux réseaux régulateurs du développement, et même à une cellule bactérienne dans son ensemble.

Nature des théories scientifiques

Le mot **théorie** est utilisé de deux manières par les scientifiques. D'un côté on parle de théorie pour désigner une explication d'un phénomène naturel, souvent basée sur quelque principe général. C'est ainsi, par exemple, que le principe proposé initialement par Newton est désigné «théorie de la gravitation». De telles théories regroupent souvent des concepts qui n'apparaissent pas auparavant comme reliés ; elles offrent une explication unifiée de phénomènes divers.

Le mot *théorie* désigne également un ensemble de concepts interconnectés, soutenus par des raisonnements scientifiques et des évidences expérimentales, qui permettent d'expliquer des faits dans un domaine d'étude particulier. Dans ce sens, une théorie fournit un cadre indispensable à l'élaboration d'un corps de connaissances. C'est ainsi par exemple qu'en physique la théorie quantique unit un ensemble d'idées concernant la nature de l'univers, explique des faits expérimentaux et sert de guide à la formulation de nouvelles questions et de nouvelles expériences.

Pour un scientifique, les théories représentent le socle de la science, ce dont on est le plus certain. Dans le langage commun par contre, le sens du terme *théorie* est tout à fait opposé, il désigne généralement une hypothèse hasardeuse, impliquant un manque de connaissance. Il n'est évidemment pas surprenant que cette différence d'acception soit source de confusion. Dans le présent ouvrage c'est toujours dans le sens scientifique, en référence à un principe général accepté ou à un corpus de connaissances, que le terme sera employé.

Certains critiques, étrangers à la sphère scientifique, tentent de discréditer l'évolution en la considérant « juste une théorie ». L'hypothèse de l'évolution est cependant un fait scientifique reconnu, soutenu par une masse impressionnante d'arguments. La théorie moderne de l'évolution est un ensemble complexe d'idées dont l'importance s'étend bien au-delà de l'explication de l'évolution ; elle envahit tous les domaines de la biologie et fournit le cadre conceptuel unificateur de la biologie en tant que science. Ici encore la question clé est « Comment l'hypothèse s'accorde-t-elle aux observations ? ». La théorie de l'évolution le fait très bien.

Recherche fondamentale et recherche appliquée

Il fut un temps à la mode de parler de la méthode scientifique comme consistant en une séquence ordonnée d'étapes logiques «vrai/faux». À chaque étape, l'une ou l'autre alternative incompatible serait rejetée, comme si la méthode des essais et erreurs devait inévitablement conduire le chercheur à travers le labyrinthe d'incertitudes qui freine toujours le progrès scientifique. Si c'était le cas, un ordinateur ferait un bon scientifique, mais ce n'est pas ainsi qu'on fait de la science.

Comme l'a fait remarquer le philosophe britannique Karl Popper, tous les chercheurs qui réussissent ont une assez bonne idée des résultats qui sortiront de leurs expériences dès le moment où ils conçoivent celles-ci. Ils ont ce que Popper appelle une «préconception imaginative» de ce que pourrait être la vérité. C'est parce que l'intuition et l'imagination jouent un si grand rôle en science que certains scientifiques y excellent, au même titre que les Beatles sortent du lot des chanteurs-compositeurs ou que Claude Monet sort du lot des impressionnistes.

Certains chercheurs se consacrent à la *recherche fondamentale*, dont l'objectif est d'étendre les frontières de la connaissance. C'est principalement dans des universités qu'ils travaillent et leur recherche est habituellement financée par diverses agences et fondations.

L'information engendrée par la recherche fondamentale contribue à l'accroissement de la connaissance scientifique dans son ensemble et fournit les fondements scientifiques nécessaires à la *recherche appliquée*. C'est surtout dans diverses industries que cette dernière est menée. Le travail des scientifiques y porte par exemple sur la fabrication d'additifs alimentaires, la création de nouveaux médicaments ou encore le contrôle de la qualité de l'environnement.

Les résultats d'une recherche sont décrits dans un projet d'article ; celui-ci est soumis à un journal scientifique en vue de sa publication. L'autorisation de publier n'est cependant acquise qu'après que l'article ait été analysé et approuvé par d'autres scientifiques familiers du domaine de recherche concerné. Ce processus d'évaluation critique par des *pairs* est au cœur de la science moderne ; il veille à assurer qu'une recherche déficiente ou des affirmations erronées n'acquiescent pas l'autorité d'un fait scientifique. Il fournit aussi aux autres scientifiques un point de départ pour tester la reproductibilité de résultats expérimentaux. Des résultats qui s'avèrent non reproductibles sont rapidement déconsidérés.

Synthèse 1.2

La science est largement descriptive, elle accumule des observations en vue d'affiner nos vues. La science fait appel tant au raisonnement déductif qu'au raisonnement inductif. Les hypothèses scientifiques sont des suggestions d'explication de phénomènes observés. Les prédictions qui sont issues de ces hypothèses doivent pouvoir être testées par des expériences contrôlées. Les théories sont des explications cohérentes des données observées, mais elles sont susceptibles d'être modifiées à la suite de nouvelles observations.

- En quoi une théorie scientifique diffère-t-elle d'une hypothèse ?

1.3 Darwin et l'évolution : un exemple de recherche scientifique

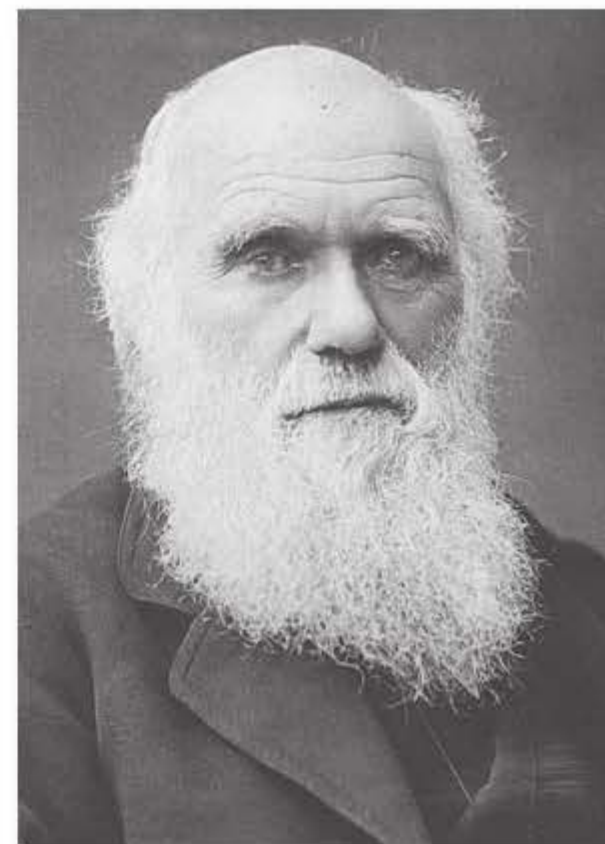
Objectifs

1. Envisager comme théorie scientifique la théorie de l'évolution proposée par Darwin
2. Énoncer les arguments en faveur de la théorie de l'évolution

La théorie de l'évolution proposée par Darwin explique et décrit comment les organismes se sont modifiés sur terre et ont acquis une diversité de nouvelles formes au cours du temps. Cette théorie célèbre illustre bien la manière dont les scientifiques développent une hypothèse et comment une théorie scientifique naît, croît et est progressivement acceptée.

Charles Robert Darwin (1809-1882 ; figure 1.5) était un naturaliste anglais qui, après trente ans d'études et d'observations, écrivit l'un des livres les plus célèbres et les plus influents de tous les temps. La parution de ce livre, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, fit sensation et les idées que Darwin y développait ont joué un rôle central dans le développement de la pensée depuis lors.

Figure 1.5 Charles Darwin. Cette photographie nouvellement redécouverte, datée de 1881, année précédant sa mort est probablement la dernière du grand biologiste.



À l'époque de Darwin, on pensait généralement que les diverses sortes d'organismes et leurs structures individuelles résultaient d'actions directes d'un créateur (cette croyance est encore partagée aujourd'hui par certains). On pensait que les espèces avaient été créées spécialement et étaient immuables au cours du temps.

Un certain nombre de naturalistes et de philosophes antérieurs avaient cependant déjà émis l'idée que les êtres vivants avaient changé au cours de l'histoire de la vie sur la Terre ; en d'autres mots, il y avait eu une **évolution**, et les êtres vivants actuels différaient de ceux du commencement. La contribution de Darwin consiste en un concept, qu'il appela *sélection naturelle*, expliquant de manière cohérente et logique ce processus de changement. Darwin porta en outre ses idées à l'attention d'un large public.

Darwin a observé des différences entre organismes apparentés

L'histoire de la théorie de Darwin débute en 1831, lorsqu'il avait 22 ans. Darwin participait à une expédition cartographique maritime de cinq ans le long des côtes d'Amérique du Sud (figure 1.6) à bord du H.M.S. *Beagle*. Ce long voyage permit à Darwin d'étudier une grande diversité de plantes et d'animaux continentaux et insulaires autant qu'océaniques. Il observa également de nombreux phénomènes qui jouèrent un rôle central dans l'élaboration de ses conclusions finales.

Darwin avait constaté à diverses reprises que les caractères d'espèces similaires variaient quelque peu d'une région à l'autre. Ces traits de répartition géographique lui suggérèrent que les lignées appartenant à une espèce donnée se modifient au fur et à mesure qu'elles s'éloignent les unes des autres, par migration vers d'autres zones géographiques. Dans les îles Galapagos, situées à 960 kilomètres des côtes de l'Équateur, Darwin découvrit une diversité de pinsons répartis sur les différentes îles. Bien qu'apparentées, les quatorze espèces de pinsons différaient légèrement, en particulier en ce qui concerne leurs becs (figure 1.7). Darwin pensa qu'il était raisonnable d'admettre que tous ces oiseaux descendaient d'un ancêtre commun en provenance de l'Amérique du Sud continentale, plusieurs millions d'années auparavant. Ayant été amenés à se nourrir d'aliments différents sur les diverses îles, les descendants de cette espèce avaient progressivement modifié leurs becs, autrement dit avaient évolué. Une étude plus détaillée de ces pinsons est présentée aux chapitres 21 et 22.



Figure 1.6 Le périple de cinq ans du *Beagle*. L'essentiel du temps de l'expédition fut consacré à l'exploration des côtes de l'Amérique du Sud et des îles côtières, en particulier des îles Galapagos. L'étude que Darwin effectua sur la faune des Galapagos a joué un rôle essentiel dans le développement de sa conception du rôle de la sélection naturelle dans l'évolution.

Plus généralement, Darwin fut frappé par le fait que les végétaux et les animaux de ces îles volcaniques relativement jeunes ressemblaient à ceux qu'on trouvait sur les côtes proches d'Amérique du Sud. Si chacun de ces organismes avait été créé indépendamment et simplement mis en place sur les îles Galapagos, pourquoi n'auraient-ils pas ressemblé aussi bien à des plantes et animaux présents sur des îles des côtes d'Afrique par exemple, qui jouissent d'un climat comparable ? Pourquoi ressemblaient-ils au contraire à ceux de la côte sud-américaine toute proche ?

Darwin a proposé l'hypothèse de la sélection naturelle comme mécanisme de l'évolution

C'est une chose d'observer les résultats de l'évolution, c'en est une autre de comprendre comment l'évolution se réalise. Le grand exploit de Darwin réside dans sa formulation de l'hypothèse selon laquelle c'est la sélection naturelle qui rend compte de l'évolution.



Figure 1.7 Trois pinsons des Galapagos et leur nourriture. Sur les îles Galapagos, Darwin observa quatorze espèces de pinsons différant entre eux principalement par leur bec et leur mode d'alimentation. Les trois espèces figurées ici se nourrissent très différemment et Darwin conjectura que les formes de leurs becs représentaient des adaptations évolutives aux aliments qui étaient disponibles dans leurs habitats respectifs.

Darwin et Malthus

La lecture par Darwin de *An Essay on the Principle of Population* (1798), un ouvrage de Thomas Malthus, a eu une influence considérable sur le développement de son hypothèse. Dans son livre, Malthus faisait remarquer que les populations de plantes et d'animaux (y compris d'hommes) tendent à s'accroître géométriquement tandis que l'homme ne parvient à accroître sa production d'aliments qu'arithmétiquement. Autrement dit, la population s'accroît par un facteur multiplicateur : dans la série 2, 6, 18, 54 par exemple, chaque nombre vaut 3 fois le précédent. La production alimentaire, elle, s'accroît par un facteur additif : dans la série 2, 4, 6, 8 par exemple, chaque nombre possède deux unités de plus que le précédent. La figure 1.8 illustre l'évolution que ces deux types de relations produisent au cours du temps.

Étant donné que les populations croissent géométriquement, n'importe quel animal ou végétal, s'il pouvait se reproduire sans aucun contrôle, couvrirait en un temps étonnamment bref toute la surface de la terre. Si les populations d'espèces restent au contraire relativement constantes d'une année à l'autre, c'est à cause de la mortalité.

Éclairé par les idées de Malthus, Darwin observa que tous les organismes ont la capacité de produire une descendance plus importante que celle susceptible de survivre, mais que seul un nombre limité de cette descendance survit et produit une nouvelle génération. En combinant

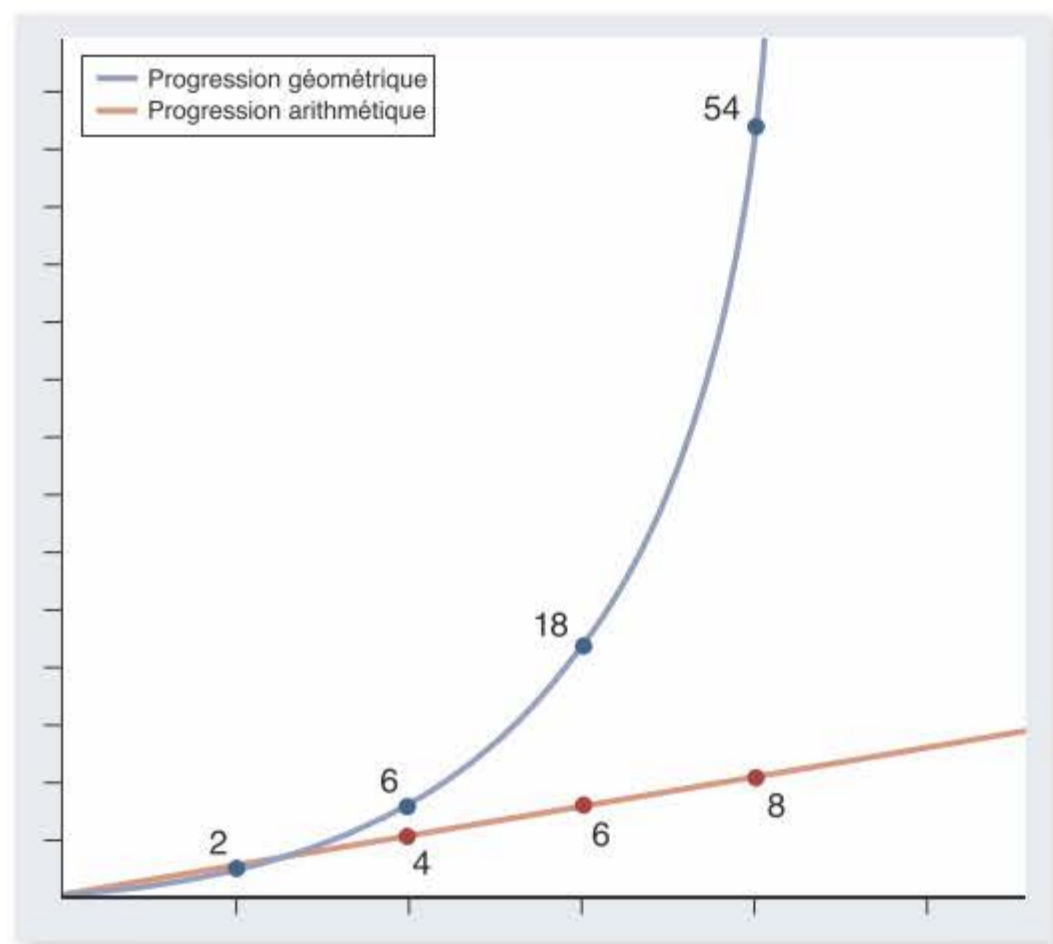


Figure 1.8 Progressions géométrique et arithmétique. Une progression géométrique croît d'un facteur constant (dans la courbe présentée ici par exemple, la valeur est multipliée par 3 à chaque étape) ; une progression arithmétique croît d'une différence constante (ici par exemple la valeur est additionnée de 2 à chaque étape). Malthus prétendait que la courbe de croissance de la population humaine était géométrique alors que la courbe de croissance de la production alimentaire n'était qu'arithmétique.

Analyse de données Quel effet la réduction du facteur constant a-t-il sur une progression géométrique ? Comment la courbe de la figure 1.8 serait-elle modifiée ?

Question Serait-il possible d'obtenir un tel effet dans le cas de la population humaine ? Comment ?

cette observation avec ce qu'il avait vu durant son voyage et avec sa propre expérience d'éleveur d'animaux domestiques, Darwin établit une importante relation : les individus possédant des qualités, physiques, comportementales ou autres, leur conférant un avantage dans leur environnement, ont une plus grande probabilité de survie que ceux qui sont moins bien nantis. En survivant ils accroissent les chances que leurs caractères favorables soient transmis à la génération suivante. La fréquence de ces caractères augmentant de ce fait au sein de la population, c'est la nature même de celle-ci dans son ensemble qui change progressivement. C'est ce processus que Darwin appela *sélection*.

La sélection naturelle

Darwin était très averti des variations au sein de populations d'animaux domestiques et son livre *On the Origin of Species* débute d'ailleurs par une discussion détaillée de l'élevage de pigeons. Il savait que les éleveurs sélectionnaient certaines variétés de pigeons ou d'autres animaux, comme les chiens, pour produire certains caractères, processus que Darwin dénommait **sélection artificielle**.

La sélection artificielle produit souvent une grande variation dans les traits. Les races de pigeon domestiques par exemple manifestent une bien plus grande diversité que toutes les espèces sauvages de pigeons que l'on trouve dans le monde. Ceci suggéra à Darwin que des changements de ce type pourraient également se produire dans la nature. Assurément, si des éleveurs de pigeons étaient capables de favoriser de telles variations par sélection artificielle, la nature devait être capable de faire la même chose, un processus décrit par Darwin comme la **sélection naturelle**.

Darwin rédige son argumentation

C'est en 1842 que Darwin mit par écrit l'essentiel de son argumentation en faveur du rôle de la sélection naturelle dans l'évolution. Après avoir montré son manuscrit à quelques-uns de ses plus proches amis scientifiques, Darwin rangea cependant ce dossier et pendant 16 ans se consacra à d'autres recherches. On ignore pourquoi Darwin ne publia pas son manuscrit initial dans lequel il présentait de manière approfondie et détaillée ses arguments.

Ce qui décida finalement Darwin à publier son hypothèse est un essai qu'un jeune naturaliste anglais, Alfred Russel Wallace (1823-1913) lui fit parvenir d'Indonésie en 1858. Dans cet essai, Wallace énonçait de manière concise l'hypothèse de l'évolution par sélection naturelle qu'il avait développée indépendamment de Darwin. Ayant pris connaissance de l'essai de Wallace, des amis de Darwin prirent des dispositions en vue d'une présentation commune de leurs idées lors d'un séminaire organisé à Londres. Ce n'est qu'alors que Darwin compléta son manuscrit de 1842, dont il avait entrepris la rédaction si longtemps auparavant, et qu'il le soumit pour publication.

Mise à l'épreuve de l'hypothèse de la sélection naturelle

Plus de 130 ans se sont écoulés depuis la mort de Darwin, en 1882. Dans cet intervalle, les arguments soutenant sa théorie se sont progressivement renforcés. Nous en présenterons ici brièvement quelques-uns. Au chapitre 21, nous reviendrons plus en détail sur la théorie de l'évolution et sur les arguments en sa faveur.

L'examen des fossiles

Darwin prédisait que des études paléontologiques fourniraient les liens intermédiaires entre les grands groupes d'organismes, par exemple entre les poissons et les amphibiens supposés en dériver, de même qu'entre les reptiles et les oiseaux. La sélection naturelle permet d'ailleurs de prédire

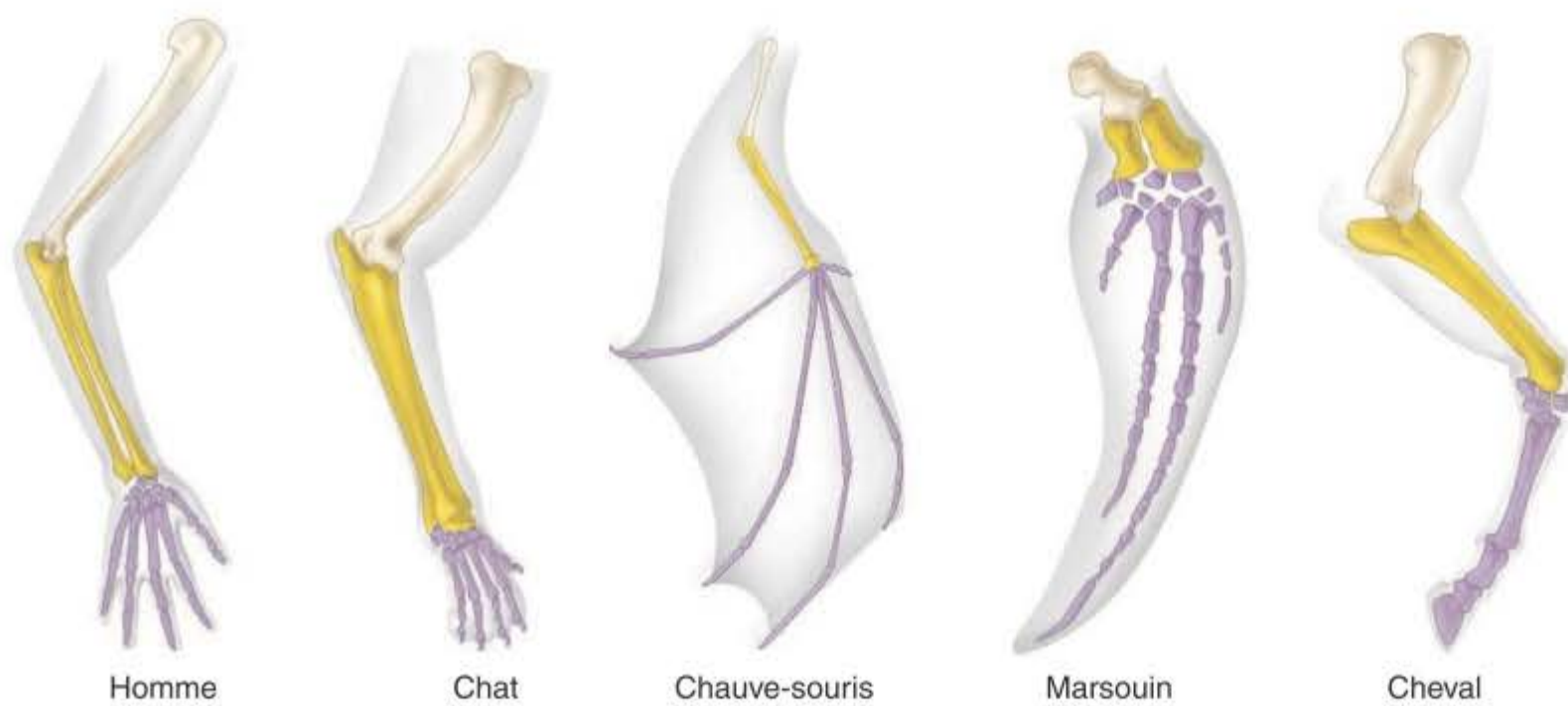


Figure 1.9 Homologie des membres antérieurs de vertébrés.

La comparaison de ces cinq membres antérieurs montre la manière dont les différents os qu'ils contiennent se sont modifiés en relation avec le mode de vie propre à chacun de ces organismes.

les positions relatives dans le temps de ces formes intermédiaires. Nous disposons à l'heure actuelle d'une quantité d'études paléontologiques inimaginable au XIX^e siècle. Des découvertes récentes de fossiles microscopiques ont étendu nos connaissances sur l'histoire de la vie sur Terre jusqu'il y a environ 3,5 milliards d'années. La découverte d'autres fossiles vient à l'appui des prédictions de Darwin et a fourni de nouveaux éclairages sur la façon dont les organismes ont évolué du simple au complexe durant ces longues périodes. Les animaux vertébrés en particulier ont laissé des traces fossiles d'une grande richesse et présentent des variations graduelles de forme, vitrines remarquables du processus de l'évolution.

L'âge de la Terre

Selon la théorie de Darwin, la Terre devait être très ancienne, alors que certains physiciens défendaient l'idée qu'elle ne dépassait pas quelques milliers d'années. Cette contradiction préoccupait Darwin, pour qui l'évolution de l'ensemble des êtres vivants à partir d'un unique ancêtre originel devait avoir requis beaucoup plus de temps. La connaissance que nous avons actuellement de la vitesse de désintégration des isotopes de différents éléments permet de dire que les physiciens se trompaient fortement : la Terre a été formée il y a quelque quatre milliards et demi d'années.

Le mécanisme de l'hérédité

C'est à propos de l'hérédité que les critiques à l'encontre de Darwin furent les plus acerbes. Il faut dire qu'à l'époque, le concept de gène et les mécanismes de l'hérédité étaient totalement inconnus, de sorte qu'il n'était pas possible pour Darwin d'expliquer complètement comment l'évolution se produit.

S'il est vrai qu'à peu près à la même époque, Gregor Mendel réalisait ses expériences sur les pois à Brünn, en Autriche (actuellement Brno, en République tchèque), ce n'est cependant qu'au début du XX^e siècle que la génétique fut reconnue comme science. Lorsque les scientifiques commencèrent à comprendre les lois de l'hérédité (discutées aux chapitres 12 et 13), le problème posé par l'hérédité dans la théorie de Darwin se dissipa. La génétique rend en effet remarquablement compte de l'apparition de variations parmi les organismes.

L'anatomie comparée

L'étude comparée des animaux a apporté un soutien solide à la théorie de Darwin. De très nombreux vertébrés différents par exemple présentent des types d'os semblables, indice de leur passé évolutif. Les membres

antérieurs représentés à la figure 1.9 sont tous construits à partir d'un même assortiment d'os, modifiés pour différentes fonctions.

Les os de ces divers vertébrés sont dits **homologues**, c'est-à-dire qu'ils ont la même origine évolutive, même s'ils diffèrent actuellement par leurs structures et leurs fonctions. Ceci est à opposer aux structures **analogues**, telles les ailes d'oiseaux et de papillons, qui possèdent la même fonction mais n'ont pas la même origine.

L'argument moléculaire

Les relations évolutives sont également révélées au niveau moléculaire. La comparaison du génome (c'est-à-dire de la séquence de tous les gènes) de divers groupes d'animaux ou de plantes permet d'évaluer leur degré de parenté avec plus de précision que toute autre méthode. Une série de changements évolutifs au cours du temps devrait impliquer une accumulation constante de modifications génétiques dans l'ADN.

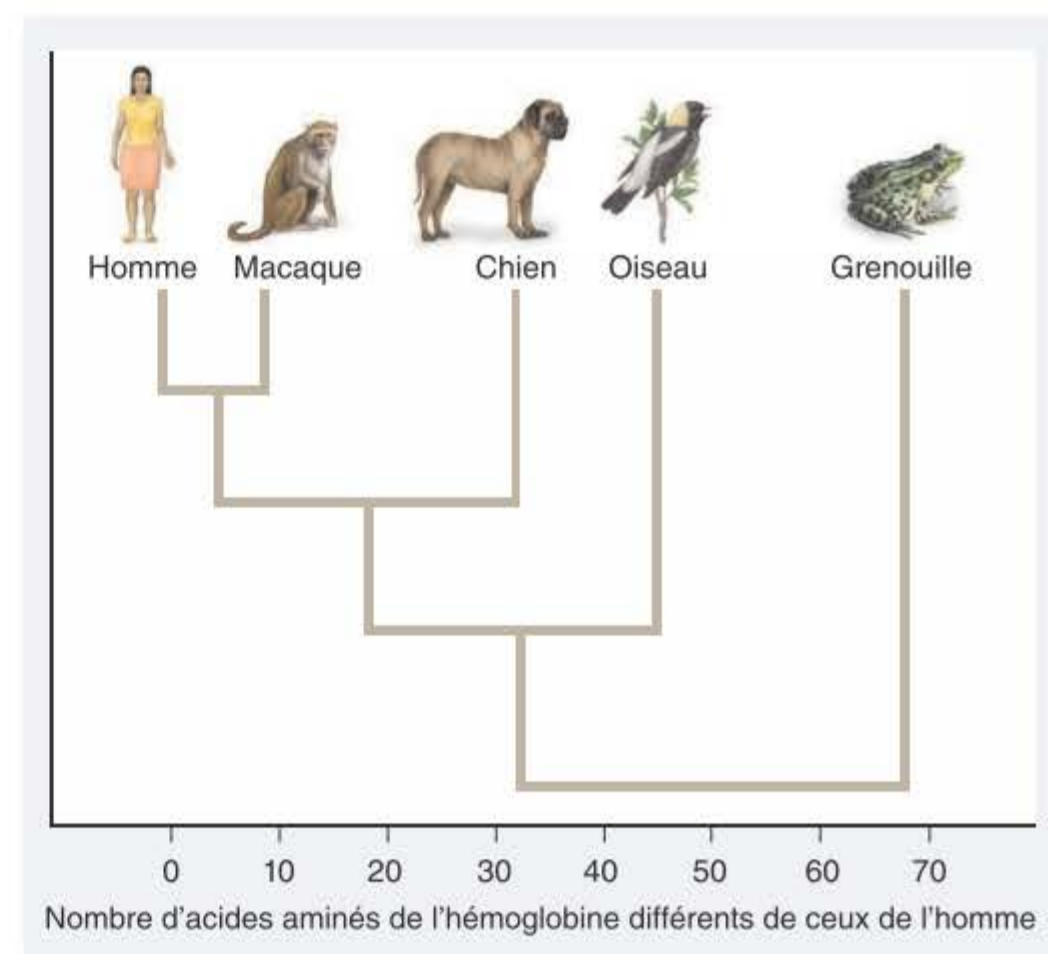


Figure 1.10 Les molécules reflètent les relations évolutives.

L'hémoglobine des vertébrés les moins apparentés à l'homme possède le plus grand nombre d'acides aminés différents de ceux de l'hémoglobine humaine.

? **Question** Quelle pourrait être la position du serpent dans une telle représentation? Pourquoi?

La protéine hémoglobine permet de mettre clairement en évidence cette différence (figure 1. 10). La séquence des 146 acides aminés constitutifs de la chaîne β de l'hémoglobine humaine présente moins de différences avec celle du macaque qui, comme l'homme, fait partie des primates, qu'avec celle de mammifères plus éloignés, comme le chien. Les vertébrés n'appartenant pas aux mammifères, comme les oiseaux ou les grenouilles, en diffèrent encore plus.

Les séquences de certains gènes, tels ceux qui codent l'hémoglobine, ont été identifiées chez un grand nombre d'organismes et toute l'histoire de l'évolution de tels gènes peut être retracée de manière fiable en étudiant l'origine des changements particuliers de nucléotides de leur séquence. On obtient ainsi un arbre **phylogénétique** représentant l'histoire évolutive du gène, son «arbre généalogique». Les arbres phylogénétiques moléculaires s'accordent bien avec ceux dérivés des données fournies par les fossiles, un argument direct en faveur de l'évolution. Le mode d'accumulation des changements dans l'ADN constitue véritablement l'empreinte de l'histoire de l'évolution.

Synthèse 1.3

Ayant observé des différences entre organismes apparentés Darwin proposa, pour expliquer ces différences, l'hypothèse d'une évolution par sélection naturelle. Depuis lors la validité de cette hypothèse a été testée et continue de l'être, par l'analyse des données fossiles, de la génétique, de l'anatomie comparée et même de l'ADN des organismes vivants.

- La théorie de l'évolution par sélection naturelle proposée par Darwin explique-t-elle l'origine de la vie ?

1.4 Les thèmes unificateurs de la biologie

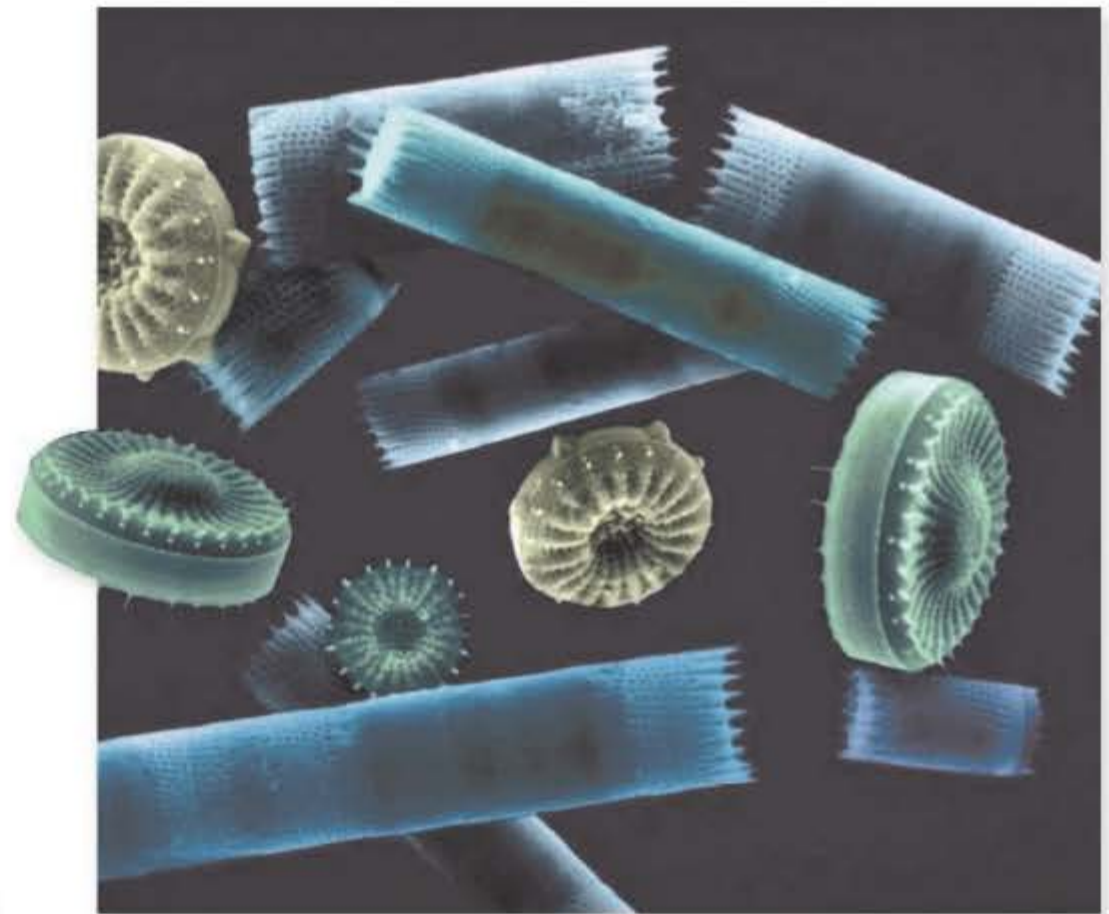
Objectifs

1. Décrire les thèmes unificateurs en biologie
2. Comparer systèmes vivants et non vivants

Les disciplines de la biologie comportent de nombreuses subdivisions, allant de la biochimie à l'écologie. Des thèmes unificateurs peuvent cependant se retrouver dans chacune d'elles. Citons la théorie cellulaire, les bases moléculaires de l'hérédité, la relation entre structure et fonction, l'évolution et l'émergence de propriétés nouvelles.

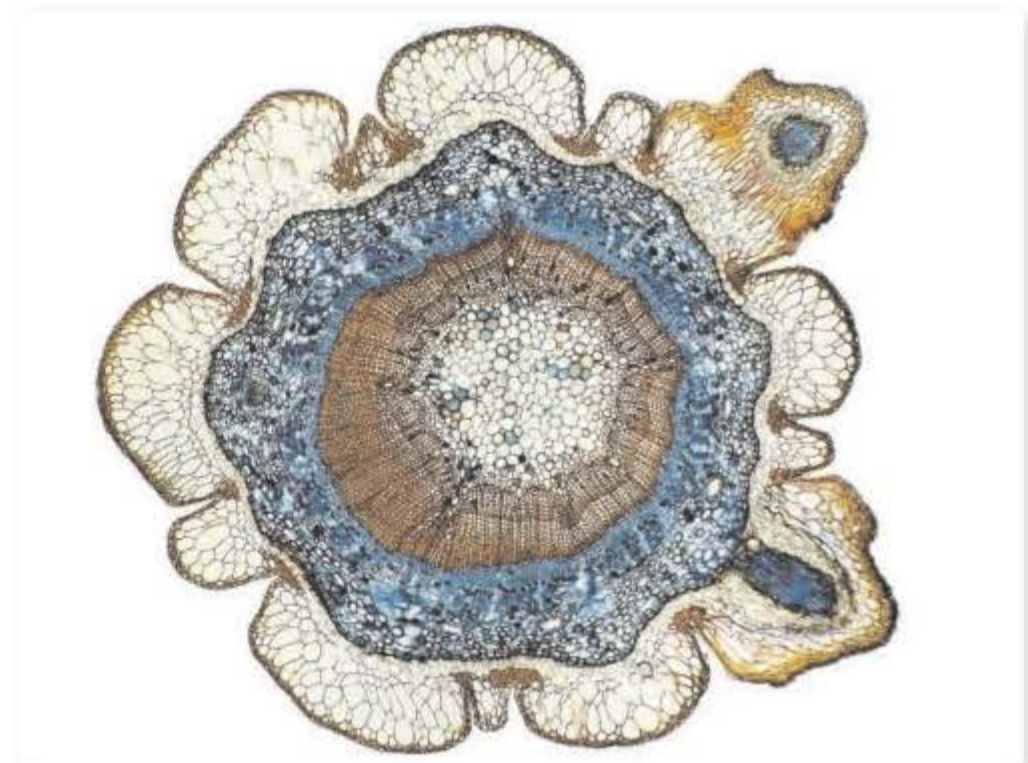
La théorie cellulaire décrit l'organisation des systèmes vivants

Comme indiqué au début de ce chapitre, tous les organismes sont constitués de cellules, unités de base de la matière vivante (figure 1.11). C'est l'Anglais Robert Hooke qui découvrit les cellules en 1665. Hooke utilisait un des premiers microscopes, qui grossissait trente fois. Peu de temps après, Anton van Leeuwenhoek, un scientifique hollandais, développa des microscopes capables de grossir 300 fois ; ceux-ci lui permirent de découvrir un monde fascinant d'êtres unicellulaires dans une goutte d'eau d'un étang.



a.

60 µm



b.

500 µm

Figure 1.11 Base cellulaire de la vie. Tous les organismes sont composés de cellules. Certains, parmi lesquels la majorité des protistes, sont unicellulaires (a.) ; d'autres, comme la plante observée en section transversale (b.) sont constitués de nombreuses cellules.

En 1839 les biologistes allemands Mathias Schleiden et Theodor Schwann, sur base d'un très grand nombre d'observations personnelles et de celles d'autres chercheurs, conclurent que tous les organismes vivants sont constitués de cellules. Cette conclusion est connue comme la **théorie cellulaire**, à laquelle fut ajoutée un peu plus tard l'idée que toutes les cellules proviennent de cellules préexistantes. La théorie cellulaire, un des concepts de base de la biologie, est essentielle pour comprendre la reproduction et la croissance de tout organisme.

La base moléculaire de l'hérédité explique la continuité de la vie

La plus simple des cellules est incroyablement complexe, plus complexe que n'importe quel ordinateur. C'est dans une longue molécule semblable à un câble, l'**acide désoxyribonucléique (ADN)** que l'information spécifiant les caractéristiques de la cellule, son plan détaillé, est codée. L'ADN se présente sous forme de deux longues molécules appariées, chacune

constituée d'une séquence de «briques de construction» appelées nucléotides (voir chapitre 14). L'ADN comporte quatre nucléotides différents et ce sont les séquences dans lesquelles elles sont agencées qui codent l'information. Chaque unité distincte d'information, ou **gène**, est formée d'une séquence spécifique de plusieurs centaines ou milliers de nucléotides.

La continuité de la vie d'une génération à l'autre, ou hérédité, dépend de la transmission fidèle de l'ADN d'une cellule aux cellules-filles qui en dérivent. L'ensemble des instructions sous forme d'ADN qui spécifient une cellule est appelé son *génom*e. Un premier brouillon de séquençage de la totalité du génome humain, long de trois milliards de nucléotides, a été publié en 2001, un triomphe de la recherche scientifique.

La relation entre structure et fonction est à la base des systèmes vivants

La relation entre structure et fonction constitue un des thèmes unificateurs de la biologie. La fonction des molécules et des complexes moléculaires dépend de leur structure.

Cette observation peut paraître triviale, mais elle a des implications d'une grande portée. L'étude de la structure des molécules et des complexes moléculaires est destinée à comprendre leurs fonctions. Lorsqu'on connaît la fonction d'une structure donnée, on peut en inférer la fonction de structures similaires rencontrées dans d'autres contextes, par exemple dans d'autres organismes.

En quête de relations entre structures et fonctions, les biologistes étudient les deux aspects. D'un côté, cela leur permet d'inférer, à partir de structures similaires, de possibles fonctions similaires. Cela fournit également des indications quant aux structures impliquées dans un processus si on en connaît les fonctions.

À titre d'exemple, supposons que nous connaissions le récepteur de l'insuline (hormone contrôlant l'absorption du glucose) à la surface de cellules humaines. Supposons que nous découvriions une molécule similaire dans la membrane cellulaire d'une autre espèce, éventuellement éloignée de la nôtre, telle qu'un ver ; nous pourrions émettre l'hypothèse que cette molécule y joue le rôle de récepteur d'une molécule semblable à l'insuline, produite par le ver. Nous pourrions ainsi percevoir la relation évolutive entre l'absorption du glucose par le ver et par l'homme.

La diversité de la vie naît de changements évolutifs

Il existe un contraste frappant entre l'unité de la matière vivante, telle qu'elle ressort d'un ensemble de caractéristiques fondamentales communes à tous les organismes, et l'incroyable diversité de ces organismes auxquels l'évolution a donné naissance et qui ont colonisé les divers milieux de la planète. L'unité profonde de la biochimie et de la génétique indique que toute vie résulte d'une évolution à partir d'un même événement originel. La diversité de la vie provient de changements évolutifs ayant mené à la biodiversité que nous constatons aujourd'hui.

Les biologistes distinguent trois grands groupes, ou domaines, au sein de cette diversité : bactéries, archées et eucaryotes (figure 1.12). Les deux premiers domaines sont composés de procaryotes (organismes le plus souvent unicellulaires), à structure interne peu développée, tandis que le troisième comprend les organismes eucaryotes, composés d'une seule cellule à organisation complexe ou d'un ensemble complexe de telles cellules. On distingue quatre groupes majeurs, ou règnes, d'eucaryotes (figure 1.12). Le règne des protistes comporte tous les organismes unicellulaires eucaryotes, à l'exception des levures (qui sont des champignons), ainsi que les algues pluricellulaires. Il existe une énorme diversité

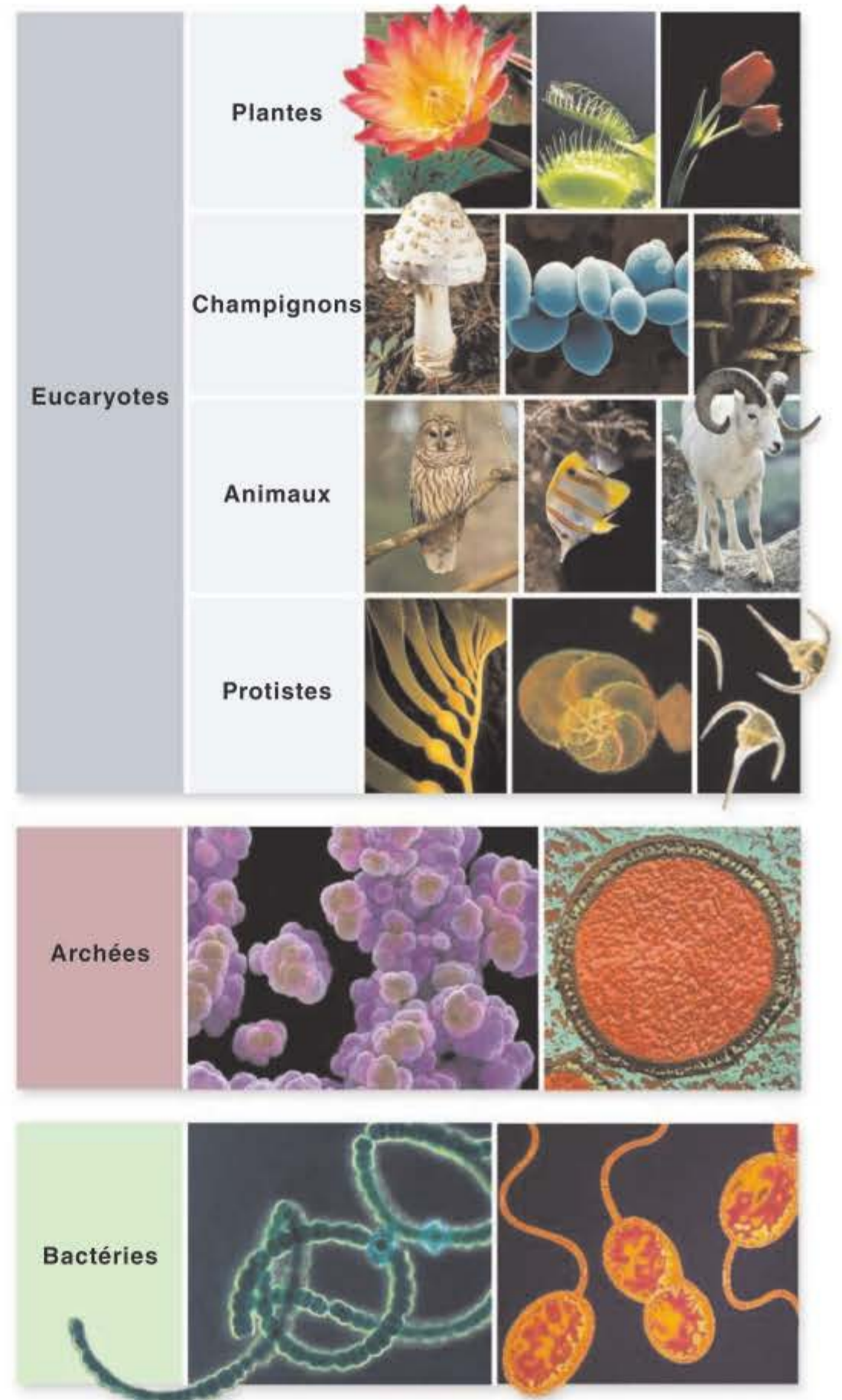


Figure 1.12 Diversité de la vie. Les biologistes classent l'ensemble des êtres vivants en trois groupes appelés domaines : bactéries, archées, eucaryotes. Le domaine des eucaryotes comprend quatre règnes : plantes, champignons, animaux, protistes.

de protistes et de nombreux biologistes estiment qu'il y aurait lieu de subdiviser ce règne en plusieurs règnes distincts. Les organismes appartenant au règne végétal possèdent des parois cellulaires cellulosiques et obtiennent leur énergie par photosynthèse. Le règne des champignons est constitué d'organismes dont les parois cellulaires sont formées de chitine et qui obtiennent leur énergie en sécrétant des enzymes digestives dans le milieu extérieur et en absorbant les molécules que ces enzymes libèrent. Le règne animal comprend les organismes dépourvus de paroi cellulaire et qui se procurent de l'énergie par ingestion d'autres organismes, qu'ils digèrent ensuite par voie interne.

La conservation au cours de l'évolution explique l'unité des êtres vivants

Les biologistes admettent que tous les êtres vivants sont les descendants d'un organisme unicellulaire unique ayant vécu il y a quelque 3,5 milliards

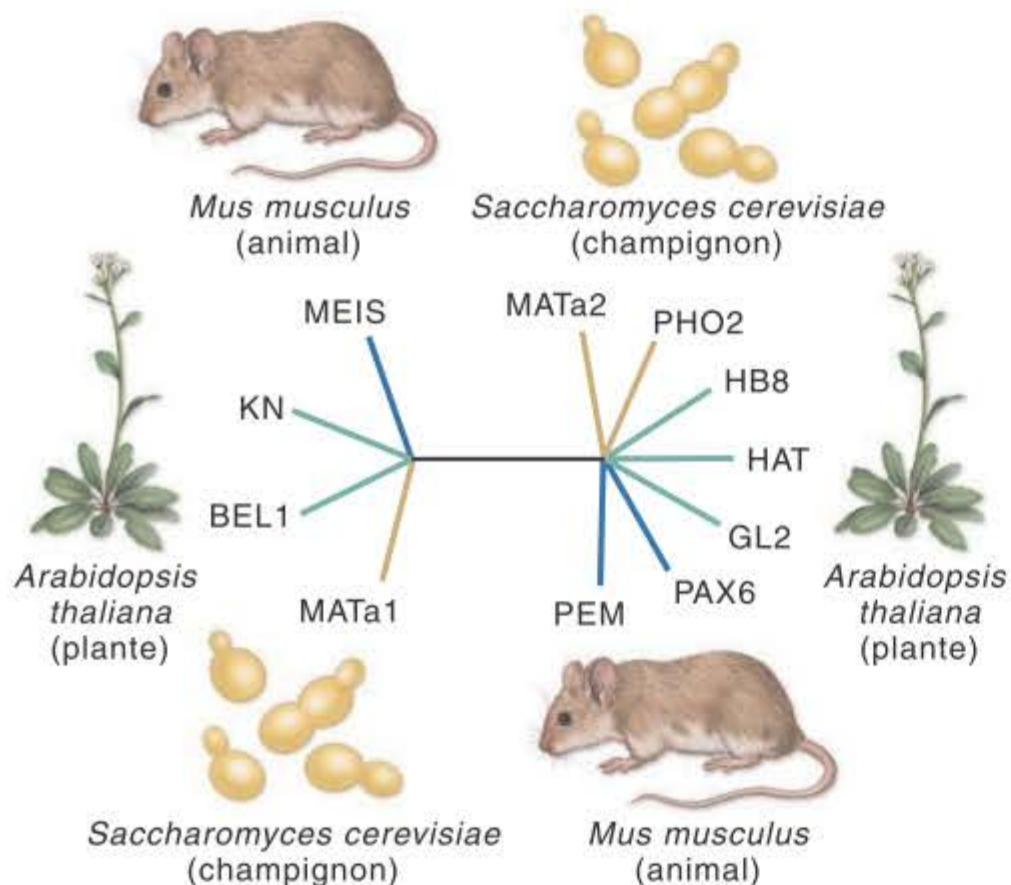


Figure 1.13 Arbre des protéines à homéodomaines.

On trouve des protéines à homéodomaines dans les champignons (en brun), les plantes (en vert) et les animaux (en bleu). Sur base des similitudes de leurs séquences d'acides aminés, les 11 protéines figurées ici (lettres majuscules à l'extrémité de chaque branche) forment deux groupes dans chacun desquels on constate la présence de membres de chacun des trois règnes. Cela signifie par exemple que l'homéodomaine PAX6 de la souris est plus apparenté à des protéines de champignons ou de plantes tels que PHO2 et GL2 qu'à la protéine MEIS de souris.

d'années. Certains caractères de cet organisme originel ont été préservés jusqu'à présent. C'est le cas du stockage de l'information héréditaire dans l'ADN par exemple, commun à l'ensemble des êtres vivants.

La conservation de tels caractères au cours de très longues lignées de descendance reflète généralement leur rôle fondamental dans la biologie des organismes concernés, rôle qui, une fois adopté, peut difficilement changer. Un bon exemple de ceci est fourni par les protéines à homéodomaines, protéines ayant un rôle critique au cours des premiers stades de développement des eucaryotes. On retrouve des caractères conservés dans 1 850 protéines à homéodomaines, réparties dans trois règnes (figure 1.13). Ces protéines, apparues très tôt dans l'évolution, se sont révélées des outils puissants pour le développement et aucune alternative plus efficace ne s'est manifestée par la suite.

Les cellules sont des systèmes de traitement de l'information

On peut considérer les cellules comme des nanomachines complexes de traitement de l'information. L'information, stockée dans l'ADN, sert à diriger la synthèse des composants cellulaires, dont la composition peut varier d'une cellule à l'autre. La manière dont les protéines se replient dans l'espace constitue une information tridimensionnelle ; des propriétés intéressantes émergent des interactions de ces formes dans les complexes macromoléculaires. Le contrôle de l'expression des gènes permet la différenciation des types cellulaires dans le temps et dans l'espace, ce qui mène à la formation de divers types de tissus au cours du développement, quoique toutes les cellules de l'organisme contiennent la même information.

Les cellules traitent également des informations qu'elles reçoivent de leur environnement. C'est par des protéines membranaires qu'elles perçoivent ces informations, qui sont alors transmises, à travers la

membrane, pour initier des voies chimiques de transduction de signaux responsables de modifications du fonctionnement de la cellule.

La capacité qu'ont les cellules de percevoir l'environnement et de répondre à cette perception est critique pour le fonctionnement des tissus et organes des organismes pluricellulaires. Un organisme pluricellulaire est capable de réguler son environnement interne : température, pH, concentration en ions vitaux. Cette homéostasie est possible grâce à des réseaux élaborés de signalisation qui coordonnent les activités de différentes cellules dans différents tissus.

Les systèmes vivants se trouvent dans un état de non-équilibre

Une caractéristique fondamentale des systèmes vivants est qu'ils sont des systèmes ouverts dont le fonctionnement est loin de l'équilibre thermodynamique. Ceci a de nombreuses implications sur leur comportement. Un apport constant d'énergie est nécessaire au maintien d'un état stable de non-équilibre. Si l'on considère l'état des acides nucléiques et des protéines dans nos cellules, à l'équilibre ils ne seraient pas sous forme de polymères, mais hydrolysés en monomères, c'est-à-dire en nucléotides et en acides aminés. Les systèmes en non-équilibre manifestent par ailleurs des propriétés d'auto-organisation qu'on ne trouve pas dans les systèmes en équilibre.

On trouve ces propriétés d'auto-organisation des systèmes vivants à différents niveaux de l'organisation hiérarchisée. Au niveau cellulaire, des complexes macromoléculaires, tels que le fuseau nécessaire à la séparation des chromosomes, peuvent s'auto-organiser. Au niveau des populations, un vol d'oiseaux, un banc de poissons ou un biofilm de bactéries sont aussi auto-organisés. Ce type de comportement interactif d'individus produit des propriétés nouvelles, non prédictibles sur la base de la nature des unités séparées.

Les propriétés émergentes sont des propriétés d'ensembles de molécules, cellules ou individus ; elles sont distinctes des propriétés catégoriques, qu'on peut décrire par des statistiques telles que moyenne et écart-type. L'outil mathématique nécessaire à la description de ce type de systèmes interactifs est la dynamique non linéaire. C'est de cette manière que la biologie des systèmes, naissante, commence à modéliser les systèmes biologiques. Les types de boucles de rétroaction (feedback) et de contrôle par des substrats en amont (feedforward) qui existent, entre molécules dans les cellules ou entre neurones dans le système nerveux, donnent lieu à des comportements émergents tels que la conscience humaine.

Synthèse 1.4

Le domaine de la biologie est vaste et complexe, mais il est possible d'y identifier des thèmes unificateurs. Les cellules sont l'unité de base de la vie et elles constituent des « machines » de traitement de l'information. La structure des molécules, des complexes macromoléculaires, des cellules, et même des niveaux d'organisation plus complexes, est liée à leur fonction. On peut classer et organiser la diversité du vivant sur la base de traits similaires ; le biologiste reconnaît trois grands domaines, qui comprennent six règnes. Les êtres vivants sont capables d'utiliser de l'énergie pour construire des molécules complexes à partir de molécules simples ; ils ne se trouvent donc pas dans un état d'équilibre thermodynamique.

- En quoi les virus sont-ils conformes à nos définitions des organismes vivants ?



1.1 La science de la vie

La biologie unifie une bonne part des sciences naturelles

L'étude des systèmes biologiques est interdisciplinaire car la solution des problèmes qu'elle pose requiert souvent le recours à diverses approches.

La vie ne se plie pas à une définition simple

Il est difficile de définir la vie, mais les systèmes vivants possèdent sept caractères communs. Ils sont composés d'une ou de plusieurs cellules ; ils sont complexes et hautement ordonnés ; ils sont capables de répondre à des stimulus ; ils croissent, se reproduisent et transmettent de l'information génétique à leurs descendants ; ils requièrent de l'énergie pour réaliser du travail ; ils maintiennent relativement constantes leurs conditions internes (homéostasie) ; ils sont capables d'adaptations évolutives à leur environnement.

Les systèmes vivants manifestent une organisation hiérarchisée

L'organisation hiérarchisée des systèmes vivants progresse depuis les atomes jusqu'à la biosphère. À chaque niveau émergent de nouvelles propriétés, qui représentent plus que la somme des propriétés des parties impliquées.

1.2 Nature de la science

Fondamentalement, la science tend à améliorer notre compréhension du monde par l'observation et le raisonnement.

La science est en grande partie descriptive

La science tend à décrire la nature de manière de plus en plus exacte, par l'observation et l'expérimentation.

La science fait appel à des raisonnements déductifs et inductifs

Le raisonnement déductif prédit des résultats spécifiques sur base de principes généraux. Le raisonnement inductif construit des principes généraux à partir d'observations spécifiques.

La science fondée sur l'hypothèse élabore des prédictions et les teste

Une hypothèse est élaborée à partir d'observations, et doit générer des prédictions qu'il est possible de tester. Une expérience comporte un traitement dans lequel une variable est manipulée, et un témoin, où celle-ci ne l'est pas. Une hypothèse est rejetée si ce qu'elle prédit ne peut être vérifié par l'observation ou l'expérimentation.

Le réductionnisme divise des systèmes en leurs composants

Le réductionnisme tente de comprendre un système complexe en le subdivisant en ses composants. Cette méthode est limitée par le fait que des parties peuvent se comporter différemment lorsqu'elles sont isolées.

Les biologistes construisent des modèles pour expliquer les systèmes vivants

Les modèles fournissent un moyen pour organiser la manière dont on pense un problème ; ils peuvent également suggérer des approches expérimentales.

La nature des théories scientifiques

Le mot théorie est utilisé de deux manières par les scientifiques : soit comme une proposition d'explication d'un phénomène naturel, soit comme un ensemble de concepts qui expliquent des faits dans un domaine d'étude.

La recherche peut être fondamentale ou appliquée

La recherche fondamentale étend les frontières de la connaissance ; la recherche appliquée tâche d'utiliser les découvertes scientifiques dans des domaines pratiques, comme l'agriculture, la médecine et l'industrie.

1.3 Un exemple de recherche scientifique : Darwin et l'évolution

La théorie de Darwin illustre la manière dont les scientifiques élaborent une hypothèse et argumentent à son sujet ; elle montre également comment une théorie scientifique se développe et est progressivement acceptée.

L'idée de l'évolution est antérieure à Darwin

Plusieurs naturalistes et philosophes ont suggéré que les êtres vivants ont changé au cours de l'histoire de la terre. L'apport de Darwin est le concept de sélection naturelle en tant que mécanisme des changements évolutifs.

Darwin a observé des différences entre organismes proches

Au cours de son voyage sur le H.M.S. *Beagle*, Darwin eut l'occasion d'observer des modèles de répartition de la diversité de par le monde.

Darwin a proposé la sélection naturelle comme mécanisme de l'évolution

Darwin constata que les espèces produisent une progéniture importante, mais que seul un nombre limité de descendants survient et se reproduit. Il observa qu'il est possible, par sélection artificielle, de modifier les caractères des descendants. Il imagina que les individus qui possèdent des caractères favorisant la survie et le succès reproducteur deviennent de plus en plus nombreux au cours du temps, ce qu'il dénomma descendance avec modification (sélection naturelle). Alfred Russel Wallace aboutit indépendamment, à partir de ses propres études, aux mêmes conclusions.

L'hypothèse de la sélection naturelle a été testée

Diverses données, provenant de domaines variés, ont servi à tester l'hypothèse de la sélection naturelle. Parmi elles on peut citer : l'examen des fossiles ; l'âge de la Terre, évalué par la vitesse de désintégration des éléments radioactifs à 4,5 milliards d'années ; les expériences de génétique montrant que des caractères peuvent être hérités en tant qu'unités discrètes ; l'anatomie comparée et l'étude des structures homologues ; les données moléculaires indiquant des changements dans l'ADN et dans les protéines au cours du temps.

L'ensemble de ces découvertes supporte fortement l'existence d'une évolution par sélection naturelle. Aucune donnée par contre n'a permis de réfuter l'évolution de manière concluante.

1.4 Les thèmes unificateurs de la biologie

Les systèmes vivants sont organisés en cellules

La cellule est l'unité de base de la vie et le fondement de notre compréhension de la croissance et de la reproduction de tous les organismes.

La base moléculaire de l'hérédité explique la continuité de la vie

L'information héréditaire, encodée dans les gènes présents dans l'ADN, est transmise de génération en génération.

La relation entre structure et fonction est à la base des systèmes vivants

La fonction des macromolécules et de leurs complexes est dictée par leur structure et dépendante d'elle. La similitude de structure et de fonction dans diverses formes de vie suggère une relation évolutive.

La diversité de la vie naît de changements évolutifs

Les organismes vivants paraissent issus d'une origine commune d'où est née, par changements évolutifs, une diversité de formes. Sur base de leurs différences, on peut les classer en six règnes répartis dans trois domaines.

La conservation au cours de l'évolution explique l'unité des êtres vivants

Les similitudes fondamentales en biochimie et en génétique soutiennent l'idée que toute vie a pour origine une source unique.

Les cellules sont des systèmes de traitement de l'information

Les cellules sont capables de percevoir des changements dans leur environnement et d'y réagir, grâce à des protéines situées dans leurs membranes cellulaires. C'est l'expression différentielle de l'information génétique qui est à la base de la différenciation des divers types de cellules.

Les systèmes vivants se trouvent dans un état de non-équilibre

Les organismes sont des systèmes ouverts qui requièrent un apport constant d'énergie pour maintenir leur état de non-équilibre stable. Les êtres vivants sont capables d'auto-organisation, créant des niveaux de complexité desquels peuvent émerger des propriétés nouvelles.



COMPRÉHENSION

- Lequel de ces faits n'est-il PAS une propriété de la vie ?
 - l'utilisation d'énergie
 - le mouvement
 - l'ordre
 - l'homéostasie.
- Le processus de raisonnement inductif implique
 - l'utilisation de principes généraux en vue de prédire des résultats spécifiques
 - la génération de prédictions spécifiques basées sur un système de croyance
 - l'utilisation d'observations spécifiques en vue de développer des principes généraux
 - l'utilisation de principes généraux pour soutenir une hypothèse.
- Ce qui décrit le mieux une hypothèse en biologie c'est
 - une explication possible d'une observation
 - une observation soutenant une théorie
 - un principe général expliquant un aspect de la vie
 - un énoncé invariable qui prédit correctement un aspect de la vie.
- Une théorie scientifique est
 - une conjecture sur la manière dont les choses fonctionnent dans le monde
 - une affirmation, supportée par des données expérimentales, sur le mode de fonctionnement du monde
 - une croyance défendue par de nombreux scientifiques
 - les réponses a et c sont correctes.
- La théorie cellulaire énonce que
 - les cellules sont petites
 - les cellules sont hautement organisées
 - il n'existe qu'un seul type cellulaire de base
 - tous les organismes vivants sont constitués de cellules.
- L'ADN est une molécule importante pour les systèmes biologiques parce que
 - il peut être répliqué
 - il encode l'information nécessaire à la formation d'un nouvel individu
 - il forme une structure complexe en double hélice
 - les nucléotides forment les gènes.
- L'organisation des systèmes vivants est
 - linéaire, avec les cellules à une extrémité et la biosphère à l'autre
 - circulaire, avec les cellules au centre
 - hiérarchisée, avec à la base les cellules et au sommet la biosphère
 - chaotique et indescriptible.
- L'idée de l'évolution
 - est attribuable à Darwin
 - est attribuable à Wallace
 - est antérieure à Darwin et à Wallace
 - les réponses a et b sont correctes.

APPLICATION

- Quelle est la signification de l'expérience de Pasteur pour tester l'hypothèse des germes ?
 - elle prouve que la chaleur peut stériliser un bouillon de culture
 - elle démontre que des cellules peuvent naître spontanément
 - elle démontre que certaines cellules sont des germes
 - elle démontre que les cellules ne peuvent provenir que d'autres cellules.
- Lequel de ces cas ne constitue-t-il PAS un exemple de réductionnisme ?
 - l'analyse de la fonction d'une enzyme isolée dans une expérience
 - la recherche en boîte de Petri de l'effet d'une hormone sur la croissance cellulaire

- l'observation du changement d'expression d'un gène en réponse à un stimulus
 - une évaluation du comportement global d'une cellule.
- En quoi les processus de sélection naturelle et artificielle diffèrent-ils ?
 - la sélection naturelle produit plus de variations
 - la sélection naturelle produit des individus mieux adaptés
 - la sélection artificielle résulte de l'action humaine
 - la sélection artificielle a pour résultat de meilleures adaptations.
 - Si vous découvriez un fossile d'un organisme moderne près d'un fossile de dinosaure cela
 - pourrait constituer un argument en défaveur de l'évolution par sélection naturelle
 - n'interfererait pas avec l'idée d'une évolution par sélection naturelle
 - pourrait indiquer que des dinosaures existent peut-être encore
 - indiquerait que les réponses b et c sont correctes.
 - La théorie de l'évolution par sélection naturelle est un bon exemple du mode de fonctionnement de la science
 - car elle rationalise un grand ensemble d'observations
 - car elle fait des prédictions qui ont été testées par une variété d'approches
 - car elle représente la croyance de Darwin concernant les modifications du vivant
 - les réponses a et b sont correctes.
 - Quel domaine du vivant ne contient-il presque que des organismes unicellulaires ?
 - les eucaryotes
 - les bactéries
 - les archées
 - les réponses b et c sont correctes.
 - Il y a conservation évolutive lorsqu'un caractère
 - est important pour la survie de l'organisme
 - n'est pas influencé par l'évolution
 - n'a plus d'importance fonctionnelle
 - est présent dans des organismes plus primitifs.

RÉVISION

- L'exobiologie est l'étude de la vie sur d'autres planètes. Ces dernières années, les scientifiques ont envoyé plusieurs vaisseaux spatiaux dans notre galaxie à la recherche de vie extraterrestre. Si l'on postule que toute vie partage des propriétés communes avec les autres, qu'est-ce que les exobiologistes devraient rechercher lors de leurs explorations ?
- L'expérience classique de Pasteur (figure 1.4) testait l'hypothèse selon laquelle les cellules proviennent d'autres cellules. Dans cette expérience la croissance de cellules était mesurée au sein d'un bouillon de culture stérilisé dans un flacon à col de cygne ou dans un flacon dont le col était brisé après stérilisation
 - Quelles sont les variables qui étaient identiques dans les deux traitements ?
 - Comment la forme du flacon affecte-t-elle l'expérience ?
 - Prédire le résultat dans chaque traitement sur base des deux hypothèses
 - Certaines bactéries (germes) sont capables de se différencier en spores résistantes à la chaleur, qui peuvent reprendre leur croissance lorsque le milieu de culture a refroidi. En quoi les résultats de cette expérience auraient-ils été affectés si des bactéries de ce type avaient été présentes dans le bouillon de culture ?