

1 Évolution de la Terre

L'évolution de la Terre se fait à des échelles extrêmement grandes difficilement imaginable pour un être humain. Le schéma ci-dessous compare une année aux 4,5 milliards de l'évolution de la Terre.

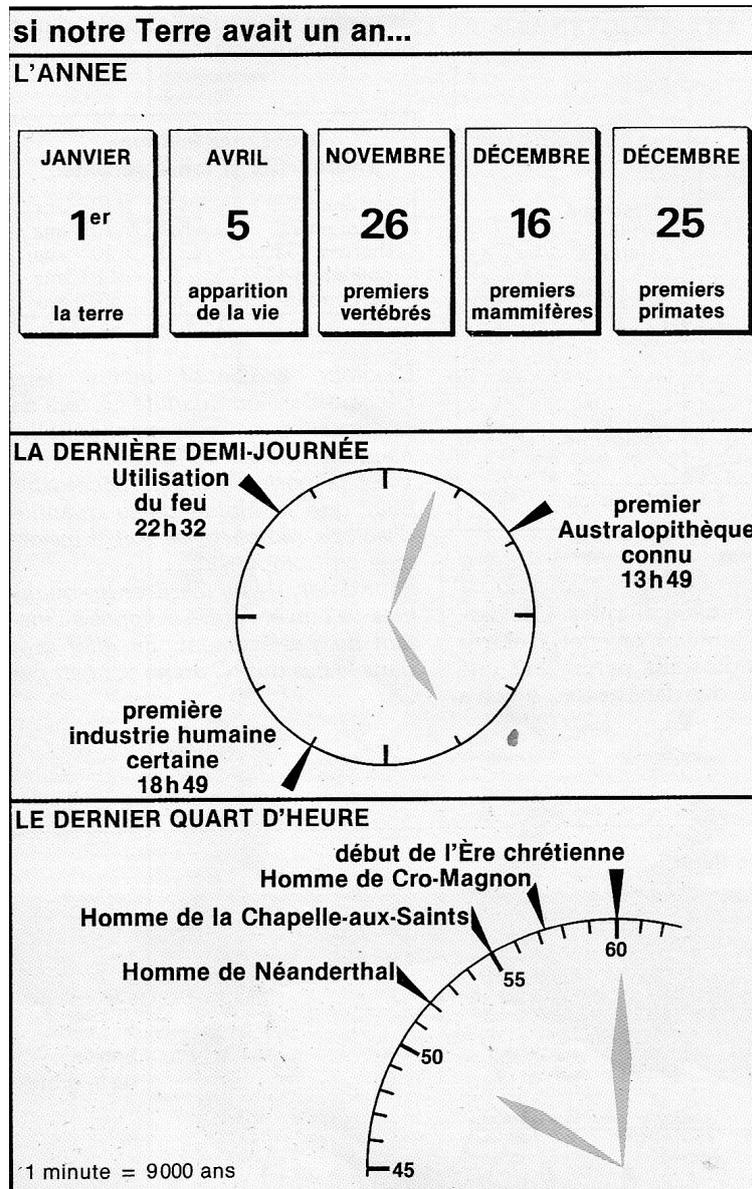


FIGURE 1 – L'ordre de grandeur de l'échelle de temps depuis la naissance de la Terre

1.1 Aux origines de la Terre

1.1.1 Le big-bang

Le « big-bang » correspond à une forte expansion de l'Univers au moment initial situé à **13,8 milliards d'années**. Ce « big-bang » était prévu par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Il a été mis en évidence en 1927 par un chanoine de Charleroi, Georges Lemaître. Le fond diffus cosmologique (l'écho du rayonnement électromagnétique produit par ce « big-bang ») a été observé pour la première fois en 1964. L'Univers continue à être en expansion ; les galaxies s'éloignent les unes des autres.

Le refroidissement de l'Univers dû à son expansion a permis une chute de température qui a permis les particules à se lier en atomes, et aux atomes de s'associer en molécules.

1.1.2 La formation de la voie lactée et du système solaire

La voie lactée est la galaxie dans laquelle se trouve le système solaire. Les bras spiraux de la voie lactée date de **10 milliards d'années**. La forme actuelle de cette galaxie est la datation de certaines étoiles montrent qu'elle issue de la fusion de deux galaxies qui s'est produit au plus tard, il y a **7 milliards d'années**.

Il y a **5 milliards d'années** un ensemble de poussières d'étoiles et d'hydrogène issues d'une supernova¹ s'est agglomérée à approximativement 2/3 du centre galactique. Vers **4,5 milliards d'années**, l'agglomération d'hydrogène au centre permit le début de la réaction thermonucléaire, la formation du soleil. A proximité, l'agglomération de poussières d'étoiles forment des planètes rocheuses. La collision d'une proto-Terre est d'une autre planète (Théia, de la taille de Mars) produit le couple Terre/Lune tel que nous le connaissons actuellement. La Lune s'éloigne progressivement peu à peu de la Terre.

1.2 Évolution des conditions physiques sur Terre

1.2.1 Évolution des facteurs atmosphériques

Au départ l'atmosphère terrestre est très riche en dioxyde de carbone, la température de surface est extrêmement élevée. Peu à peu, la température diminue. La température devient compatible avec l'eau liquide (vers **4 milliards d'années**). La fixation du dioxyde de carbone sous forme de carbonate dans la masse d'eau (les océans) augmente relativement la proportion de diazote. Le cycle de l'eau se met en place.

Par la suite, vers **3,4 milliards d'années**, la production de dioxygène par des bactéries photosynthétiques enrichit l'atmosphère, mais cette production reste faible (± 1 %). L'atmosphère de la Terre est chaotique avec d'importants changements de température et des variations de composition.

Il y a **600 millions d'années** le taux de dioxygène augmente fortement oscillant entre 10 et 30%. La couche d'ozone protectrice du rayons ultra-violet du Soleil se forme, ce qui permet une diversification de la vie.

1. Une supernova est une explosion de fin de vie d'une étoile si sa masse dépasse plus de 8 fois la masse solaire.

1.2.2 La dérive des continents

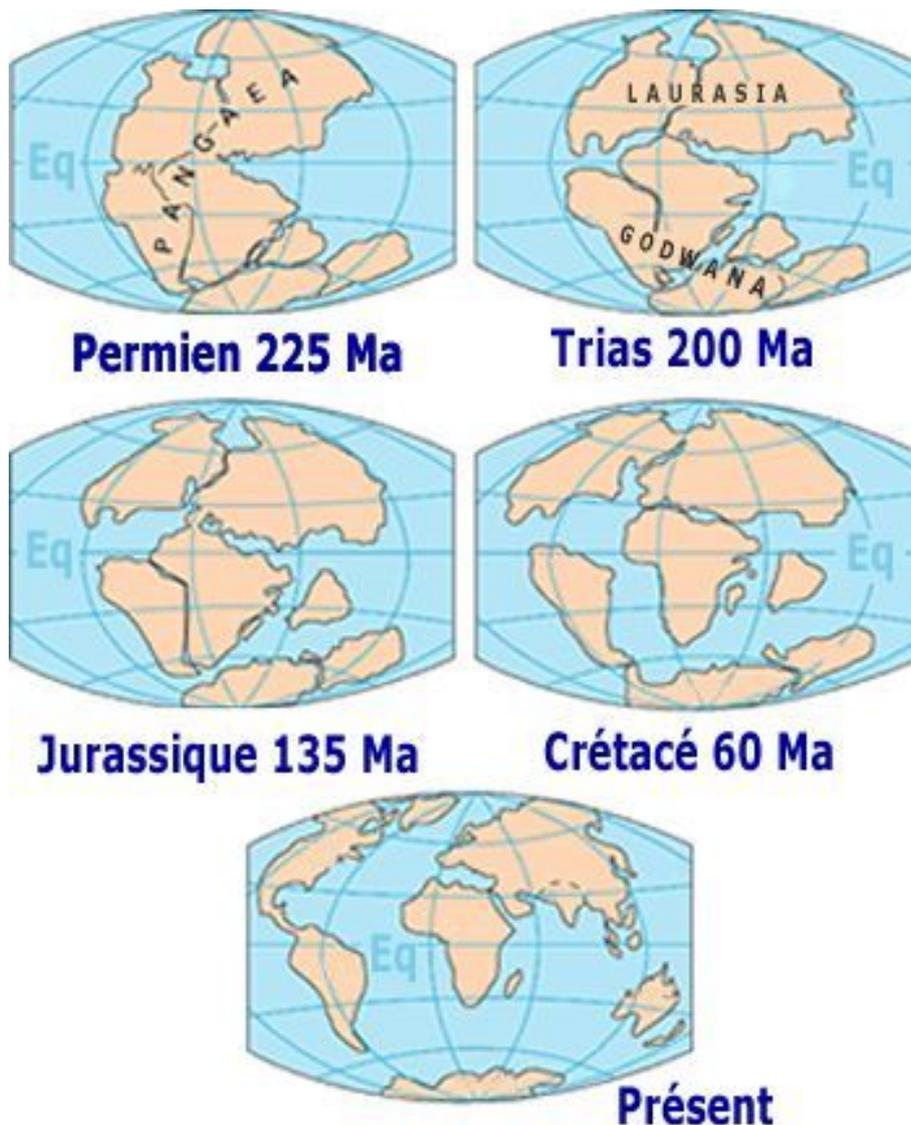


FIGURE 2 – La dérive des continents de 225 millions d'années à nos jours.

Dès que la croûte terrestre devient solide, vers **4,3 milliards d'années**, la structure interne de la Terre se met en place (apparition du champ magnétique). Mais cette croûte reste visqueuse sur les grandes échelles de temps.

La masse d'eau qui précipite vers **4 milliards d'années** forme une surface uniforme d'océans sur l'ensemble de la planète. Peu à peu, les mouvements tectoniques² font émerger des îles, puis des continents. Le poids des océans modifie la croûte terrestre en couche océanique plus mince et en couche continentale plus épaisse.

Par la suite la forme des continents fluctue au gré du niveau des océans et des mouvements tectoniques.

2. tectonique : ce dit des couches superficielles de la Terre

1.3 Évolution de la vie sur Terre

1.3.1 L'apparition de la vie

Les premières traces de vie sur Terre date de **3,8 milliards d'années**. Il s'agit de stromatolithes³ découverts en Australie et au Groenland.

Vers **3,2 milliards d'années**, on trouve les premiers fossiles de bactéries terrestres.

1.3.2 Les origines des grands groupes des animaux

Vers **1,9 milliards d'années**, on trouve les premiers fossiles de cellules eucaryotes⁴.

Vers **1,8 milliards d'années**, on trouve les premières présences de mitochondries chez des eucaryotes.

Vers **1 milliard d'années**, on trouve les premières présences de chloroplastes dans des unicellulaires (ancêtres des végétaux).

Vers **1,4 milliards d'années**, on trouve les premiers organismes pluricellulaires chez les eucaryotes (des algues).

Vers **650 millions d'années**, on trouve les premiers fossiles d'animaux mous proches des éponges actuelles.

Vers **530-560 millions d'années**, on retrouve les premiers animaux à squelette. On trouve dans ces couches géologiques une incroyable diversité d'organismes. Seuls quelque-uns évolueront pour donner les grands groupes des êtres vivants actuels.

Vers **470 millions d'années**, des plantes et les ancêtres des insectes (arthropodes) colonisent le milieu terrestre (au lieu du milieu aquatique).

Vers **445 millions d'années**, extinction massives (85 % des espèces animales disparaissent).

Vers **420 millions d'années**, premiers poissons cartilagineux semblables aux requins actuels.

1.3.3 L'ère des amphibiens

Vers **360 millions d'années**, premiers tétrapodes semblables aux salamandres et tritons actuels. La diversification des arthropodes s'accroît. Les plantes ont des feuilles, des racines et des graines.

Vers **330 millions d'années**, les premiers amniotes apparaissent⁵. Les insectes sont capable de voler.

Vers **270 millions d'années**, extinction massives (75% des espèces animales disparaissent).

1.3.4 L'ère des reptiles

Vers **250 millions d'années**, les premiers archosauriens (dinosaures) apparaissent.

Vers **270 millions d'années**, extinction massives (70 % des espèces animales terrestres disparaissent).

Vers **200 millions d'années**, les premiers mammifères apparaissent (présence de mamelles et de poils).

Vers **150 millions d'années**, les premiers oiseaux apparaissent (présence de plumes).

Vers **120 millions d'années**, une co-évolution se fait entre certaines plantes à fleurs et des insectes pollinisateurs.

Vers **65 millions d'années**, extinction massives (50 % des espèces disparaissent).

3. Les stromatolithes sont des roches dont la formation et la forme dépendent de bactéries.

4. Une cellule eucaryote est une cellule contenant un vrai noyau, à l'inverse des bactéries qui ne contiennent qu'un brin d'ADN.

5. Les amniotes ont une membrane autour de leur œuf ce qui leur permet de préserver leurs œufs de la dessiccation

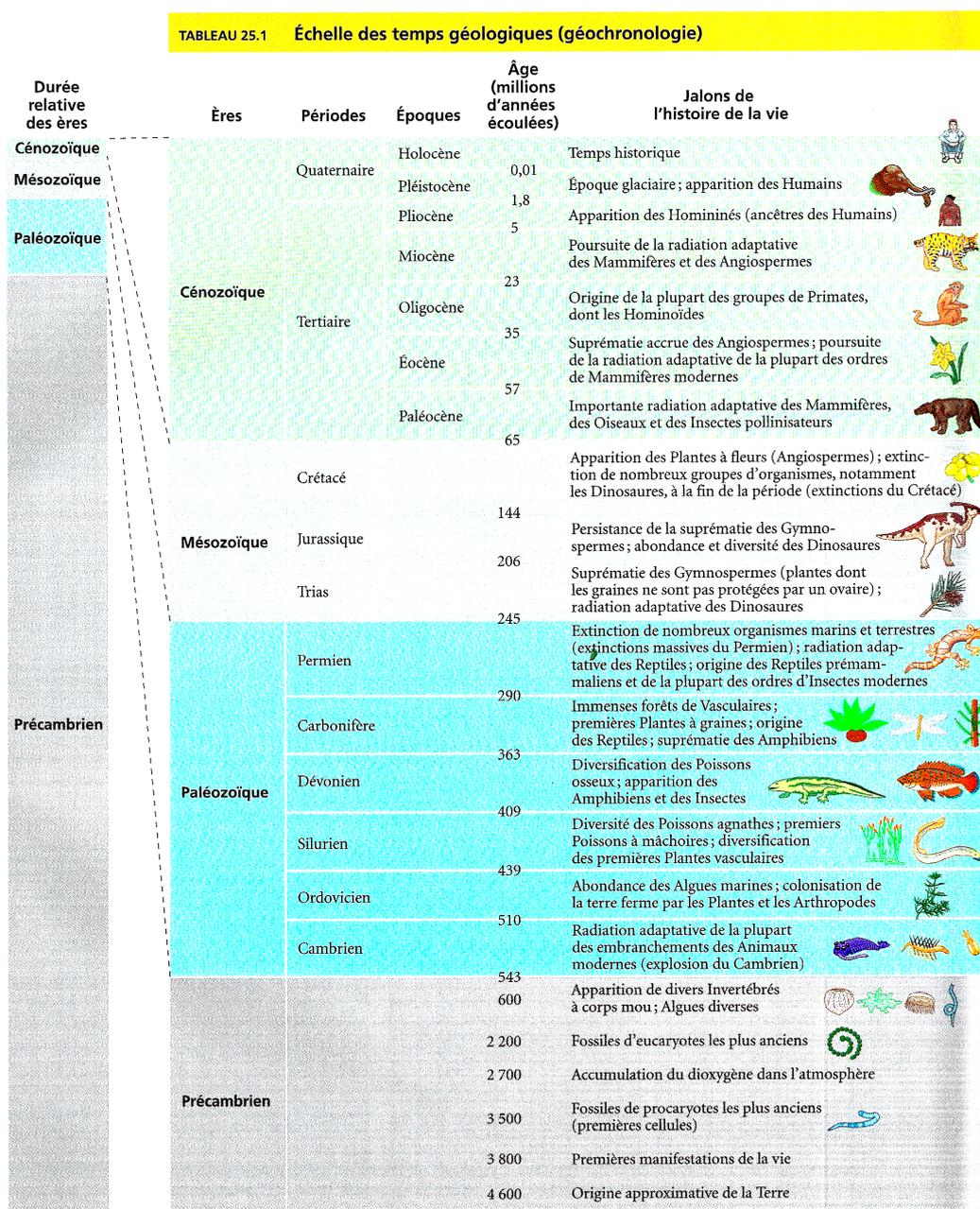


FIGURE 3 – L'évolution de la vie des origines à nos jours.

1.3.5 L'ère des mammifères

A partir de **55 millions**, on observe une très grande diversification des mammifères. On peut citer les groupes suivants :

- cétacés (dauphins, baleines, ...) ;
- carnivores (ours, tigres et apparentés, phoques, ...) ;
- proboscidiens (éléphants) ;
- rongeurs (souris, lapins, ..) ;
- ruminants (vache, moutons, chèvre, lama, chameau, ...) ;
- chauve-souris ;
- et évidemment primates (lémuriens, tarsiers, singes supérieurs -sans queue- dont l'homme, ...).

2 Des primates à l'homo sapiens

2.1 Les premiers primates

Vers **55 millions d'années**, les premiers primates sont des mammifères à vision binoculaires, à griffes plates (ongles).

Vers **50 millions d'années**, les premiers grands groupes de mammifères apparaissent (cétacés, ruminants, ...).

Vers **50 millions d'années**, les premiers primates à pouces opposables apparaissent, ce qui permet la préhension (le fait d'attraper des d'objets).

Vers **20 millions d'années**, des primates sans queue (et donc avec coccyx) s'installe dans les savanes, alors qu'auparavant il était arboricole (lié à la forêt).

Vers **6 à 7 millions d'années**, présence du plus ancien ancêtre commun avec nos plus « plus proches cousins » : le chimpanzé et le bonobo.

Vers **3 millions d'années**, l'australopithèque apparaît qui se caractérise par sa voûte plantaire qui lui permet un déplacement bipède (la marche) et probablement par une réduction de sa pilosité.

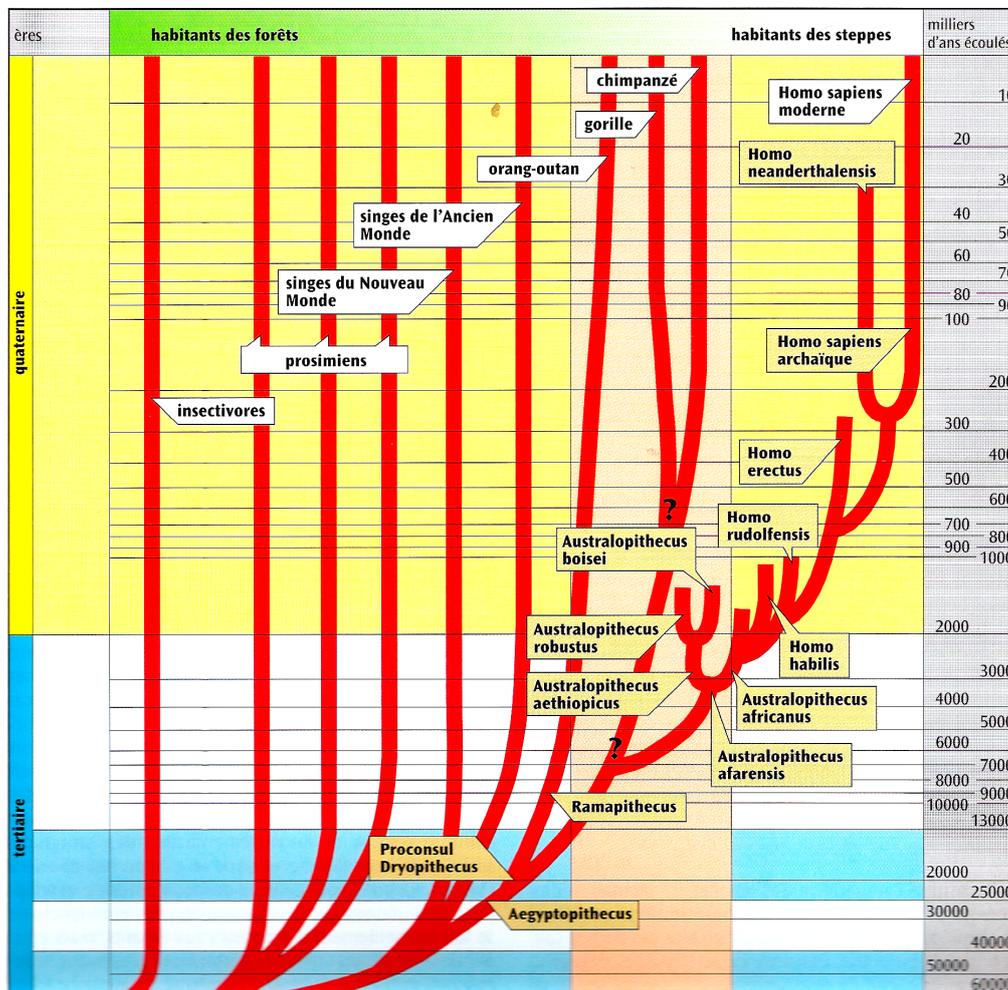


FIGURE 4 – L'évolution de l'homme de 6 millions d'années à nos jours.

2.2 La diversification du genre Homo

Vers **2 millions d'années**, le genre Homo apparaît en Afrique sous forme de nombreuses espèces. Il se caractérise par une augmentation du volume du cerveau, une augmentation de la taille et une réduction de la mâchoire inférieure (profil droit).

Vers **1 millions d'années**, Homo erectus se disperse de l'Afrique vers l'Eurasie.

Vers **200 000 ans**, Homo Sapiens apparaît en Afrique.

Vers **100 000 ans**, Homo Sapiens se disperse de l'Afrique vers l'Eurasie.

Vers **40 000 ans**, dernière présence de l'homme de Denisova.

Vers **30 000 ans**, dernière présence de l'homme de Néanderthal.

L'interprétation habituelle est que l'homme de Denisova et l'homme de Néandertal sont des évolutions d'Homo Erectus, mais qu'il y aurait eu de nombreuses hybridations entre ces espèces d'Homo et l'homme moderne.

Vers **10 000 ans**, Homo sapiens se répand de l'Eurasie vers le continent américain.

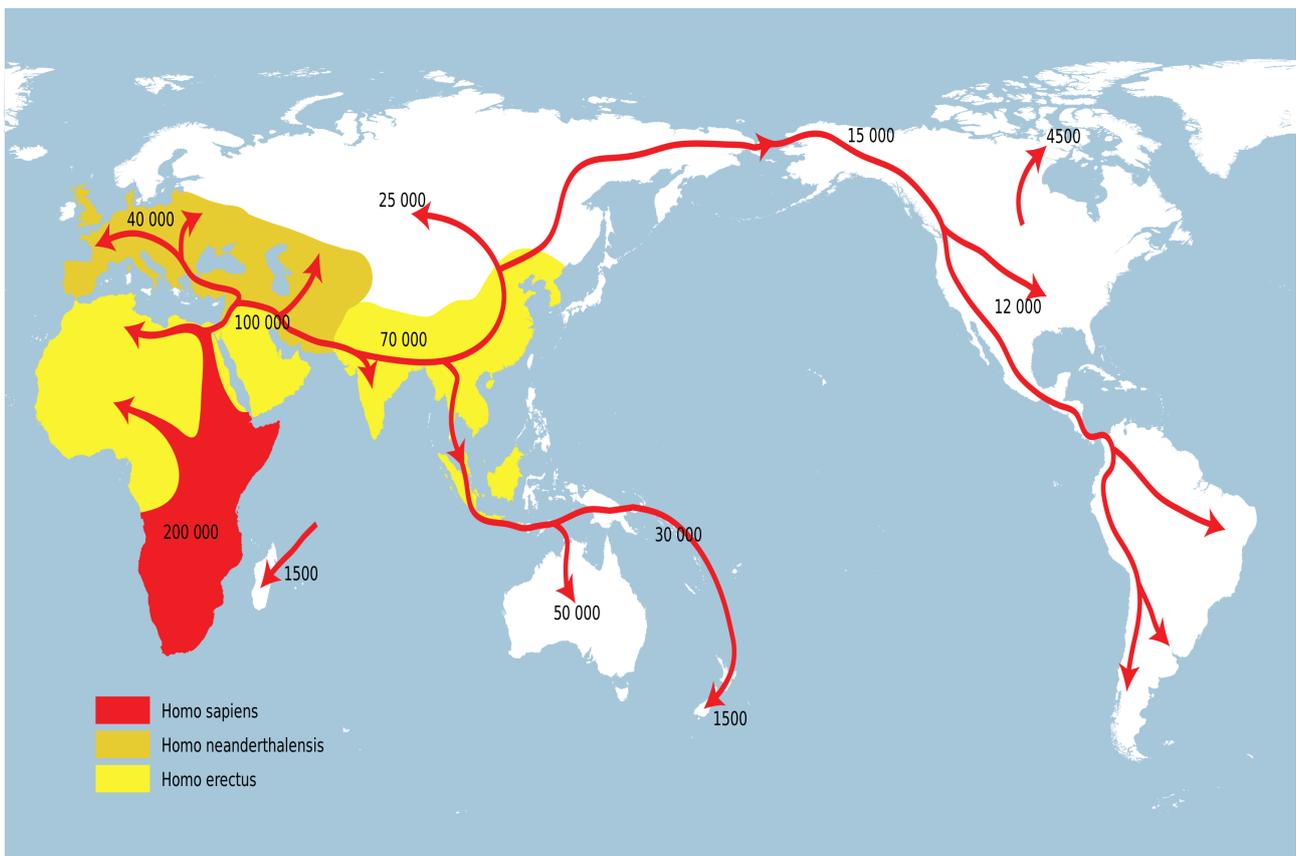


FIGURE 5 – Dispersion du genre Homo.

3 Fossilisations et techniques de datation

3.1 Fossilisation

Il faut des conditions particulières pour qu'un organisme vivant se fossilise. Ce processus s'opère le plus souvent par la minéralisation de l'organisme : les tissus sont remplacés par des substances minérales, pétrifiés au sein de la roche sédimentaire, roche par excellence pour la conservation de fossiles. Il peut y avoir, plus rarement, une conservation de la matière organique, dans les cas de congélation (celle des mammouth dans le pergélisol), de momification (momification dans du bitume, la diatomite (roche siliceuse)), d'inclusion dans de l'ambre. La conservation est meilleure et plus fréquente pour les parties rigides de l'organisme. Les tissus mous ne sont préservés de la décomposition qu'en l'absence d'oxygène, ce qui se produit parfois dans des dépôts de vase ou de boue.

On peut distinguer la conservation directe de tissus durs, de l'empreinte effectuée par les roches de tissus durs ou de tissus mous.

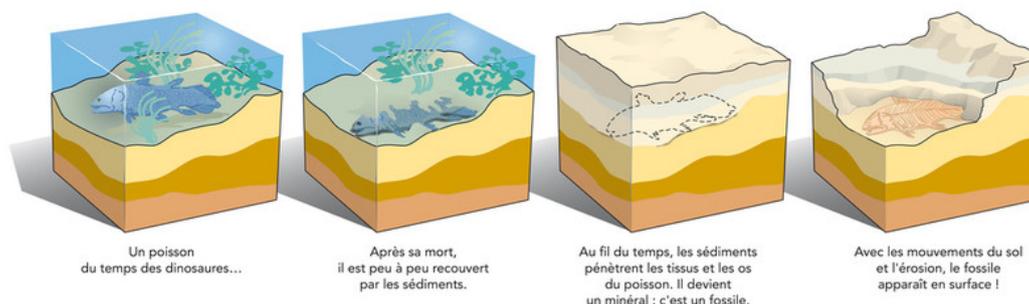


FIGURE 6 – Le processus de fossilisation.

3.2 Datation relative

La datation relative se base essentiellement sur les principes fondamentaux de la méthode stratigraphique, développée depuis le XVIII^{ème} siècle, à savoir le principe de continuité (une même couche a le même âge sur toute son étendue) et le principe de superposition (une couche est plus récente que celle qu'elle recouvre). La bio-chronologie, basée sur l'étude du contenu paléontologique des couches géologiques, était une source importante d'informations pour établir l'âge relatif de certains terrains.

Donc, les couches superficielles sont les plus récentes et plus on creuse profondément plus « retourne dans le temps ». Si on trouve certains fossiles d'espèces qui ont vécu à des moments précis, on peut associer des couches de lieux différents et savoir qu'elles datent d'un même époque.

On nommera alors les couches géologiques et donc ces temps géologiques suivant les lieux où ces couches géologiques affleurent. Par exemple, le Cambrien vient de « Cambria » (le pays de Galles en latin). Vu le passé minier de la Belgique, plusieurs couches portent des noms d'origine belge (Frasnien, Famennien, Tournaisien, Viséen et Yprésien).

Cette méthode permet d'ordonner dans les temps les différents fossiles, mais pas directement de les dater de façon précise.

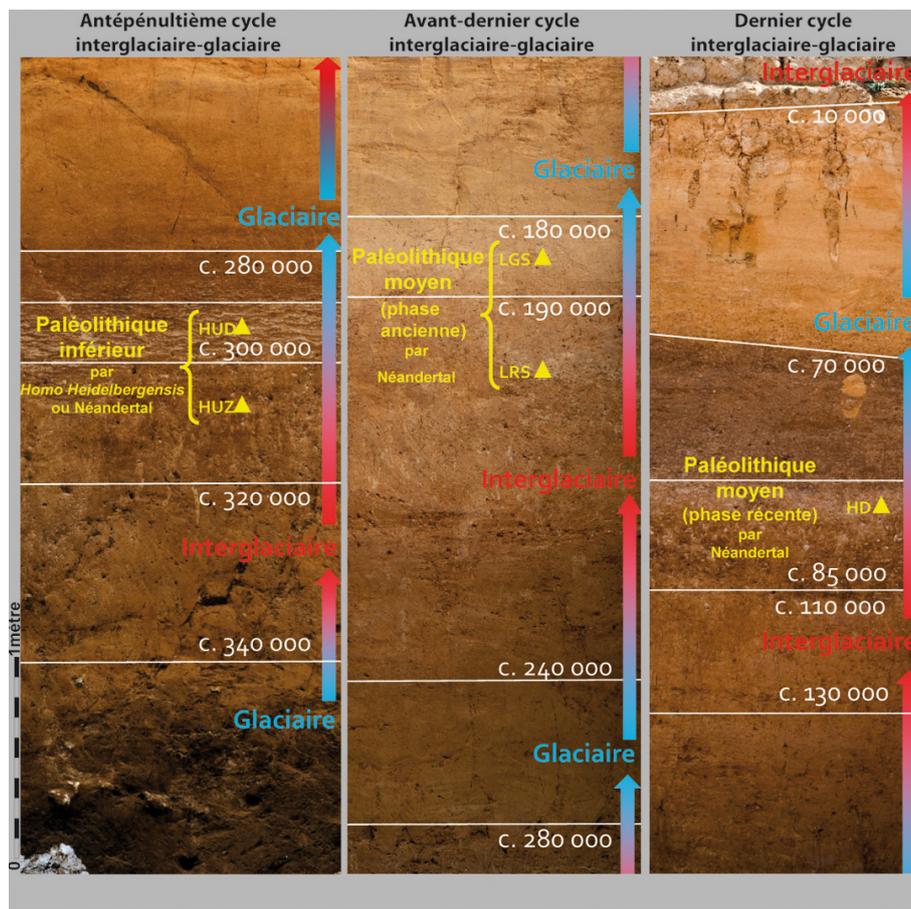


FIGURE 7 – Les différentes couches au nord de la Seine jusque 300 000 ans.

3.3 Datation absolue par radio-isotopes

La plupart des méthodes de datation absolue se basent sur la décroissance radioactive des atomes. Chaque atome a des isotopes différents (un nombre de neutron différent par noyau atomique). Certains de ces isotopes sont instables et se transforment en isotope stable. En connaissant la vitesse de décroissance de ces isotopes, on peut déterminer le moment de formation de l'échantillon (roches, os, ...).

Suivant l'époque à déterminer, on choisira un atome adapté (le carbone 14 permet de dater précisément jusque 35 000 ans, mais le Potassium/Argon ou le Rubidium/Strontium permettent de dater tous les âges géologiques).

3.4 Datation par horloge moléculaire

La comparaison de séquences d'ADN et/ou de protéines chez les espèces vivantes peut nous renseigner sur la chronologie des différents événements évolutifs qui ont marqué l'histoire de la vie sur terre. En effet, l'hypothèse de l'horloge moléculaire suggère que la vitesse d'accumulation des changements dus aux mutations dans les macromolécules biologiques est en moyenne constante sur de longues périodes. En comparant les séquences de base nucléiques ou d'acides aminés d'espèces actuelles, on peut donc prédire le temps nécessaire aux modifications de séquence de ces molécules.

Couplée à des observations paléontologiques, elle permet donc d'estimer les âges absolus de divergence des espèces.

Trois principaux écueils limitent pourtant la fiabilité des datations moléculaires :

- l'échantillonnage d'un nombre limité d'espèces et de gènes,
- l'incorporation de calibrations fossiles trop isolées ou ponctuelles,
- et surtout, l'existence d'hétérogénéités de taux de mutation entre lignées.

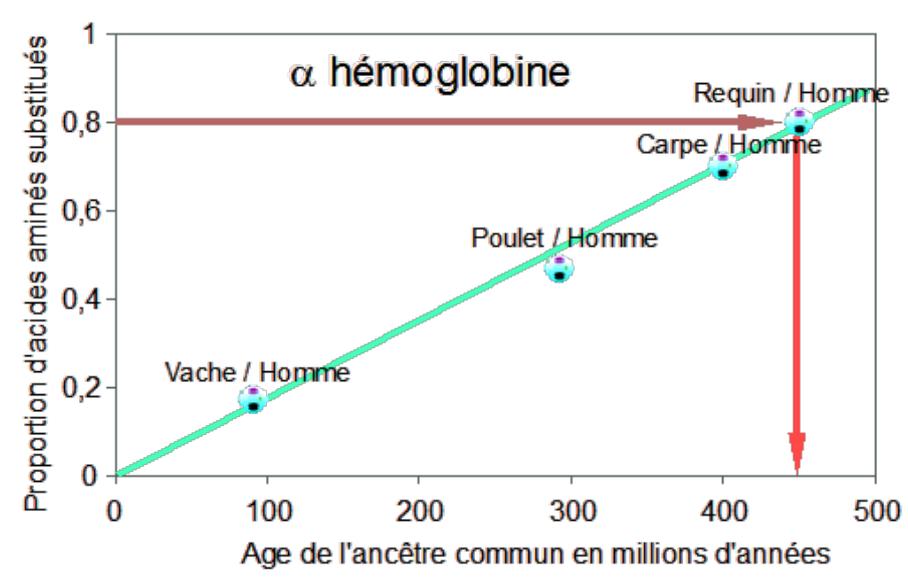


FIGURE 8 – Horloge moléculaire de l'hémoglobine des différents vertébrés.

Néanmoins, la méthode des horloges moléculaires appliquée à de riches échantillonnages tant taxonomiques que génomiques a récemment apporté des solutions convaincantes. Elle suggère, par exemple, que l'âge débattu de la diversification des métazoaires bilatériens⁶ puisse se situer entre 642-761 millions d'années (Ma), environ 100 Ma avant l'explosion cambrienne, et que celui de la diversification des mammifères placentaires se situe il y environ 100 Ma, bien avant la limite Crétacé/Tertiaire marquant l'extinction des dinosaures.

Cette méthode a permis de valider la chronologie d'apparition de groupes d'êtres vivants ou de remettre en question la chronologie d'autres groupes.

6. Les animaux supérieurs ayant une symétrie bilatérale.

4 Le développement de la vie

4.1 Formations des premières cellules

Nous ne disposons pas d'une machine à remonter le temps. Sur base des informations actuelles, il n'est pas possible de dépasser la vitesse de la lumière. Et donc, de « voir » dans le passé. Le présent est donc le seul moyen de comprendre le passé.

4.1.1 Premières molécules organiques

En 1953, les expériences de Miller⁷, et par la suite d'autres expériences similaires, ont montré que différentes molécules propres au fonctionnement des êtres vivants peuvent être produites par des mécanismes physico-chimiques.

L'expérience de Miller consiste à reproduire les conditions terrestres existantes il y a plus de 4 milliards d'années. Les conditions sont à cette époque extrêmement réductrices (cfr. cours sur les classes de réactions chimiques). L'expérience consiste à soumettre des molécules minérales à de fortes températures (plusieurs centaines de degrés Celsius) et à des décharges électriques pendant plusieurs semaines. Ces molécules composant cette « soupe primordiale » sont principalement le CO_2 , le méthane (CH_4), l'ammoniac (NH_3) et du dihydrogène (H_2).

Ce type d'expériences a permis de synthétiser les molécules suivantes :

- des sucres,
- des lipides,
- des acides aminés,
- et des composants des acides nucléiques.

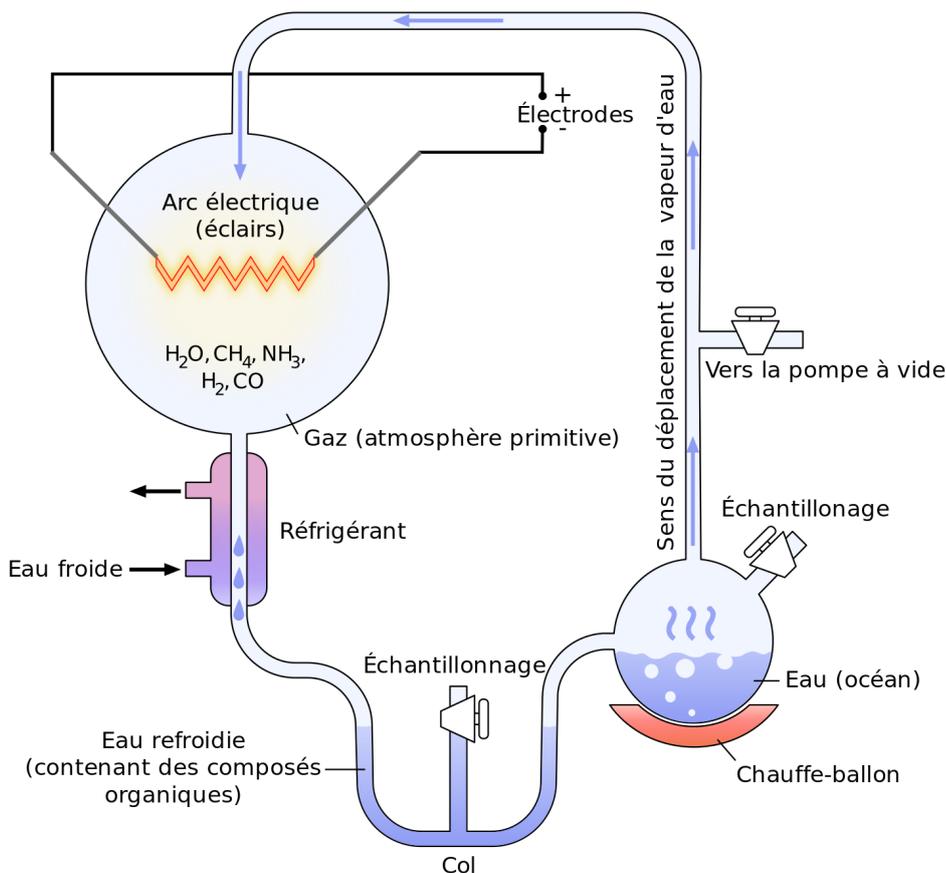


FIGURE 9 – L'expérience de Miller.

7. Stanley Miller, scientifique américain, 1930-2007

4.1.2 Apparition de la membrane cellulaire

Oparine⁸ a montré que certaines substances lipidiques pouvaient s'organiser pour isoler deux zones aqueuses, une zone « extérieure » et une zone « intérieure ». En séparant ces deux zones, des réactions chimiques différentes peuvent s'y produire.

Plusieurs hypothèses scientifiques existent actuellement sur l'apparition de la première cellule :

— La panspermie. Les premières cellules seraient issues de « bombardements extraterrestres »⁹.

Ceci est conforté par les faits suivants :

— des bactéries peuvent résister à l'entrée dans l'atmosphère terrestre si l'astéroïde porteur dépasserait le mètre ;

— sous forme de coques des bactéries peuvent résister au vide spatial et aux rayonnements solaires toxiques ;

Le principal contre-argument que l'on peut faire à cette théorie est qu'elle ne répond pas à la question de l'origine de la vie, mais reporte la question à une origine extra-terrestre.

— L'abiogenèse. La formation « in situ »¹⁰ : les premières cellules biologiques seraient apparues sur la Terre à partir de matières minérales. Les expériences de Miller et d'Oparine confortent cette version. Des acides aminés (produits selon l'expérience de Miller) seraient isolés dans des coacervats permettant la formation des premières protéines qui auraient assemblés des acides nucléiques, ce qui aurait produit la première cellule.



FIGURE 10 – Photographie de coacervats.

8. Alexandre Oparine, scientifique russe, 1894/1980

9. dans le sens, hors de la Terre, des astéroïdes ou tout autre chute auraient apportés ces premières cellules biologiques

10. « sur site », sur Terre

4.1.3 Endosymbiose

Le réticulum endoplasmique et la membrane nucléaire seraient le résultat d'une invagination de la propre membrane de la cellule.

Les cellules eucaryotes comportent toutes des mitochondries¹¹. Les mitochondries ont :

- une taille comparable aux bactéries ;
- une membrane interne de type bactérienne ;
- leur propre ADN sous forme d'anneau comme les bactéries.

On peut donc conclure de façon raisonnable que l'apparition des mitochondries dans les cellules eucaryotes résulte de l'intégration d'une bactérie à l'intérieur d'une cellule.

Les cellules eucaryotes végétales comportent toutes des chloroplastes¹². Les chloroplastes ont :

- une taille comparable aux bactéries ;
- une membrane interne de type bactérienne ;
- leur propre ADN sous forme d'anneau comme les bactéries.

On peut donc conclure de façon raisonnable que l'apparition des chloroplastes résulte de l'intégration d'une bactérie photosynthétique (de type cyanobactérie) à l'intérieur d'une cellule eucaryote.

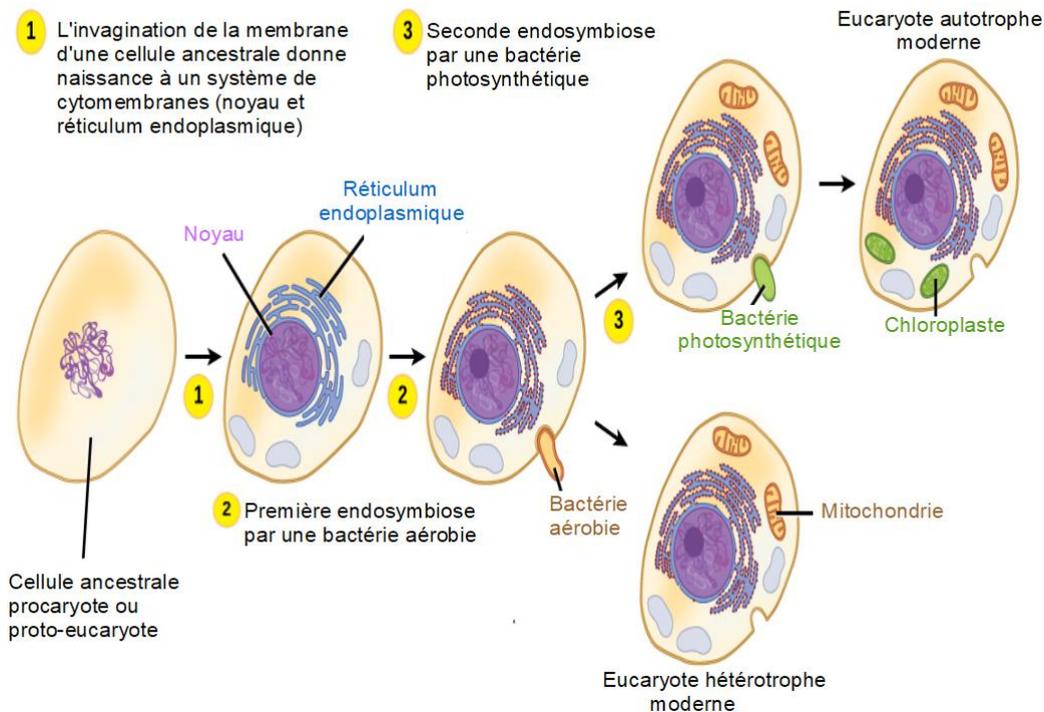


FIGURE 11 – L'endosymbiose des mitochondries et des chloroplastes.

11. Les mitochondries sont des organites cellulaires responsables de la production énergétique.

12. Les chloroplastes sont des organites cellulaires responsable de la photosynthèse

4.2 La variabilité génétique et les mutations

Les anomalies chromosomiques ou géniques (cfr. cours de 5ème) peuvent produire l'apparition de nouveaux caractères, de nouvelles structures. De plus, la sexualité par le brassage chromosomique, permet de multiplier et transmettre cette nouvelle information génétique.

4.3 La sélection naturelle ou l'adaptation au milieu

Si un nouveau caractère apparaît et que ce caractère donne un avantage comparatif dans la reproduction, alors ce caractère se multipliera. Ce caractère peut être lié à l'alimentation, à une moindre prédation, ou une attirance sexuelle plus élevée.

Malgré ce qui est parfois véhiculé, c'est loin d'être la « loi du plus fort », mais la loi du plus adapté. Chaque espèce va trouver une niche écologique où il sera le plus performant dans sa reproduction. De nombreuses études montrent que la coopération (cfr. coévolution) est tout aussi importante que la compétition entre espèces.

4.4 La notion d'espèce

Une espèce est une population d'individus qui sur un territoire donné peuvent se reproduire et donner une descendance fertile. La notion d'espèce liée à la morphologie est abandonnée car souffrant de trop d'exceptions (chenille/papillon, dimorphisme sexuel¹³

13. morphologie différente pour le mâle et la femelle, la veuve noire par exemple ou le paon

4.5 La création d'une nouvelle espèce : la spéciation

Pour qu'une nouvelle espèce apparaisse, il faudra une succession de nouveaux caractères qui séparera peu à peu le groupe d'individus de sa population d'origine. Cela peut se produire par un isolement géographique progressif ou par adaptation.

4.5.1 Le cas du pouillot verdâtre

Le pouillot verdâtre est une espèce de passereau vivant au départ (il y a 10 000 ans) au pied sud de l'Himalaya (sous-espèce *trochiloïdes*). Suite à la fin de la glaciation, il a pu remonter vers le nord par l'est (sous-espèce *ludlowi* et par l'ouest (sous-espèce *obscuratus*). Les sous-espèces se distinguent par leur chant et leur plumage. Ces populations ont continué vers le nord en contournant complètement l'Himalaya pour former à l'est la sous-espèce *plumbeitarsus* et à l'ouest la sous-espèce *vindanus*.

Si la population initiale (*trochiloïdes*) se reproduit avec *ludlowi* et *obscuratus*, *plumbeitarsus* et *vindanus* ne se reproduisent jamais ensemble (probablement à cause de leur chant trop différent). On assiste donc à la création de deux espèces séparées.

On parle de **spéciation allopatrique**¹⁴, car la spéciation vient d'une séparation de territoires des sous-populations.

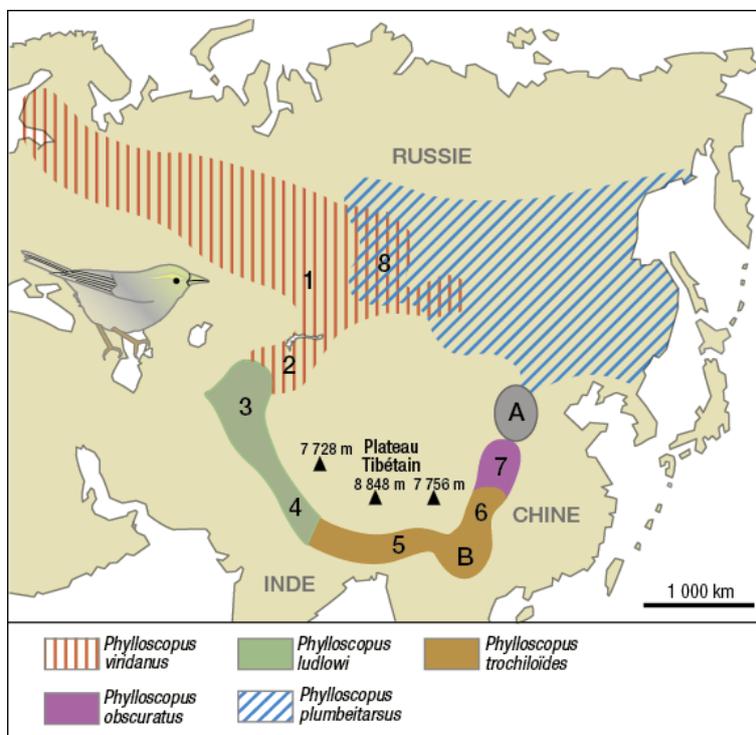


FIGURE 12 – La migration du pouillot verdâtre.

4.5.2 Le cas du phalène du bouleau

La phalène du bouleau est un papillon inféodé aux bouleaux dont les ailes sont claires (pour dissimuler des prédateurs sur le tronc du bouleau). Au XIX^{ème} siècle, près de Londres, la pollution a entraîné le noircissement du tronc des bouleaux. Une mutation s'est produite entraînant le noircissement des ailes. Ces ailes sombres donnaient un avantage comparatif aux individus qui en disposaient (moins de prédation). La population des phalènes du bouleau près des zones polluées a été rapidement constituée que d'individus à ailes sombres, tandis que les individus à ailes claires continuaient à perdurer sur les zones non-polluées.

14. du grec « allos » signifiant « autre » et du latin « patria » signifiant « terre des aïeux ».

Si les phalènes à ailes noires se seraient reproduits entre-eux, on aurait pu parler d'une **spéciation sympatrique**¹⁵, car la spéciation se serait déroulée sur un même territoire.



FIGURE 13 – Deux phalènes du bouleau, l'un à ailes claires, l'autre à ailes sombre, sur un bouleau clair.

4.6 Coévolution et domestication

De nombreuses espèces ont créés des dépendances fortes entre elles.

Par exemple, les insectes butineurs sont liés aux plantes et inversement. L'être humain est dépendant des bactéries qui vivent en symbiose dans son tube digestif. On appelle ce mécanisme de dépendance mutuelle de **coévolution**.

Une coévolution particulière s'est développée lorsque l'être humain a commencé à sélectionner d'autres vivants sur base de caractères qu'il trouvait intéressants¹⁶. La sélection naturelle est devenue une sélection artificielle. Cette domestication n'a pas été profitable qu'à l'être humain, mais aussi aux espèces domestiquées qui ont leur population augmentée. Ces espèces domestiquées restent pour la plupart inter-fécondes avec leur population sauvage (loup/chien, auroch/vache, chèvre, mouton, ...).

15. du grec « sym » signifiant « avec » et du latin « patria » signifiant « terre des aïeux ».

16. céréales : le nombre et la grosseur des graines, l'auroch (ancêtre de la vache) : la quantité de lait ou de viande produite, la poule : la taille et la quantité d'œufs, le loup (l'ancêtre du chien) : sa capacité de chasse ou de garde du troupeau, ...

5 La classification phylogénétique du vivant

5.1 Les notions

Il est important de bien distinguer trois actions distinctes :

— **Ranger** (mettre en rang) s'est ordonner.

On peut ordonner les êtres vivants sur base de leur taille, de leur poids ou toutes autres grandeurs (profondeur, salinités, concentrations, ...). Cependant, ce type de rangement n'aide en aucune manière un regroupement de ces êtres vivants, car le choix de ces mesures sont arbitraires.

— **Trier** s'est identifier.

L'objectif d'un tri est d'identifier les objets. Dans le cas du vivant, il faut pouvoir distinguer différentes espèces sur un territoire donné. Des ouvrages écrits de détermination des espèces (Faune et flore) existent qui permettent, sur un territoire donné, de :

— lister les espèces présentes ;

— proposer un arbre de décisions (sur la présence de caractères ou sur des grandeurs diverses) qui permettra le tri et donc l'identification.

Il peut arriver que la présence de caractères soit en concordance avec la classification, mais il se peut aussi que ce soit aussi que des critères de taille ou d'autres grandeurs soit utilisés. Dans tous les cas, ces ouvrages n'utiliseront pas tous les caractères permettant une classification :

— soit parce que ces caractères ne sont pas directement accessibles (utilisation de microscope, mort de l'individu, séquençage d'ADN ou de protéines) ;

— soit parce que sur le territoire donné, le caractère n'est pas déterminant (absence d'espèces intermédiaires)

— **Classer** s'est regrouper.

Classer s'est mettre ensemble ce qui est semblable. Cela ne peut se faire que sur base de caractères communs.

Actuellement, la nouvelle classification phylogénétique des êtres vivants se généralise au détriment de l'ancienne classification basée sur des classes et des ordres. Comme son nom l'indique, elle se base sur l'évolution (« phylo ») et sur la génétique.

Si de nombreux groupes de l'ancienne classification ont été validés, d'autres ne l'ont pas été (invertébrés, poissons, reptiles, ...).

La règle principale est qu'elle se base sur la présence d'un caractère physique. Il est donc nécessaire de bien intégrer :

— qu'il s'agit d'un caractère et non d'une fonction (plumes -caractère- versus vol -fonction-, par exemple) ;

— qu'il s'agit de la présence physique et non de l'absence d'un caractère (présence d'un coccyx versus absence de queue).

Ce caractère physique peut être une séquence de base d'ADN ou une séquence d'acides aminés dans une protéine. Une difficulté peut être une convergence évolutive -l'apparition de mêmes caractères dans des branches séparées- (que l'analyse génétique et des protéines permet de clarifier) et la régression de certains caractères au cours du développement (que l'embryologie permet de résoudre).

Des matrices de présences de caractères physiques permettent d'effectuer informatiquement des classifications automatiques (cfr. exercices vus au cours).

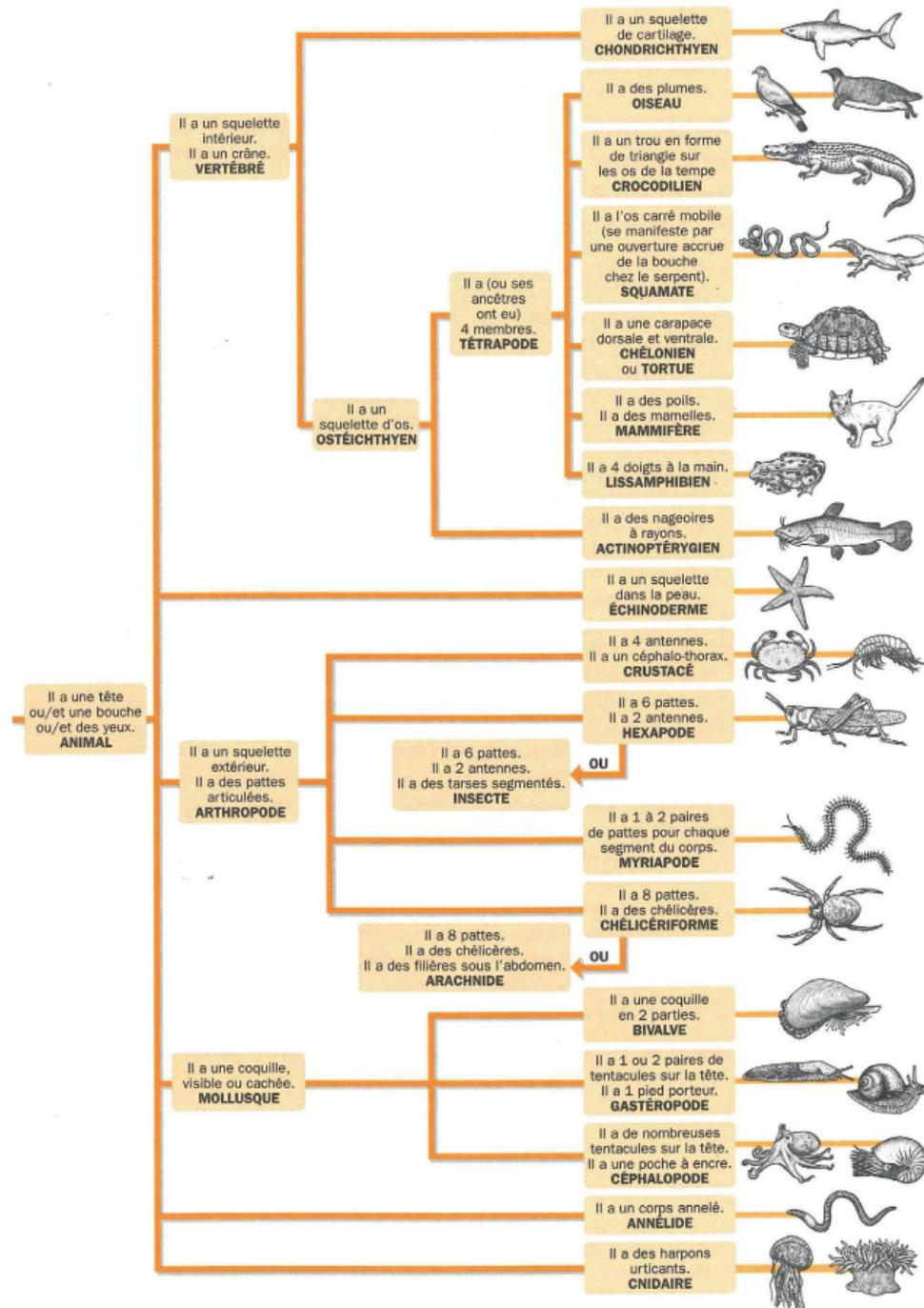


FIGURE 14 – La classification phylogénétique simplifiée des animaux.

5.2 Les outils

5.2.1 Les caractères anatomiques

Ce sont les premiers critères historiquement utilisés. Il s'agit de l'analyse des tissus durs (os, squelette, ..) ou de tissus mous (système digestif, système nerveux, système circulatoire). L'utilisation de fossiles permet de travailler sur des espèces éteintes depuis des millions d'années.

5.2.2 L'analyse de l'ADN

L'analyse de l'ADN se fait majoritairement sur les espèces actuelles. Elle ne peut se faire que très rarement sur des espèces éteintes et dans tous les cas, l'extinction ne date au pire que de quelques dizaines de milliers d'années (négligeable sur les temps géologiques).

Cependant, elle est extrêmement précise et permet de confirmer des groupes connus ou distinguer des sous-groupes de façon plus fine. Elle permet de mettre en évidence les mutations qui ont eu lieu.

5.2.3 L'analyse des protéines

Cet autre méthode moléculaire vient souvent confirmer ou préciser les autres méthodes. Il s'agit en séquençant les protéines de mettre en évidence les changements métaboliques de l'organisme.

5.3 Les difficultés

5.3.1 Caractère physique versus fonction : Homologie et Analogie

Il est important de bien différencier caractère physique et fonction. L'exemple typique est l'aile. Généralement elle est définie comme un membre permettant le vol, alors les autruches n'ont pas d'ailes, mais bien les mouches, les colibris et les chauve-souris (alors que ce caractère physique est totalement différent pour ces trois animaux). Si on définit l'aile comme un membre antérieur disposant de plume, alors les autruches ont des ailes (mais pas les mouches ou les chauve-souris). On évitera donc ce type de terme générant autant d'ambiguïté.

On peut voir facilement que l'aile d'un oiseau, comme le pigeon, est l'homologue du bras humain. Il s'agit dans les deux cas d'un membre antérieur, composé d'un humérus, d'un radius, de l'ulna, de carpes, de métacarpes et de phalanges. On parlera alors de caractère homologue. Ces caractères ne sont pas analogues¹⁷.

Par contre, si l'on analyse précisément l'œil de la pieuvre, on s'aperçoit rapidement que sa structure est différente de l'œil humain. Ces deux organes ne sont donc pas homologues, même s'ils ont le même fonctionnement.

L'analogie porte sur les fonctions, tandis que l'homologie porte sur le caractère lui-même.

5.3.2 Convergence évolutive

On peut remarquer que les différentes adaptations à un même milieu, génèrent des caractères physiques comparables. On peut prendre la forme hydrodynamique du requin (un poisson cartilagineux) et le dauphin (un mammifère). Des branches séparées peuvent adopter des caractères physiques similaires. Cet exemple est simple. Cependant, parfois, seul l'analyse moléculaire (de l'ADN ou des protéines) permet de départager les regroupements.

5.4 Exercices simplifiés de classification

cfr. feuilles distribuées

17. On a jamais vu voler un être humain avec ces bras.

6 L'origine de la vie dans l'Histoire

6.1 Le créationnisme

Durant toute l'histoire humaine, l'ensemble des civilisations croyait en la création du monde par leurs dieux. Dans la tradition judéo-chrétienne, suivant précisément la Bible, la création du Monde s'était faite -4004 av J-C. Le monde, y compris les êtres vivants avait été fait une fois pour toute. C'est le créationnisme.

6.2 Le catastrophisme

Au XVIIIème siècle, la découverte de fossiles d'animaux inconnus ébranle cette croyance. Pour tenir compte de ces découvertes, on imagine une série de catastrophe suivies par une création de nouvelles espèces par Dieu. C'est le catastrophisme.

6.3 Le transformisme

A la même époque, Carl Linné, un biologiste suédois, crée une nouvelle classification des êtres vivants sur les ressemblances morphologiques des individus. Il crée la notion d'espèce toujours utilisée actuellement. Actuellement, une espèce est une population d'individus pouvant se reproduire ensemble. Du fait des transitions entre espèces, Cette classification montre par les transitions entre les espèces le fait évolutif.

Au début du XIXème siècle, grâce à l'anatomie comparée, Lamarck, un noble français, pose pour la première fois l'hypothèse du transformisme. Les êtres vivants se transformeraient au cours de l'histoire. Un individu subirait au cours de son histoire des transformations qu'il communiquerait à sa descendance. Cependant, son explication n'est observée pas.

Selon Lamarck, une girafe en tirant sur son cou augmenterait la longueur de ce cou et, on ne sait comment, transmettrait ce caractère « long cou » à sa descendance.

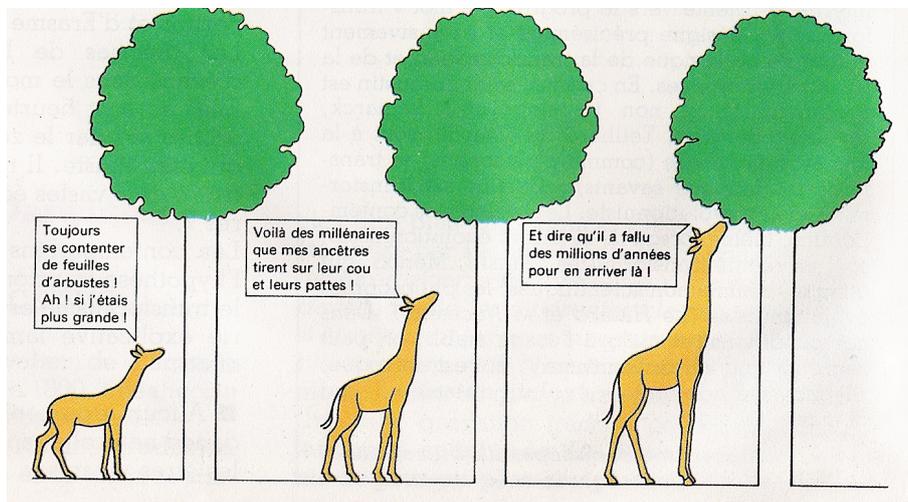


FIGURE 15 – L'évolution du vivant selon Lamarck.

6.4 L'évolutionnisme

A la fin du XIXème, Charles Darwin, un biologiste anglais, propose l'évolutionnisme qui non seulement montre que les êtres vivants évoluent, mais aussi apporte une explication à cette évolution : la sélection naturelle. Si par hasard, un individu a un caractère qui lui donne un avantage compétitif par rapport aux autres individus, il aura plus de chances de se reproduire et donc de donner une descendance qui aura le même caractère.

Dans une population de girafes, certaines auraient un cou plus long que d'autres par variabilité génétique. Ces girafes peuvent plus facilement se nourrir et donc se reproduire. Les girafes à long cou transmettent ce caractère à leur descendance.

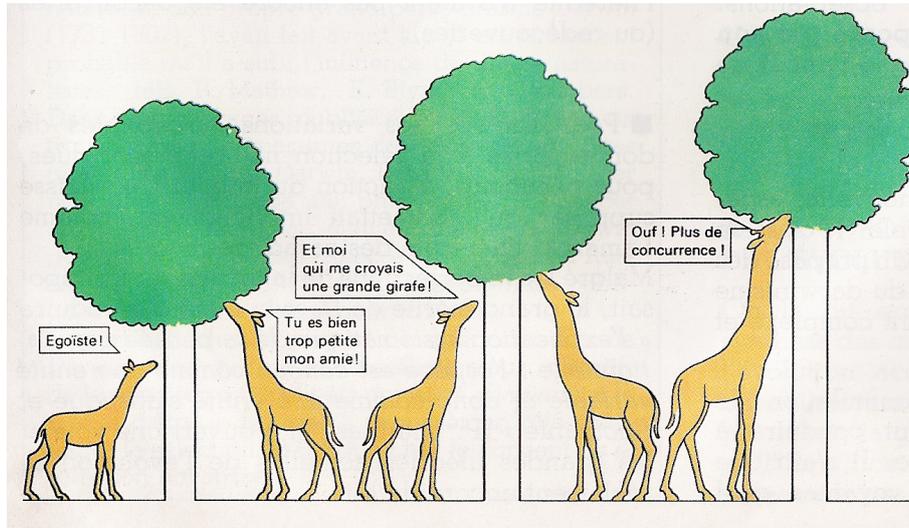


FIGURE 16 – L'évolution du vivant selon Darwin.

6.5 La théorie synthétique

La découverte de la génétique (la transmission des caractères héréditaires à travers l'ADN), ainsi que l'écologie des populations et la dérive des continents au début du XX^{ème} siècle renforcera non seulement l'évolution, mais aussi la sélection naturelle. En effet, la découverte de la mutation génétique donnait l'élément aléatoire nécessaire. La mutation modifie l'ADN qui lui-même modifie les protéines (de structure ou de métabolisme) qui produisent de nouveaux caractères.

7 L'origine commune de tous les espèces vivantes

7.1 La génétique

Tous les êtres vivants ont le même code génétique (bases de l'ADN) et les espèces proches ont beaucoup de séquence d'ADN en commun.

7.2 La structure des protéines

Tous les êtres vivants ont les mêmes acides aminés et espèces proches ont beaucoup de protéines en commun ou de séquences d'acides aminés en commun.

L'arbre phylogénétique du cytochrome c

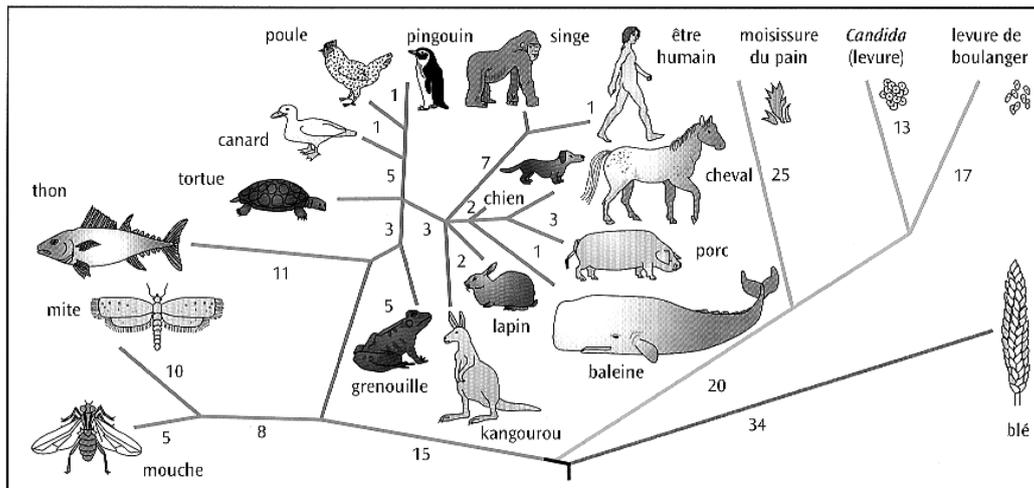


FIGURE 17 – L'évolution selon les modifications d'une protéine (le cytochrome C).

7.3 La structure de la cellule

La base de la structure des cellules est la même chez tous les êtres vivants (membrane, noyau, mitochondrie, ...).

La structure cellulaire est d'autant plus différente que les espèces sont éloignées en terme d'évolution.

7.4 L'anatomie comparée

L'anatomie comparée des êtres vivants actuels (membre antérieur, encéphale, circulation, crâne...) correspond à l'évolution des êtres vivants.

On peut voir dans le schéma ci-dessous la correspondance des os chez différents tétrapodes.

7.5 La paléontologie

L'anatomie comparée des fossiles et leur datation (par radioactivité ou par couche géologique) a montré l'évolution.

L'exemple ci-dessous montre la formation de diverses espèces d'éléphants actuels (en passant par le mammouth) à partir d'un ancêtre datant de 40 millions d'années.

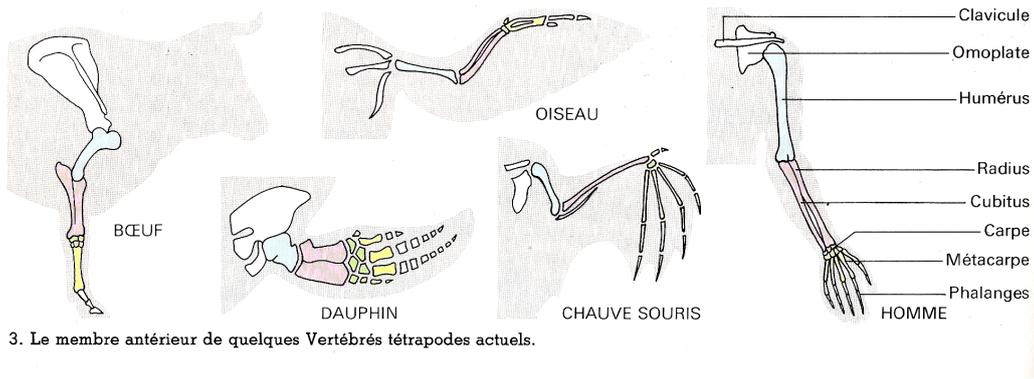


FIGURE 18 – Homologie des os des membres antérieurs des tétrapodes.

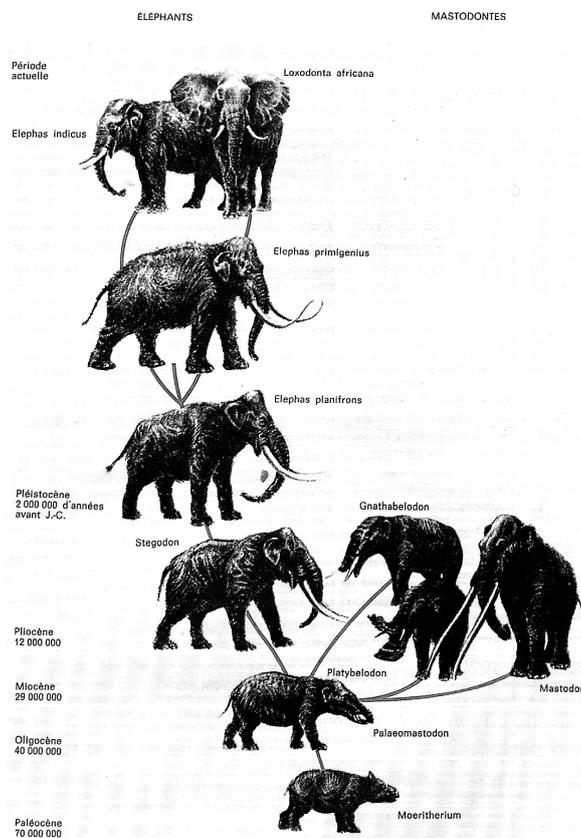


FIGURE 19 – Les différents « éléphants » au cours des temps.

7.6 La biogéographie

La répartition géographique des grandes groupes d'espèces correspond à l'évolution de ces espèces.

Dans l'exemple ci-dessous, on peut voir que les phasmes¹⁸ se sont diversifiés après l'extinction des dinosaures. Les groupes de phasmes à Madagascar et en Océanie font partie d'une même famille phylogénétique (issu d'une même espèce).

18. Les phasmes sont des insectes prenant la forme de brindilles ou de feuilles pour se camoufler (mimétisme).

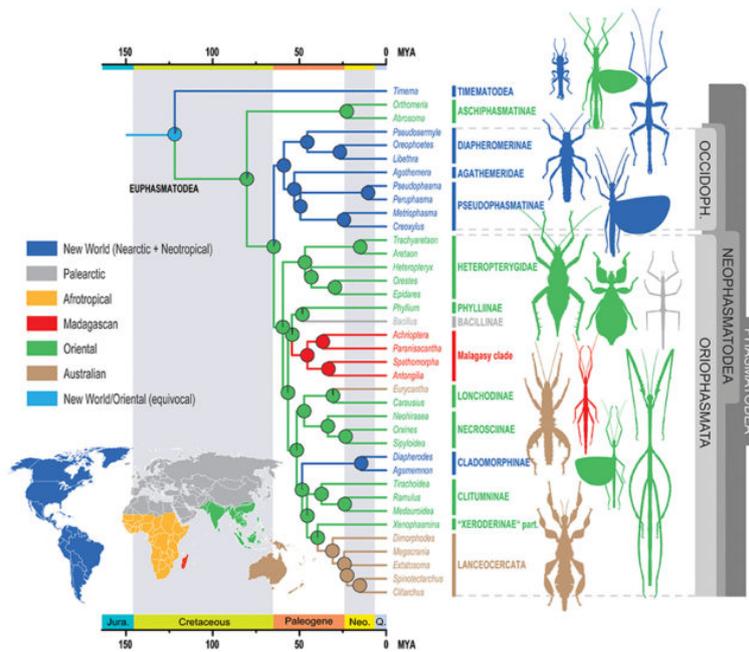


FIGURE 20 – La biogéographie des phasmes.

7.7 L'embryologie

Le développement de l'embryon d'une espèce suit approximativement l'évolution de cette espèce (« L'embryogenèse récapitule la phylogenèse » Ernest Haeckel 1866). Ce développement embryonnaire ne suit pas totalement l'évolution, car des modifications embryonnaires peuvent être des modifications génétiques.

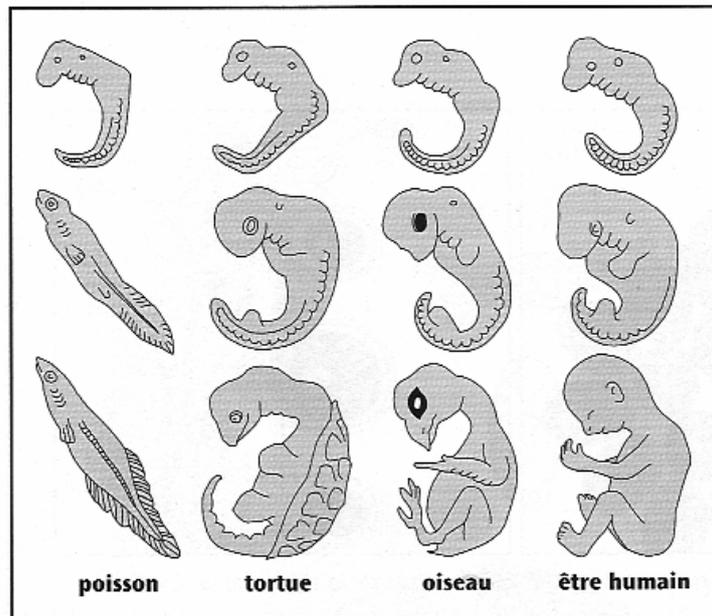


FIGURE 21 – L'évolution embryologique récapitule l'évolution phylogénétique.

7.8 La classification phylogénétique

La classification phylogénétique (basée sur l'évolution) forme un tout cohérent. Même si certaines parties restent encore à découvrir, la solidité conceptuelle, et la convergence suivant les méthodes utilisées, montrent que l'évolution des espèces est un fait.

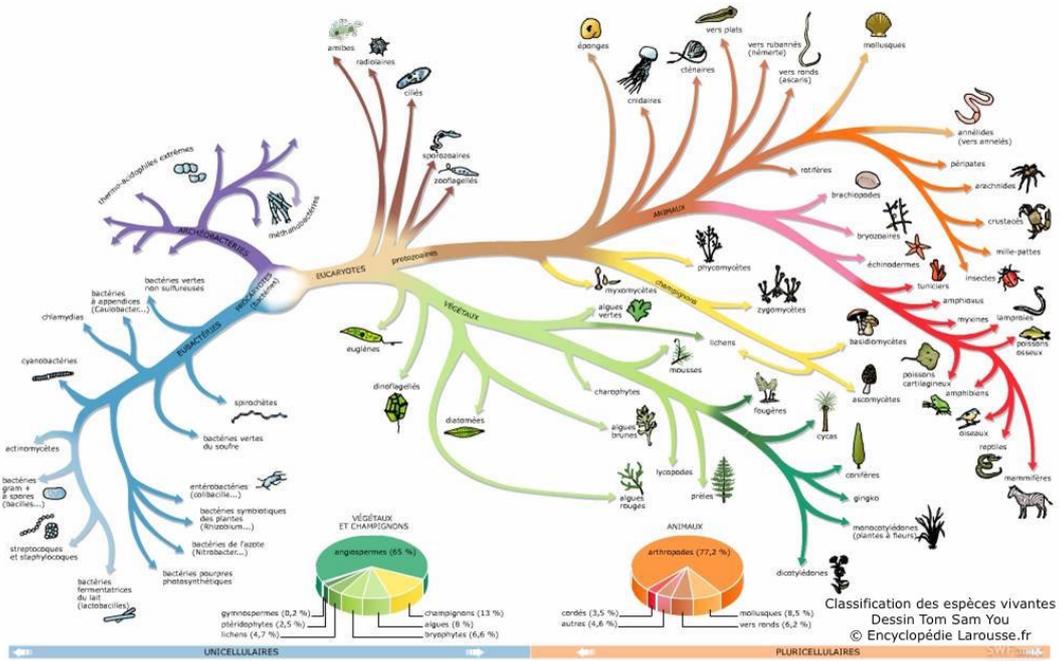


FIGURE 22 – La classification phylogénétique.

Table des matières

1	Évolution de la Terre	1
1.1	Aux origines de la Terre	2
1.1.1	Le big-bang	2
1.1.2	La formation de la voie lactée et du système solaire	2
1.2	Évolution des conditions physiques sur Terre	2
1.2.1	Évolution des facteurs atmosphériques	2
1.2.2	La dérive des continents	3
1.3	Évolution de la vie sur Terre	4
1.3.1	L'apparition de la vie	4
1.3.2	Les origines des grands groupes des animaux	4
1.3.3	L'ère des amphibiens	4
1.3.4	L'ère des reptiles	4
1.3.5	L'ère des mammifères	5
2	Des primates à l'homo sapiens	6
2.1	Les premiers primates	6
2.2	La diversification du genre Homo	7
3	Fossilisations et techniques de datation	8
3.1	Fossilisation	8
3.2	Datation relative	8
3.3	Datation absolue par radio-isotopes	9
3.4	Datation par horloge moléculaire	10
4	Le développement de la vie	11
4.1	Formations des premières cellules	11
4.1.1	Premières molécules organiques	11
4.1.2	Apparition de la membrane cellulaire	12
4.1.3	Endosymbiose	13
4.2	La variabilité génétique et les mutations	14
4.3	La sélection naturelle ou l'adaptation au milieu	14
4.4	La notion d'espèce	14
4.5	La création d'une nouvelle espèce : la spéciation	15
4.5.1	Le cas du pouillot verdâtre	15
4.5.2	Le cas du phalène du bouleau	15
4.6	Coévolution et domestication	16
5	La classification phylogénétique du vivant	17
5.1	Les notions	17
5.2	Les outils	19
5.2.1	Les caractères anatomiques	19
5.2.2	L'analyse de l'ADN	19
5.2.3	L'analyse des protéines	19
5.3	Les difficultés	19
5.3.1	Caractère physique versus fonction : Homologie et Analogie	19
5.3.2	Convergence évolutive	19
5.4	Exercices simplifiés de classification	19
6	L'origine de la vie dans l'Histoire	20
6.1	Le créationnisme	20
6.2	Le catastrophisme	20
6.3	Le transformisme	20
6.4	L'évolutionnisme	20

6.5	La théorie synthétique	21
7	L'origine commune de tous les espèces vivantes	22
7.1	La génétique	22
7.2	La structure des protéines	22
7.3	La structure de la cellule	22
7.4	L'anatomie comparée	22
7.5	La paléontologie	22
7.6	La biogéographie	23
7.7	L'embryologie	24
7.8	La classification phylogénétique	25