



La TERRE

Origine et histoire de la Terre
Composition et structure
Géographie de la Terre
Rotation et Orbite
Habitabilité
La Lune
Iconographie et additifs



La Terre (et la Lune)

I Généralités

La **Terre** est une planète du Système solaire, la troisième au regard de la distance au Soleil. Il s'agit du cinquième objet le plus grand, tant en taille qu'en masse, dans le Système solaire et la plus massive des planètes telluriques de ce système planétaire.

La Terre s'est formée il y a 4,54 milliards d'années environ et la vie est apparue moins d'un milliard d'années plus tard. La planète abrite des millions d'espèces vivantes dont les humains. La biosphère de la Terre a fortement modifié l'atmosphère et les autres caractéristiques abiotiques de la planète, permettant la prolifération d'organismes aérobies de même que la formation d'une couche d'ozone, qui associée au champ magnétique terrestre, bloque une partie des rayonnements solaires permettant ainsi la vie sur Terre. Les propriétés physiques de la Terre de même que son histoire géologique et son orbite ont permis à la vie de subsister durant cette période et la Terre devrait pouvoir soutenir la vie durant encore au moins 500 millions d'années.

La croûte terrestre est divisée en plusieurs segments rigides appelés plaques tectoniques qui se déplacent sur des millions d'années. Environ 71 % de la surface terrestre est couverte par des océans d'eau salée qui forment l'hydrosphère avec les autres sources d'eau comme les lacs ou les nappes phréatiques. Les pôles géographiques de la Terre sont principalement recouverts de glace (inlandsis de l'Antarctique) ou de banquises. L'intérieur de la planète reste actif avec un épais manteau composé de roches plus ou moins fondues, un noyau externe liquide qui génère un champ magnétique et un noyau interne de fer solide.

La Terre interagit avec les autres objets spatiaux, principalement le Soleil et la Lune. Actuellement, la Terre orbite autour du Soleil en 365,26 jours solaires ou une année sidérale. L'axe de rotation de la Terre est incliné de 23,44° par rapport à la perpendiculaire du plan de l'écliptique, ce qui produit des variations saisonnières sur la surface de la planète avec une période d'une année tropique (365,2422 jours solaires). Le seul satellite naturel connu de la Terre est la Lune qui commença à orbiter il y a 4,5 milliards d'années. Celle-ci provoque des marées, stabilise l'inclinaison axiale et ralentit lentement la rotation terrestre. Il y a environ 3,8 milliards d'années, lors du grand bombardement tardif, de nombreux impacts d'astéroïdes causèrent d'importantes modifications de sa surface.

La Terre a pour particularité d'être le seul endroit de l'univers connu pour abriter la vie, comme la faune (dont, entre autres, l'espèce humaine) et la flore. Les cultures humaines ont développé de nombreuses représentations de la planète, dont une personnification en tant que déité, la croyance en une terre plate, la Terre en tant que centre de l'univers et la perspective moderne d'un monde en tant que système global nécessitant une gestion raisonnable.

La science qui étudie la Terre est la géologie. Compte tenu de l'influence de la vie sur la composition de l'atmosphère, des océans et des roches sédimentaires, la géologie emprunte à la biologie une partie de sa chronologie et de son vocabulaire.

Pour plus de détails sur la Terre (en tant que partie du système solaire) et sur la création du système solaire, référez-vous à notre dossier sur le système solaire.

La Terre ⊕



La Terre vue depuis Apollo 17 en 1972

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	149 597 887,5 km (1,0000001124 UA)
Aphélie	152 097 701 km (1,0167103335 UA)
Périhélie	147 098 074 km (0,9832898912 UA)
Circonférence orbitale	939 885 629,3 km (6,282747374 UA)
Excentricité	0,01671022
Période de révolution	365,25696 jours
Période synodique	365,25696 jours
Vitesse orbitale moyenne	29,783 km/s
Vitesse orbitale maximale	30,287 km/s
Vitesse orbitale minimale	29,291 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	(par définition) 0°
Nœud ascendant	174,873°
Argument du périhélie	288,064°
Satellites connus	1, la Lune

Caractéristiques physiques

Rayon équatorial	6 378,137 km
Rayon polaire	6 356,752 km
Rayon moyen volumétrique	6 371,0 km
Aplatissement	0,0033529
Périmètre équatorial	40 075,017
Superficie	510 067 420 km ²

Volume	1,08321×10 ¹² km ³
Masse	5,9736×10 ²⁴ kg
Masse volumique globale	5,515×10 ³ kg/m ³
Gravité de surface	9,80665 m/s ² (1 g)
Vitesse de libération	11,186 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	0,99726949 jour (23 h 56 min 4,084 s)
Vitesse de rotation (à l'équateur)	1 674,364 km/h
Inclinaison de l'axe	23,4373°
Albédo géométrique visuel	0,367
Albédo de Bond	0,306
Irradiance solaire	1 367,6 W/m ² (1 Terre)
Température d'équilibre du corps noir	254,3 K (-18,7 °C)
Température de surface :	
Maximum :	56,7 °C
Moyenne :	15 °C
Minimum :	-93,2 °C
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	101 325 Pa
Masse volumique au sol	1,217 kg/m ³
Masse totale	5,1×10 ¹⁸ kg
Hauteur d'échelle	8,5 km
Masse molaire moyenne	28,97 g/mol
Azote N₂	78,084 % volume sec
Oxygène O₂	20,946 % volume sec
Argon Ar	0,9340 % volume sec
Dioxyde de carbone CO₂	400 ppm volume sec
Néon Ne	18,18 ppm volume sec
Hélium He	5,24 ppm volume sec
Méthane CH₄	1,79 ppm volume sec
Krypton Kr	1,14 ppm volume sec
Hydrogène H₂	550 ppb volume sec
Protoxyde d'azote N₂O	300 ppb volume sec
Monoxyde de carbone CO	100 ppb volume sec
Xénon Xe	90 ppb volume sec
Ozone O₃	0 à 70 ppb volume sec
Dioxyde d'azote NO₂	20 ppb volume sec
Iode I	10 ppb volume sec
Vapeur d'eau H₂O	~ 0,4 % volume global ~ de 1 à 4 % en surface (valeurs typiques)

Chronologie

Origines de la Terre

L'âge de l'Univers est estimé à approximativement 13,819 milliards d'années. La principale théorie sur la formation de l'Univers est le Big Bang : L'Univers était un point de haute énergie qui est brutalement entré en expansion, se refroidissant. En ralentissant (refroidissement) une partie de cette énergie est devenue de la matière sous forme d'atome de deutérium, d'hélium 4 et de lithium 7 : c'est la nucléosynthèse primordiale. Des nuages de gaz d'hydrogène se sont concentrés sous l'impulsion de la gravitation, prenant la forme de galaxies et d'étoiles. Lorsqu'une sphère de gaz atteint une certaine densité, une réaction de fusion nucléaire devient possible, fusionnant deux atomes d'hydrogène pour former de l'hélium. Lorsque l'étoile devient plus âgée et que la quantité d'hélium produit augmente, la fusion nucléaire produit des atomes plus lourds : carbone, oxygène, etc. Arrivée à un certain âge, une étoile peut s'effondrer sur elle-même puis exploser en une supernova expulsant la matière qu'elle a produite. Cette matière est à l'origine de la nébuleuse solaire, un nuage de gaz (ou disque d'accrétion) à partir duquel le système solaire s'est formé. Ce dernier était alors un large nuage en rotation, constitué de poussière, de roche et de gaz. Une théorie suggère qu'il y a environ 4,6 milliards d'années, une étoile proche a été détruite dans une supernova et l'explosion a envoyé une onde de choc à travers la nébuleuse solaire, lui faisant gagner un moment angulaire. Au fur et à mesure que le nuage accélérât sa rotation, la gravité et l'inertie l'ont aplati en un disque protoplanétaire orienté perpendiculairement par rapport à son axe de rotation. L'essentiel de la masse se concentre alors au centre et commence à s'échauffer, mais de petites perturbations dues aux collisions et au moment angulaire d'autres larges débris créent les conditions pour que des protoplanètes puissent commencer à se former. La chute de matériaux, l'augmentation de la vitesse de rotation et la compression liée à la gravité créent une énorme quantité d'énergie cinétique au centre. L'incapacité à transférer cette énergie suffisamment rapidement à l'extérieur occasionne une montée progressive de la température au centre du disque. Finalement, la fusion nucléaire de l'hydrogène avec l'hélium commence, et après contraction, une étoile T Tauri devient notre jeune Soleil.

Pendant ce temps, alors que la gravité pousse la matière à se condenser autour des objets précédemment perturbés, les particules de poussière et le reste du disque protoplanétaire commencent à se séparer en anneaux. Des fragments de plus en plus gros entrent en collision les uns avec les autres et deviennent de plus gros objets, ultimement destinés à devenir des protoplanètes. Ceux-ci incluent un groupement situé approximativement à 150 millions de kilomètres du centre : la Terre. Le vent solaire de la nouvelle étoile T Tauri nettoie la plus grande partie du gaz et des poussières du disque, qui ne s'étaient pas déjà condensés en de plus gros corps. Après plusieurs années d'impacts, la Terre se forma. Suite à la naissance de celle-ci, les astéroïdes ont continué à entrer en collision avec la Terre, ce qui a produit une énergie sous forme de chaleur. La Terre a commencé à brûler de l'intérieur dû à la chaleur intense. Les éléments qui s'y trouvaient (fer et nickel) ont fondu et coulé vers le centre de la planète. C'est ainsi que le noyau se forma lors des quarante premiers millions d'années de la Terre. Le fer liquide contenu dans le noyau crée un véritable champ magnétique autour de celle-ci. C'est en fait ce champ qui protège la planète de certaines particules cosmiques. Plusieurs années plus tard, une collision importante avec un astéroïde de la taille d'une planète changea la direction de la Terre. L'impact mélangea les couches externes des deux planètes ce qui provoqua l'agrandissement de la Terre et le reste des débris forma la Lune. Suite au chaos des premières années de vie de la planète, les collisions se firent plus rares et la Terre a pu se refroidir. C'est ainsi que le système solaire a pu s'établir.

Origines de la Lune

L'origine de la Lune est toujours incertaine, bien que de nombreux indices accréditent la thèse de la grande collision. La Terre pourrait ne pas avoir été la seule planète à s'être formée à 150 millions de kilomètres du Soleil. Une hypothèse indique qu'un autre amas se serait formé à 150 millions de kilomètres du Soleil et de la Terre, à leur quatrième ou cinquième point de Lagrange. Cette planète, nommée Théia, aurait été plus petite que la Terre actuelle, probablement à peu près de la taille et de la masse de Mars. Son orbite aurait pu être stable dans un premier temps, mais s'être déstabilisé au fur et à mesure que la Terre augmentait sa masse par l'accumulation de matériau. Théia oscille par rapport à la Terre jusqu'à approximativement 4,533 milliards d'années, date à laquelle elle entre en collision selon un angle oblique faible. L'angle et la vitesse ne sont pas suffisants pour détruire la Terre, mais une large

portion de la croûte est éjectée. Des éléments plus lourds de Théia s'enfoncent au cœur de la Terre, pendant que les matériaux et éjections restantes se condensent en un seul corps en quelques semaines. Sous l'influence de sa propre gravité, celui-ci devient un corps plus sphérique : la Lune. À cette époque, la Lune orbite plus rapidement et à une distance 15 fois moindre qu'aujourd'hui. On avance également la théorie que l'impact aurait changé l'axe de la Terre pour produire la large inclinaison de l'axe de $23,5^\circ$ qui est responsable des saisons sur la Terre, le modèle idéal de l'origine des planètes considère qu'elles auraient des inclinaisons d'axe de 0° , donc sans saison reconnaissable. L'impact pourrait aussi avoir accéléré la rotation de la Terre en lui donnant un temps de rotation de 6 heures, et initié la tectonique des plaques de la planète.

II Histoire de la Terre

A) Périodes ou « éons »

Globalement l'histoire de la Terre est divisée en quatre intervalles de temps, dits **éons** :

1) **L'éon Hadéen.** L'histoire de la Terre primitive, entre 4,57 et 3,8 milliards d'années durant l'éon hadéen est très mal connue, d'où le terme de *dark ages*, « âge des ténèbres » pour caractériser cette période. La jeune Terre, durant l'hadéen, était très différente du monde tel que nous le connaissons aujourd'hui. Il n'y avait pas d'océan et pas d'oxygène dans l'atmosphère. Elle était bombardée par des planétoïdes et des matériaux issus de la formation du système solaire. Ce bombardement, combiné à la chaleur des transformations radioactives, à la chaleur résiduelle et à celle due à la pression de contraction, place les roches de la planète entière en état de fusion jusqu'à 1 000 km de profondeur. Les éléments les plus lourds s'enfoncent au centre pendant que les plus légers montent à la surface, formant par différenciation les différentes enveloppes de la Terre (voir « structure interne de la Terre ») et produisant ainsi de la chaleur supplémentaire. Cela conduit à l'hypothèse que le modèle de l'océan magmatique lunaire puisse être transposé à la formation initiale de la terre dont la surface n'est alors qu'un océan de magma généralisé d'environ $2\ 000\ ^\circ\text{C}$. L'atmosphère de la Terre à ses débuts aurait été composée de matériaux environnants de la nébuleuse solaire, particulièrement des gaz légers tels que l'hydrogène et l'hélium, mais le vent solaire et la chaleur de la Terre auraient dispersé cette atmosphère. Une nouvelle atmosphère terrestre est créée à partir du dégazage du magma. Ces gaz provenant des roches terrestres en fusion étaient principalement de l'azote, du dioxyde de carbone, de l'ammoniac, du méthane, de la vapeur d'eau et de plus petites quantités d'autres gaz. La terre se refroidit et la croûte terrestre se forme autour de germes à la surface. Des zones entrent à nouveau en fusion à l'occasion de larges impacts, qui interviennent à des intervalles de quelques dizaines ou centaines d'années, et seraient à l'origine de différenciations partielles. Le noyau se serait formé en premier il y a moins de 15 Ma tandis que la croûte terrestre semble être apparue il y a 3,8 à 4 milliards d'années, au début de l'archéen. Une écume de feldspath pouvait se former et constituer une croûte terrestre primitive de gabbros et d'anorthosites mais elle devait être constamment recyclée dans la matière fondue. De 4 à 3,8 milliards d'années avant notre ère, la Terre connaît une période de grand bombardement tardif, comme la Lune et les autres corps du système solaire. Cette phase est probablement due au réarrangement du système solaire externe. La planète continue à se refroidir, et les pluies auraient conduit à la formation des océans il y a 4,2 milliards d'années. L'hypothèse d'un océan de magma occupant une fraction non négligeable de la Terre pendant l'hadéen est cependant remise en cause par les études de géochimie (datation par samarium neodymium, isotopes de l'hafnium dans les zircons) qui suggèrent qu'une croûte terrestre figée basaltique (constituée de basaltes et de komatiites) ou granitique est bien antérieure aux roches terrestres les plus anciennes. Grâce à l'amélioration de précision du spectromètre de masse, les dernières études, encore controversées, semblent indiquer que cette croûte primitive se serait formée vers - 4,45 Ga et aurait subsister quelques centaines de millions d'années avant d'être « remélangée » dans le manteau. La formation de la Terre par accrétion était presque terminée en moins de 20 millions d'années. Initialement en fusion, la couche externe de la Terre s'est refroidie pour former une croûte solide lorsque l'eau commença à s'accumuler dans l'atmosphère, aboutissant aux premières pluies et aux premiers

océans. La Lune s'est formée peu de temps après il y a 4,53 milliards d'années. Le consensus actuel pour la formation de la Lune est l'hypothèse de l'impact géant, lorsqu'un objet de la taille de Mars (quelquefois appelé Théia) avec environ 10 % de la masse terrestre entra en collision avec la Terre. Dans ce modèle, une partie de cet objet se serait agglomérée avec la Terre, tandis qu'une autre partie, mêlée avec peut-être 10 % de la masse totale de la Terre, aurait été éjectée dans l'espace, où elle aurait formé la Lune. L'activité volcanique a produit une atmosphère primitive. De la vapeur d'eau condensée ayant plusieurs origines possibles, mêlée à de la glace apportée par des comètes, a produit les océans. Une combinaison de gaz à effet de serre et d'importants niveaux d'activité solaire permirent d'augmenter la température à la surface de la Terre et empêchèrent les océans de geler. Vers 3,5 milliards d'années, le champ magnétique se forma et il permit d'éviter à l'atmosphère d'être balayée par le vent solaire. Deux principaux modèles ont été proposés pour expliquer la vitesse de croissance continentale : une croissance constante jusqu'à nos jours et une croissance rapide au début de l'histoire de la Terre. Les recherches actuelles montrent que la deuxième hypothèse est la plus probable avec une formation rapide de la croûte continentale suivie par de faibles variations de la surface globale des continents. Sur une échelle de temps de plusieurs centaines de millions d'années, les continents ou supercontinents se forment puis se divisent. C'est ainsi qu'il y a environ 750 millions d'années, le plus vieux des supercontinents connus, Rodinia, commença à se disloquer. Les continents entre lesquels il s'était divisé se recombinaient plus tard pour former Pannotia, il y a 650-540 millions d'années, puis finalement Pangée, au Permien, qui se fragmenta il y a 180 millions d'années.

2) L'éon Archéen est l'éon qui marque l'apparition de la vie. On estime qu'il a débuté il y a 3,8 milliards d'années. L'**Archéen** est un éon de l'échelle des temps géologiques, subdivisé en quatre ères. Il suit l'Hadéen et précède le Protérozoïque, tous trois étant regroupés sous le vocable de Précambrien (les 86 premiers pourcents de l'existence de la Terre). Son origine est traditionnellement placée à -3800 millions d'années, bien que cette borne inférieure n'ait pas été officialisée par la Commission internationale de stratigraphie. L'Archéen commence en fait avec l'apparition certaine de la vie sur Terre : ce point de départ étant imprécis et faisant l'objet de nombreuses recherches par les spécialistes des origines de la vie, le début de l'Archéen restera sans doute une convention encore quelque temps. Le mot vient du grec ancien "Ἀρχή" (Arkhē), signifiant "commencement, origine". Les bornes des ères de l'Archéen, à l'exception de sa base, sont définis non pas par des stratotypes mais par des bornes chronologiques absolues. L'Archéen se décompose en quatre ères :

- l'Éoarchéen (de -3800 à -3600 Ma) : apparition supposée des procaryotes;
- le Paléoarchéen (de -3600 à -3200 Ma) : la plus ancienne forme de vie connue (bactérie de 3 460 Ma d'âge) remonte à cette ère;
- le Mésoarchéen (de -3200 à -2800 Ma) : existence avérée de stromatolithes;
- le Néoarchéen (de -2800 à -2500 Ma). Bien que quelques fragments de roche plus anciens soient connus (datés de l'Hadéen), les premières formations rocheuses datent de cette époque. Ces formations se rencontrent au Groenland, dans le Bouclier canadien, au nord-ouest de l'Australie et au sud de l'Afrique.

Au début de l'Archéen, l'énergie thermique délivrée par le Soleil était de 25 à 30 % moins importante (qu'à notre époque), mais le flux d'UV était probablement filtré par une couche d'ozone et de nuages moins dense (les aérosols issus des plantes et algues faisant défaut). Une étude sur un gisement de fer rubané montre que l'atmosphère terrestre contenait beaucoup plus de gaz à effet de serre qu'aujourd'hui (mais à une concentration en CO₂ 3 fois supérieure) et que la quasi-absence de terres émergées (à l'albédo plus élevé) rendaient les conditions environnementales favorables à l'apparition de la vie, c'est-à-dire supérieures à la température de congélation de l'eau. De plus, le flux thermique issu de la Terre elle-même est supposé avoir été, à cette époque, au moins le triple de la valeur actuelle; et fut sans doute encore le double au début du Protérozoïque. La chaleur excédentaire a pu provenir du reste de la chaleur dégagée lors de l'accrétion de la Terre, (donc aussi) de la chaleur produite par la formation du noyau ferreux, et bien sûr, celle produite par la désintégration radioactive des différents isotopes radioactifs, comme l'uranium 238, l'uranium 235, le thorium 232, le potassium 40; alors présents en plus grandes quantités

qu'actuellement (voire plusieurs fois plus abondants pour les isotopes uranium 235 et potassium 40). Les roches de cet éon sont des roches métamorphiques ou des roches magmatiques, la majorité de ces dernières sont des roches plutoniques. L'activité volcanique était nettement plus importante que de nos jours, avec de nombreux points chauds, rifts et des éruptions de laves inhabituelles telles que de la komatiite. Les roches plutoniques, des strates et de masses volumineuses, de granites, de diorites, des intrusions de roche ultramafique dans des roches mafiques, des anorthosites et des monzonites prédominent dans les cratons cristallins, rémanents de la croûte archéenne, qui existent encore de nos jours. Le modèle de tectonique des plaques de l'Archéen ne fait pas consensus chez les géophysiciens, un modèle propose une tectonique substantiellement différente de celle de nos jours, avec des plaques plus petites et plus nombreuses et une croûte océanique recyclée plus rapidement, il n'existe pas de grands continents, les petits proto-continent sont probablement la norme. Ces continents felsiques se forment au niveau des points chauds plutôt qu'au niveau des zones de subductions à partir d'une variété de source : différenciation de roches mafiques qui produisent des roches felsiques, magma mafique qui force la fusion de roche felsique et provoque la granitisation de roches intermédiaires, fonte partielle de roche mafique et métamorphisme de sédiments felsique rocheux. Ces fragments de continents ont pu disparaître si leur densité était trop élevée pour éviter leurs destructions dans les zones de subductions ou leur délamination. Une autre explication pour l'absence de roches de plus de 3,8 milliards d'années est donnée par la collision de la Terre d'un grand nombre de météorites ou de comètes entre 4,1 et 3,8 milliards d'années durant le grand bombardement tardif. Des impacteurs suffisamment volumineux ont pu faire disparaître toute trace de roches antérieures.

Paléoclimat

L'atmosphère de l'Archéen ne contient apparemment pas ou très peu d'oxygène libre. Sa température est supérieure à celle d'aujourd'hui, bien que le Soleil soit de 25 à 30 % moins lumineux que de nos jours, la différence est compensée par la présence de gaz à effet de serre, ou, alternativement, par l'absence de nuages réfléchissants et un albédo de surface plus bas. La pression est de quelques atmosphères et moyennement réductrice : (CO₂; N₂). Des modèles plus anciens considéraient une atmosphère fortement réductrice comme probable : (CH₄; NH₃). La température dans la majorité des modèles est de 40 °C à 85 °C, bien qu'une atmosphère plus tempérée soit possible. L'eau sous forme liquide est présente, les océans ont probablement fini de se former durant l'Hadéen.

Paléoécologie

Une vie anaérobie est présente et évolue durant tout l'archéen (« expansion archéenne »). Elle était réduite à des formes unicellulaires procaryotes. Des formations rocheuses identifiées comme des fossiles de stromatolithes ont été retrouvés vers -3.4 Ga... Les traces biologiques trouvées dans ces structures semblent indiquer une origine cyanobactérienne, comme c'est encore le cas aujourd'hui. On a aussi trouvé des traces de la présence d'archées. Cette période se termine avec le Protérozoïque qui verra apparaître de très nombreuses nouvelles espèces, dans une atmosphère plus riche en oxygène.



Stromatolithes de Pilbara craton - Australie Occidentale. – Muséum de Toulouse

La vie de cette époque a laissé peu de traces (organismes unicellulaires), mais leur empreinte ADN persiste chez les organismes actuels : des généticiens du Massachusetts Institute of Technology publient dans *Nature* leur étude sur le génome de 100 espèces et leurs 4 000 gènes par un modèle mathématique de macroévolution. L'expansion archéenne voit apparaître 27 % des gènes actuels, notamment ceux codant pour les protéines de la voie du transport membranaire des électrons, protéines impliquées dans la photosynthèse et aboutissant à la Grande Oxydation à la fin de l'Archéen.

3) L'éon Protérozoïque est l'éon lié à l'apparition des premières plantes à photosynthèse. Son début remonte à 2,5 milliards d'années. La photosynthèse a eu un impact considérable sur la géologie, car elle a provoqué une crise appelée grande oxydation pendant laquelle les océans se sont chargés en oxygène après avoir été vidés de leur fer, et avant que l'oxygène ne soit émis aussi en grande quantité dans l'atmosphère. Sur l'échelle des temps géologiques, le **Protérozoïque** (du grec *πρότερος*, protéro-, « de devant, d'avant » et *ζῶον*, zōon, « animal ») est le dernier éon du Précambrien. Il couvre à lui seul près de la moitié du temps d'existence de la planète Terre, entre l'Archéen et le Phanérozoïque. Divisé en 3 ères, il est marqué par plusieurs événements précis relativement bien connus des paléontologues et géologues mais dont la datation est approximative. Classiquement, cet éon finit au début du Cambrien, à partir du moment où les premiers fossiles d'animaux connus sous le nom de trilobites apparaissent. Dans la seconde moitié du XX^e siècle des fossiles de trilobites ont été découverts dans des roches datant du Précambrien mais la fin du Protérozoïque est restée fixée au début du Cambrien. Il s'étend de 2 500 à 541 millions d'années. Les événements les mieux identifiés sont :

- la transition à une atmosphère oxygénée, qui se produit probablement durant le Mésoprotérozoïque, la Grande Oxydation;
- plusieurs glaciations, dont la plus sévère se produit durant le Néoprotérozoïque;
- la période de l'Édiacarien, où l'évolution d'organismes à corps mou s'accélère.

Au cours de cet éon, les noyaux continentaux, également appelés boucliers continentaux, et apparus durant l'Archéen, montrent une forte croissance. À la fin du Protérozoïque, le volume de la masse continentale se stabilise.

Contrairement aux ères qui suivent le Protérozoïque, et sauf pour la dernière période le constituant, l'Édiacarien, ses bornes sont définies non pas par des stratotypes mais par des bornes chronologiques absolues, 3 ères constituent le Protérozoïque :

Néoprotérozoïque

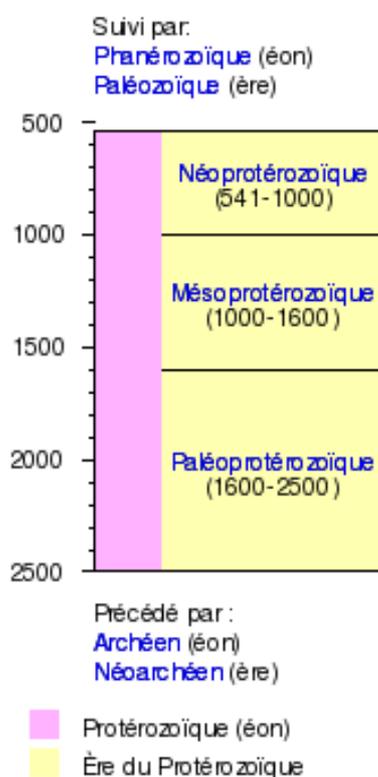
Édiacarien	(635-541 Ma)
Cryogénien	(850-635 Ma)
Tonien	(1 000-850 Ma)

Mésoprotérozoïque

Sténien	(1 200-1 000 Ma)
Ectasien	(1 400-1 200 Ma)
Calymmien	(1 600-1 400 Ma)

Paléoprotérozoïque

Stathérien	(1 800-1 600 Ma)
Orosirien	(2 050-1 800 Ma)
Rhyacien	(2 300-2 050 Ma)
Sidérien	(2 500-2 300 Ma)



Enregistrement géologique

Les enregistrements géologiques du Protérozoïque sont de bien meilleure qualité que ceux de l'Archéen. En contraste avec les dépôts en eaux profondes de l'Archéen, le Protérozoïque est caractérisé par de nombreuses strates provenant de mers épicontinentales contenant des roches moins fréquemment métamorphisées que celles de l'Archéen. L'étude de ces roches montre que cet éon est caractérisé par une accréation continentale très rapide, qui est unique dans l'histoire de la Terre, des cycles de création de supercontinent et une orogénèse déjà moderne. Les premières glaciations se produisent durant cet éon, l'une commence dès le début du Paléoprotérozoïque (glaciation huronienne). La plus sévère, la glaciation Varanger se produit quant à elle bien plus tard: au Néoprotérozoïque et notamment pendant la période du Cryogénien.

Atmosphère

L'augmentation du taux d'oxygène dans l'air est un des événements les plus importants de cet éon. Si l'apparition de la photosynthèse date probablement de l'Archéen, le taux d'oxygène dans l'atmosphère n'augmente pas de façon significative avant que les puits chimiques, océans, soufre et fer non oxydés, ne soient saturés. Il y a 2,3 milliards d'années, l'atmosphère contient environ 1 à 2 % d'oxygène, les gisements de fer rubané sont eux aussi des puits chimiques à oxygène efficaces. L'accumulation d'oxygène dans l'air montre un plateau il y a 1,9 milliard d'années, probablement dû à un meilleur mélange de l'eau dans la colonne d'eau. Les couches rouges qui sont colorées par de l'hématite indiquent une augmentation du taux d'oxygène après 2 milliards d'années, elles ne sont pas trouvées dans des terrains plus anciens. L'oxygénation de l'atmosphère est probablement due à deux facteurs : le remplissage des puits chimiques et une augmentation de l'emprisonnement des dépôts carbonés qui séquestrent des composés organiques qui auraient été sinon oxydés par l'oxygène contenu dans l'atmosphère.

Vie



Stromatolites du Paléoprotérozoïque, Bolivie, Amérique du Sud

Les premières formes avancées de vie mono- et multicellulaires coïncident approximativement avec le début de l'accumulation d'oxygène, peut-être due à la présence de nitrates oxydés, que les eucaryotes peuvent utiliser, à la différence des cyanobactéries. C'est aussi pendant le Protérozoïque que les premières relations endosymbiotiques entre les mitochondries (pour presque tous les eucaryotes), les chloroplastes (pour les plantes et certains protistes) et leurs hôtes évoluent. L'expansion des eucaryotes, tel que les acritarches n'exclut pas celle des cyanobactéries, les stromatolites atteignent leur diversité et abondance maximales il y a 1,2 milliard d'années.

Classiquement la borne du Protérozoïque et du Phanérozoïque est marquée par l'apparition des premiers trilobites et d'archéocyathidés. Dans la seconde moitié du XX^e siècle de nouvelles découvertes font reculer cette limite mais la base du Phanérozoïque n'a pas été modifiée.

4) L'éon Phanérozoïque (du grec *phaneros*, « visible », et *zôon*, « animal ») est un éon couvrant les 542 derniers millions d'années. Il débute par la période géologique du Cambrien, avec l'apparition des petits animaux à coquilles, puis a vu le développement d'une vie animale abondante jusqu'à nos jours. L'éon précédent est le Protérozoïque, qui fait partie du Précambrien, une large période de temps allant de la formation de la Terre au début du Phanérozoïque.

Évènements majeurs

La frontière entre les deux éons du Protérozoïque et du Phanérozoïque n'est pas clairement définie, les découvertes du XX^e siècle ayant repoussé la limite qui était communément admise au XIX^e siècle. La plupart des géologues et paléontologues placent la frontière à l'apparition des premiers trilobites, des certains ichnofossiles appelés *Trichophycus (Phycodes) pedum*, ou aux premières apparitions d'un groupe de petites formes de vie désarticulées. Ces trois points se situent dans la même période, à quelques millions d'années près, dans la période du Cambrien. Le Phanérozoïque voit l'émergence d'un grand nombre de formes biologiques, l'apparition des plantes sur la terre ferme, puis leur développement, l'évolution des poissons, la conquête de la terre ferme par les animaux et le développement de la faune moderne. Durant cette période, les continents se déplacent et la Pangée se sépare, donnant les six masses continentales actuelles.

Subdivisions

Le Phanérozoïque est divisé en trois ères :

- le Paléozoïque (de -542 à -251 Ma);
- le Mésozoïque (de -251 à -65,5 Ma);
- le Cénozoïque (de -65,5 Ma à nos jours).

B) Évolution de la vie

On suppose qu'une activité chimique intense dans un milieu hautement énergétique a produit une molécule capable de se reproduire, dans un système particulier, il y a environ 4 milliards d'années. On pense que la vie elle-même serait apparue entre 200 et 500 millions d'années plus tard. Le développement de la photosynthèse, active depuis bien avant 3 à 3,5 milliards d'années avant le présent, permit à la vie d'exploiter directement l'énergie du Soleil. Celle-ci produisit de l'oxygène qui s'accumula dans l'atmosphère, à partir d'environ 2,5 milliards d'années avant le présent, et forma la couche d'ozone (une forme d'oxygène [O₃]) dans la haute atmosphère, lorsque les niveaux d'oxygène dépassèrent quelques pourcents. Le regroupement de petites cellules entraîna le développement de cellules complexes appelées eucaryotes. Les premiers organismes multicellulaires formés de cellules au sein de colonies devinrent de plus en plus spécialisés. Aidées par l'absorption des dangereux rayons ultraviolets par la couche d'ozone, des colonies bactériennes pourraient avoir colonisé la surface de la Terre, dès ces époques lointaines. Les plantes et les animaux pluricellulaires ne colonisèrent la terre ferme qu'à partir de la fin du Cambrien (pour mousses, lichens et champignons) et pendant l'Ordovicien (pour les premiers végétaux vasculaires et les arthropodes), le Silurien (pour les gastéropodes ?) et le Dévonien (pour les vertébrés). Depuis les années 1960, il a été proposé une hypothèse selon laquelle une ou plusieurs séries de glaciations globales eurent lieu il y a 750 à 580 millions d'années, pendant le Néoprotérozoïque, et qui couvrirent la planète d'une couche de glace. Cette hypothèse a été nommée *Snowball Earth* (« Terre boule de neige »), et est d'un intérêt particulier parce qu'elle précède l'explosion cambrienne, quand des formes de vies multicellulaires commencèrent à proliférer. À la suite de l'explosion cambrienne, il y a environ 535 millions d'années, cinq extinctions massives se produisirent. La dernière extinction majeure date de 65 millions d'années, quand une météorite est entrée en collision avec la Terre, exterminant les dinosaures et d'autres grands reptiles, épargnant de plus petits animaux comme les mammifères, oiseaux, lézards, etc. Dans les 65 millions d'années qui se sont écoulées depuis, les mammifères se sont diversifiés, le genre humain (*Homo*) s'étant développé depuis deux millions d'années. Des changements périodiques à long terme de l'orbite de la Terre, causés par l'influence gravitationnelle des autres astres, sont probablement

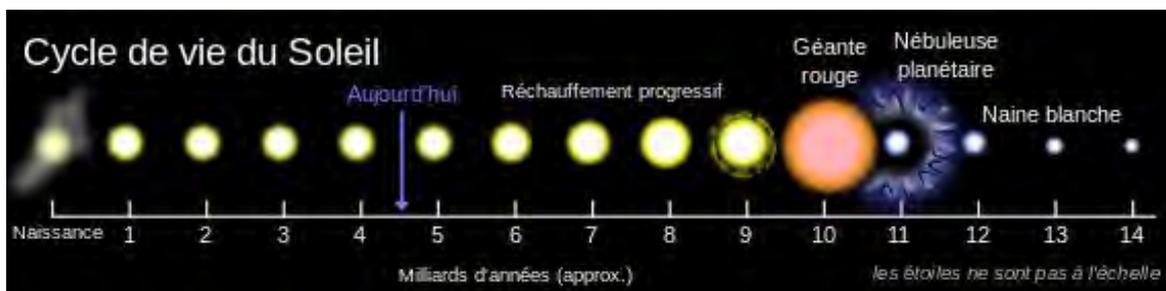
une des causes des glaciations qui ont plus que doublé les zones polaires de la planète, périodiquement dans les derniers millions d'années.

À l'issue de la dernière glaciation, le développement de l'agriculture et, ensuite, des civilisations, permet aux humains de modifier la surface de la Terre dans une courte période de temps, comme aucune autre espèce avant eux, affectant la nature tout comme les autres formes de vie.

Chronologie simple de l'évolution

- - 4 600 millions d'années : formation de la Terre
- - 4 520 millions d'années : formation de la Lune
- - 4 100 millions d'années : Grand bombardement tardif
- - 3 800 millions d'années : apparition des premières cellules
- - 3 500 millions d'années : apparition des premiers stromatolithes
- - 3 200 millions d'années : apparition des premiers acritarches
- - 3 000 millions d'années : apparition de la photosynthèse
- - 2 400 millions d'années : Grande Oxydation et début de la Glaciation huronienne
- - 2 200 millions d'années : apparition des Grypania
- - 2 100 millions d'années : apparition des algues rouges
- - 1 000 millions d'années : début de la Terre boule de neige
- - 635 millions d'années : explosion de l'Édiacarien
- - 555 millions d'années : apparition des triploblastiques
- - 542 millions d'années : extinction Édiacarien Cambrien, Explosion cambrienne
- - 500 millions d'années : apparition des chordés
- - 480 millions d'années : apparition des plantes terrestres
- - 475 millions d'années : Extinction Ordovicien-Silurien
- - 400 millions d'années : apparition des insectes, des graines et des sarcoptérygiens (poumons)
- - 370 millions d'années : Extinction du Dévonien
- - 365 millions d'années : apparition des tétrapodes
- - 360 millions d'années : début de la Glaciation de Karoo et apparition des amphibiens
- - 330 millions d'années : apparition des amniotes
- - 312 millions d'années : apparition des synapsides et des sauropsides
- - 252 millions d'années : Extinction Permien-Trias
- - 230 millions d'années : apparition des dinosaures
- - 220 millions d'années : extinction "mineure" du Trias, apparition des mammifères
- - 200 millions d'années : Extinction du Trias-Jurassique
- - 150 millions d'années : apparition des oiseaux
- - 135 millions d'années : apparition des fleurs
- - 115 millions d'années : apparition des euthériens
- - 65 millions d'années : Extinction du Crétacé
-

C) Futur



Le futur de la Terre est très lié à celui du Soleil. Du fait de l'accumulation d'hélium dans le cœur du Soleil, la luminosité de l'étoile augmente lentement à l'échelle des temps géologiques. La luminosité va croître de 10 % au cours du 1,1 milliard d'années à venir et de 40 % sur les prochains 3,5 milliards d'années. Les modèles climatiques indiquent que l'accroissement des radiations atteignant la Terre aura probablement des conséquences dramatiques sur la pérennité de son climat « terrestre », notamment la

disparition des océans. La Terre devrait cependant rester habitable durant encore plus de 500 millions d'années⁴, bien que cette durée puisse passer à 2,3 milliards d'années si l'azote est retiré de l'atmosphère. L'augmentation de la température terrestre va accélérer le cycle du carbone inorganique, réduisant sa concentration à des niveaux qui pourraient devenir trop faibles pour les plantes (10 ppm pour la photosynthèse du C₄) dans environ 500 ou 900 millions d'années. La réduction de la végétation entrainera la diminution de la quantité d'oxygène dans l'atmosphère, ce qui provoquera la disparition progressive de la plupart des formes de vies animales. Ensuite, la température moyenne (de la Terre) augmentera plus vite en raison de l'emballement de l'effet de serre par la vapeur d'eau, vers 40 à 50 °C, puis les océans s'évaporeront « rapidement »⁵ précipitant le climat de la Terre dans celui de type vénusien. Même si le Soleil était éternel et stable, le refroidissement interne de la Terre entrainerait la baisse du niveau de CO₂ du fait d'une réduction du volcanisme, et 35 % de l'eau des océans descendrait dans le manteau du fait de la baisse des échanges au niveau des dorsales océaniques.

D) Fin

Dans le cadre de son évolution, le Soleil deviendra une géante rouge dans plus de 5 milliards d'années. Les modèles prédisent qu'il gonflera jusqu'à atteindre environ 250 fois son rayon actuel. Le destin de la Terre est moins clair. En tant que géante rouge, le Soleil va perdre environ 30 % de sa masse, donc sans effets de marée, la Terre se déplacera sur une orbite à 1,7 ua (254 316 600 km) du Soleil lorsque celui-ci atteindra sa taille maximale. La planète ne devrait donc pas être engloutie par les couches externes du Soleil même si l'atmosphère restante finira par être « soufflée » dans l'espace, et la croûte terrestre finira par fondre pour se transformer en un océan de lave, lorsque la luminosité solaire atteindra environ 5 000 fois son niveau actuel. Une autre simulation de 2008 indique que l'orbite terrestre va se modifier du fait des effets de marées et poussera la Terre à entrer dans l'atmosphère du Soleil où elle sera absorbée et vaporisée.

III Composition et structure de la Terre

La Terre est une planète tellurique, c'est-à-dire une planète essentiellement rocheuse à noyau métallique, contrairement aux géantes gazeuses, telles que Jupiter, essentiellement constituées de gaz légers (hydrogène et hélium). Il s'agit de la plus grande des quatre planètes telluriques du Système solaire, que ce soit par la taille ou la masse. De ces quatre planètes, la Terre a aussi la masse volumique globale la plus élevée, la plus forte gravité de surface, le plus puissant champ magnétique global, la vitesse de rotation la plus élevée et est probablement la seule avec une tectonique des plaques active. La surface externe de la Terre est divisée en plusieurs segments rigides, ou plaques tectoniques, qui se déplacent lentement sur la surface sur des durées de plusieurs millions d'années. Environ 71 % de la surface est couverte d'océans d'eau salée, les 29 % restant étant des continents et des îles. L'eau liquide, nécessaire à la vie telle que nous la connaissons, est très abondante sur Terre, et aucune autre planète n'a encore été découverte avec des étendues d'eau liquide (lacs, mers, océans) à sa surface.

A) Forme de la Terre



Comparaison des tailles des planètes telluriques avec de gauche à droite : Mercure, Venus, la Terre et Mars

La forme de la Terre est approchée par un ellipsoïde, une sphère aplatie aux pôles. La rotation de la Terre entraîne l'apparition d'un léger bourrelet de sorte que le diamètre à l'équateur est 43 kilomètres plus long que le diamètre polaire (du pôle Nord au pôle Sud). Le diamètre moyen du sphéroïde de référence (appelé géoïde) est d'environ 12 742 kilomètres, ce qui est approximativement $40\,000 \text{ kilomètres}/\pi$, car le mètre

était initialement défini comme 1/10 000 000e (dix-millionième) de la distance de l'équateur au pôle Nord en passant par Paris. La topographie locale dévie de ce sphéroïde idéalisé même si à grande échelle, ces variations sont faibles : La Terre a une tolérance d'environ 0,17 % par rapport au sphéroïde parfait. Proportionnellement, c'est un peu moins lisse qu'une boule de billard neuve, alors qu'une boule de billard usée peut présenter des aspérités légèrement plus marquées. Les plus grandes variations dans la surface rocheuse de la Terre sont l'Everest (8 848 mètres au-dessus du niveau de la mer) et la fosse des Mariannes (10 911 mètres sous le niveau de la mer). Du fait du bourrelet équatorial, les lieux les plus éloignés du centre de la Terre sont les sommets du Chimborazo en Équateur et du Huascarán au Pérou.

B) Composition chimique

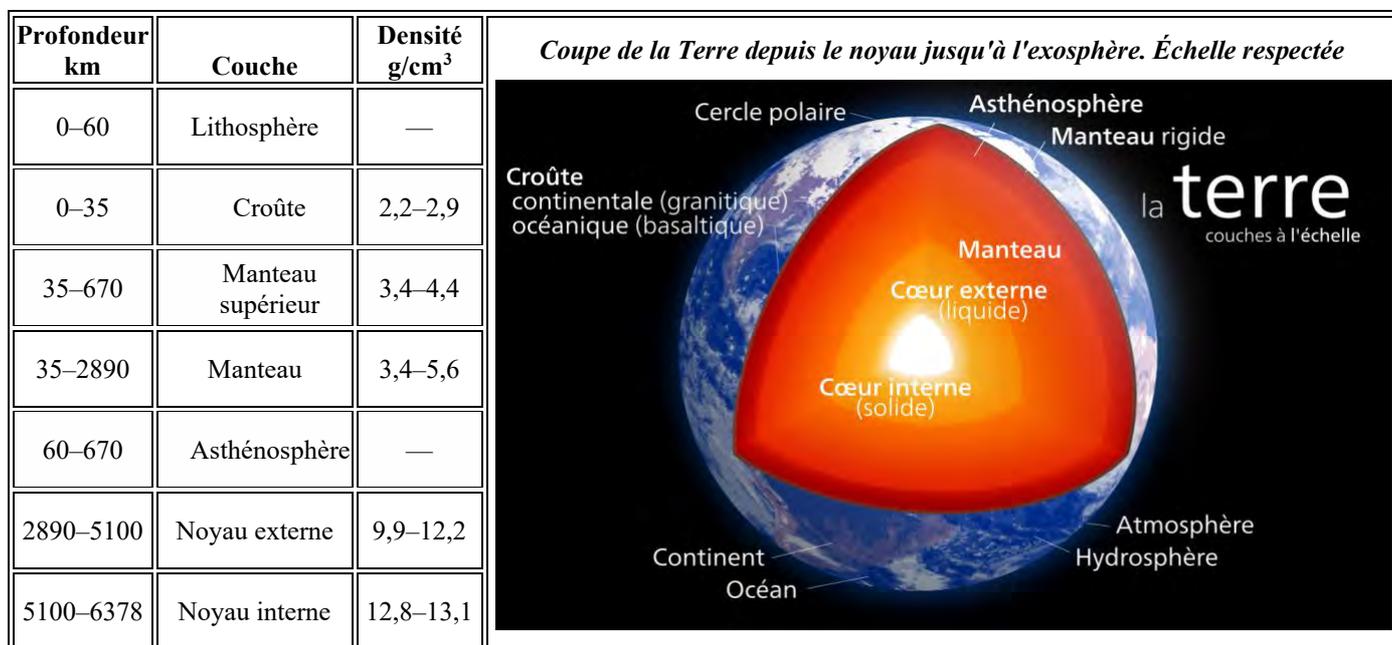
La masse de la Terre est d'approximativement $5,98 \times 10^{24}$ kg. Elle est principalement composée de fer (32,1 %), d'oxygène (30,1 %), de silicium (15,1 %), de magnésium (13,9 %), de soufre (2,9 %), de nickel (1,8 %), de calcium (1,5 %) et d'aluminium (1,4 %), le 1,2 % restant consistant en de légères traces d'autres éléments. Les éléments les plus denses ayant tendance à se concentrer au centre de la Terre (phénomène de différenciation planétaire), on pense que le cœur de la Terre est composé majoritairement de fer (88,8 %), avec une plus petite quantité de nickel (5,8 %), de soufre (4,5 %) et moins de 1 % d'autres éléments. Le géochimiste F. W. Clarke a calculé que 47 % (en poids, soit 94 % en volume) de la croûte terrestre était faite d'oxygène, présent principalement sous forme d'oxydes, dont les principaux sont les oxydes de silicium (sous forme de silicates), d'aluminium (aluminosilicates), de fer, de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium. La silice est le constituant majeur de la croûte, sous forme de pyroxénoïdes, les minéraux les plus communs des roches magmatiques et métamorphiques. Après une synthèse basée sur l'analyse de 1 672 types de roches, Clarke a obtenu les pourcentages présentés dans le tableau ci-dessous.

Composition chimique de la croûte			
Composé	Formule	Composition	
		Continentale	Océanique
Silice	SiO ₂	60,2 %	48,6 %
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	15,2 %	16,5 %
Oxyde de calcium	CaO	5,5 %	12,3 %
Oxyde de magnésium	MgO	3,1 %	6,8 %
Oxyde de fer(II)	FeO	3,8 %	6,2 %
Oxyde de sodium	Na ₂ O	3,0 %	2,6 %
Oxyde de potassium	K ₂ O	2,8 %	0,4 %
Oxyde de fer(III)	Fe ₂ O ₃	2,5 %	2,3 %
Eau	H ₂ O	1,4 %	1,1 %
Dioxyde de carbone	CO ₂	1,2 %	1,4 %
Dioxyde de titane	TiO ₂	0,7 %	1,4 %
Pentoxyde de phosphore	P ₂ O ₅	0,2 %	0,3 %
Total		99,6 %	99,9 %

C) Structure interne

L'intérieur de la Terre, comme celui des autres planètes telluriques, est stratifié, c'est-à-dire organisé en couches concentriques superposées, ayant des densités croissantes quand on s'enfonce. Ces diverses couches se distinguent par leur nature pétrologique (contrastes chimiques et minéralogiques) et leurs propriétés physiques (changements d'état physique, propriétés rhéologiques). La couche extérieure de la Terre solide, fine à très fine relativement au rayon terrestre, s'appelle la croûte; elle est solide, et chimiquement distincte du manteau, solide, sur lequel elle repose; sous l'effet combiné de la pression et de la température, avec la profondeur, le manteau passe d'un état solide fragile (cassant, sismogène,

« lithosphérique ») à un état solide ductile (plastique, « asthénosphérique », et donc caractérisé par une viscosité plus faible, quoi qu'en soit extrêmement élevée). La surface de contact entre la croûte et le manteau est appelée le Moho; il se visualise très bien par les méthodes sismiques du fait du fort contraste de vitesse des ondes sismiques, entre les deux côtés. L'épaisseur de la croûte varie de 6 kilomètres sous les océans jusqu'à plus de 50 kilomètres en moyenne sous les continents. La croûte et la partie supérieure froide et rigide du manteau supérieur sont appelées lithosphère; leur comportement horizontalement rigide à l'échelle du million à la dizaine de millions d'années est à l'origine de la tectonique des plaques. L'asthénosphère se trouve sous la lithosphère et est une couche convective, relativement moins visqueuse sur laquelle la lithosphère se déplace en « plaques minces ». Des changements importants dans la structure cristallographique des divers minéraux du manteau, qui sont des changements de phase au sens thermodynamique, vers respectivement les profondeurs de 410 kilomètres et de 670 kilomètres sous la surface, encadrent une zone dite de transition, définie initialement sur la base des premières images sismologiques. Actuellement, on appelle manteau supérieur la couche qui va du Moho à la transition de phase vers 670 kilomètres de profondeur, la transition à 410 kilomètres de profondeur étant reconnue pour ne pas avoir une importance majeure sur le processus de convection mantellique, au contraire de l'autre. Et l'on appelle donc manteau inférieur la zone comprise entre cette transition de phase à 670 kilomètres de profondeur, et la limite noyau-manteau. Sous le manteau inférieur, le noyau terrestre, composé à presque 90 % de fer métal, constitue une entité chimiquement originale de tout ce qui est au-dessus, à savoir la Terre silicatée. Ce noyau est lui-même stratifié en un noyau externe liquide et très peu visqueux (viscosité de l'ordre de celle d'une huile moteur à 20 °C), qui entoure un noyau interne solide encore appelé graine. Cette graine résulte de la cristallisation du noyau du fait du refroidissement séculaire de la Terre. Cette cristallisation, par la chaleur latente qu'elle libère, est source d'une convection du noyau externe, laquelle est la source du champ magnétique terrestre. L'absence d'un tel champ magnétique sur les autres planètes telluriques laisse penser que leurs noyaux métalliques, dont les présences sont nécessaires pour expliquer les données astronomiques de densité et de moment d'inertie, sont totalement cristallisés. Selon une interprétation encore débattue de données sismologiques, le noyau interne terrestre semblerait tourner à une vitesse angulaire légèrement supérieure à celle du reste de la planète, avançant relativement de 0,1 à 0,5° par an.



D) Chaleur

La chaleur interne de la Terre est issue d'une combinaison de l'énergie résiduelle issue de l'accrétion planétaire (environ 20 %) et de la chaleur produite par les éléments radioactifs (80 %). Les principaux isotopes producteurs de chaleur de la Terre sont le potassium 40, l'uranium 238, l'uranium 235 et le thorium 232. Au centre de la planète, la température pourrait atteindre 7 000 K et la pression serait de 360 GPa. Comme la plus grande partie de la chaleur est issue de la désintégration des éléments radioactifs, les scientifiques considèrent qu'au début de l'histoire de la Terre, avant que les isotopes à

courte durée de vie ne se soient désintégrés, la production de chaleur de la Terre aurait été bien plus importante. Cette production supplémentaire, deux fois plus importante qu'aujourd'hui il y a 3 milliards d'années aurait accru les gradients de températures dans la Terre et donc le rythme de la convection mantellique et de la tectonique des plaques, ce qui aurait permis la formation de roches ignées comme les komatiites qui ne sont plus formées aujourd'hui.

Principaux isotopes producteurs de chaleur actuels				
Isotope	Libération de chaleur W/kg isotope	Demi-vie années	Concentration moyenne dans le manteau kg isotope/kg manteau	Libération de chaleur W/kg manteau
^{238}U	$9,46 \times 10^{-5}$	$4,47 \times 10^9$	$30,8 \times 10^{-9}$	$2,91 \times 10^{-12}$
^{235}U	$5,69 \times 10^{-4}$	$7,04 \times 10^8$	$0,22 \times 10^{-9}$	$1,25 \times 10^{-13}$
^{232}Th	$2,64 \times 10^{-5}$	$1,40 \times 10^{10}$	124×10^{-9}	$3,27 \times 10^{-12}$
^{40}K	$2,92 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^9$	$36,9 \times 10^{-9}$	$1,08 \times 10^{-12}$

La perte moyenne de chaleur par la Terre est de 87 mW/m^2 pour une perte globale de $4,42 \times 10^{13} \text{ W}$. Une portion de l'énergie thermique du noyau est transportée vers la croûte par des panaches; une forme de convection où des roches semi-fondues remontent vers la croûte. Ces panaches peuvent produire des points chauds et des trapps. La plus grande partie de la chaleur de la Terre est perdue à travers la tectonique des plaques au niveau des dorsales océaniques. La dernière source importante de perte de chaleur est la conduction à travers la lithosphère, la plus grande partie ayant lieu dans les océans car la croûte y est plus mince que celle des continents.

E) Plaques tectoniques et dérive des continents

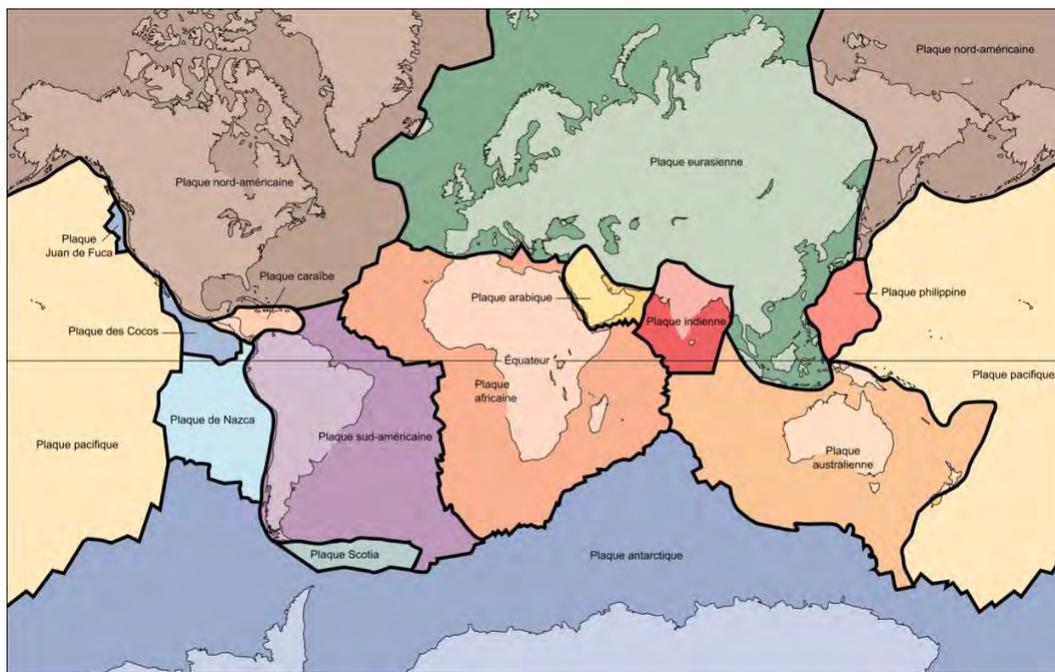
1) La tectonique des plaques et la dérive des continents

La tectonique des plaques (qui complète la théorie appelée *dérive des continents*) est un modèle actuel du fonctionnement interne de la Terre. Elle est l'expression en surface de la convection qui se déroule dans le manteau terrestre. La lithosphère, couche externe de la Terre, est découpée en plaques rigides qui flottent et se déplacent sur l'asthénosphère, plus ductile. Les premiers concepts, entrevus dès le XVI^e siècle, ont été formulés en 1912 par le climatologue allemand Alfred Wegener à partir de considérations cartographiques, structurales, paléontologiques et paléoclimatiques.

Dès 1596, dans son ouvrage *Thesaurus geographicus*, Abraham Ortelius remarque la ressemblance du tracé des côtes américaines et africaines. Il émet l'hypothèse que ces continents ont autrefois été réunis, et qu'ils ont été séparés à la suite de catastrophes : inondations et séismes. Dans la *Corruption du grand et petit Monde* (1668) le père François Placet affirme que la séparation de l'Amérique du reste des continents s'est produite pendant le déluge universel. Au début du XX^e siècle, l'Allemand Alfred Wegener remarque que par la disposition des continents, la côte est de l'Amérique du Sud semble s'emboîter parfaitement dans la côte ouest de l'Afrique. D'autres bien avant lui s'en sont aperçus, mais sans proposer, à partir de cette observation, une théorie de la dérive des continents : un supercontinent, la Pangée, se serait fragmenté au début de l'ère secondaire et, depuis cette ère, les masses continentales issues de cette fragmentation dériveraient à la surface de la Terre. Il publie un ouvrage en 1915 : *Genèse des océans et des continents : théories des translations continentales*. Pour Alfred Wegener, les masses continentales se déplacent au cours des ères géologiques. Au Permien (280 millions d'années), les continents actuels formaient un seul supercontinent : la Pangée (Pangaea : Terre unique en Grec). Ce continent s'est par la suite disloqué tout d'abord pour l'ouverture de l'Atlantique Nord, ainsi que par la séparation de l'Antarctique, puis ils ont continué à se fracturer pour donner naissance aux continents actuels, qui, tels des radeaux, se seraient déplacés au cours des ères géologiques pour aboutir à la configuration actuelle. Il s'appuie sur de nombreuses preuves morphologiques : emboîtement des formes des continents, comme la corne sud-est du Brésil et le fond du golfe de Guinée, stratigraphiques (continuité stratigraphique entre l'Afrique et l'Amérique du Sud qui se traduit par l'existence des cratons faits de tonalites ou boucliers qui

datent du Primaire), paléoclimatiques (existence de galets striés datant du primaire en Afrique du Sud et en Amérique du Sud, ce qui témoigne que les deux continents ont subi les mêmes influences glaciaires au Primaire) et paléontologiques (même faune et flore du primaire au rang desquelles les mésosaures, les cygnonatus et les glossoptéris, sorte de fougère du primaire).

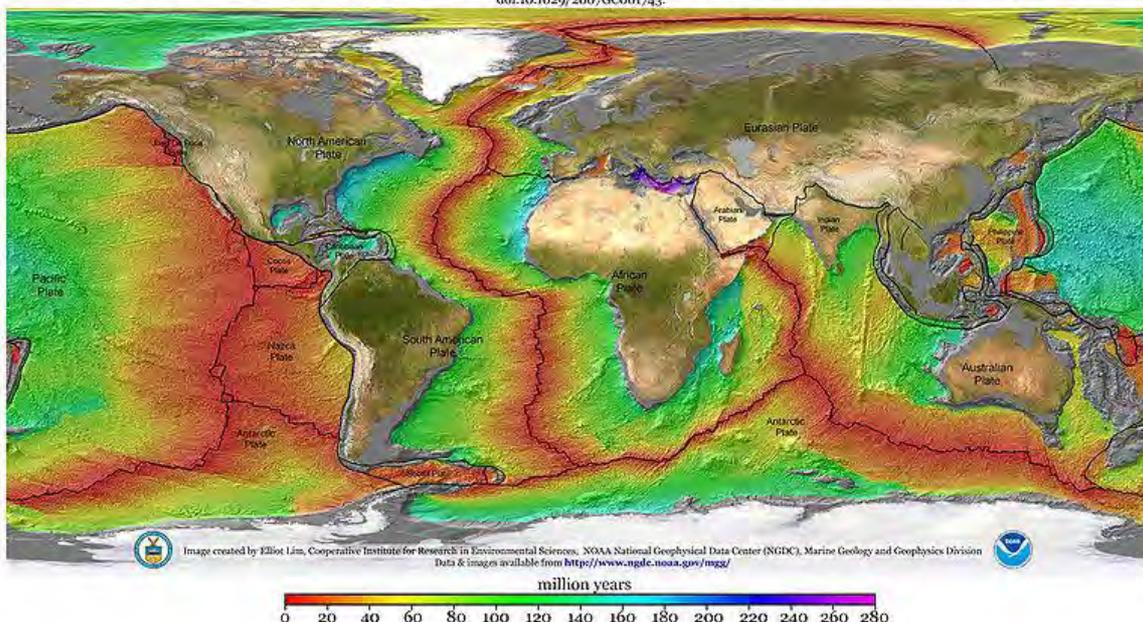
Alfred Wegener pensait que la croûte continentale seule se déplaçait, en glissant directement « dans » ou « à la surface de » la croûte océanique. Mais, dans cette vision théorique, la dérive se caractérise par la formation de trou béant. Alfred Wegener proposait comme explication le brochage des continents sur le fond des océans pour expliquer la dérive. Cette intuition, pourtant étayée par des faits convaincants, a longtemps été rejetée par des géologues. Les mécanismes et la morphologie interne de la Terre étaient encore inconnus pour une interprétation plausible de la dérive. La théorie de Alfred Wegener a soulevé de vifs débats. Parmi les opposants, on peut citer Ludwig Diels ou Du Rietz, et parmi ses partisans, René Jeannel.



Carte des plaques tectoniques

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)

Data source:
Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006. doi:10.1029/2007GC001743.



Âges du plancher océanique, les rouges sont les plus jeunes

2) La convection dans le manteau

C'est seulement dans la deuxième moitié du XX^e siècle que la communauté scientifique, convaincue par la présentation de nouvelles preuves, accepte finalement le modèle de tectonique des plaques. Jean Goguel publie en 1942 son *Introduction à l'étude mécanique des déformations de la roche terrestre*; en 1952, il publie son *Traité de tectonique*. L'hypothèse des *mouvements de convection* dans le manteau, émise par Arthur Holmes en 1945, propose un moteur plausible à ces déplacements de continents. Mais c'est la compréhension du fonctionnement des fonds océaniques, avec l'hypothèse du *double tapis roulant* formulée par Harry Hess en 1962, qui marque une véritable révolution des sciences de la Terre.

Cette théorie s'appuie sur l'idée que l'expansion des fonds océaniques est réalisée par apport de matériaux profonds au niveau des dorsales; les fonds océaniques divergeant de part et d'autre de ces dorsales comme un double tapis roulant, pour se résorber au niveau des fosses qui longent certains bassins océaniques. Cette nouvelle vision affine le concept primitif de « dérive des continents » : ce ne sont pas les continents (formés de croûte continentale) qui dérivent à travers les océans, mais des plaques complexes généralement formées à la fois de croûte continentale et de croûte océanique, qui sont affectées de mouvements tectoniques dans leur ensemble. Dans cette nouvelle optique, la « dérive des continents » n'est qu'un phénomène apparent, entraîné par le phénomène physique qu'est la « tectonique des plaques ».

3) Le complément au modèle du double tapis roulant

Le modèle du *double tapis roulant* comme moteur de la tectonique des plaques est remis en question à partir des années 1990. À partir de 1967, les expéditions Haroun Tazieff en Afar (Éthiopie) apportent la démonstration de l'origine océanique des systèmes volcaniques axiaux actifs de la région. Initié dans les années 1940 aux travaux de Alfred Wegener par son professeur le tectonicien belge Paul Michot, Haroun Tazieff cherchait depuis 1948-49, après sa découverte du volcanisme dans la branche sud-occidentale du grand rift africain dans le Kivu, à en explorer la partie septentrionale, qu'il ne put explorer qu'en 1967, après plusieurs tentatives avortées. Les travaux de recherche décrivant les mécanismes d'expansion en Afar se sont poursuivis de 1967 à 1976, donnant lieu à une multitude de publications. Franco Barberi et Jacques Varet, prenant le relais d'Haroun Tazieff et de Giorgio Marinelli, se sont vu décerner le *prix L.R. Wager* par la Royal Society et l'Association Internationale de Volcanologie et de Chimie de l'Intérieur de la Terre (AIVCIT, 1972). Haroun Tazieff et ses équipiers ont réalisé en Afar les premières mesures directes d'écartement des lèvres d'un rift océanique. Si l'ouverture augmente de deux centimètres en moyenne par an, il s'agit en réalité d'une succession d'ouvertures brutales de segments actifs, à compter en mètres sur des espaces de temps de l'ordre de 100 ans. Les événements récents mesurés par interférométrie sur images satellites le long de la chaîne axiale de Manda Harraro sont venus confirmer ce type de phénomène en 2006. L'apport de Barberi et Varet a été de démontrer que les « chaînes volcaniques axiales » de l'Afar étaient de type « océanique » (au plan tectonique et magmatique) et assuraient le relais entre les vallées axiales de la mer Rouge et celles du golfe d'Aden. De sorte que la frontière des plaques entre l'Afrique et l'Arabie ne passe pas « en mer » par le détroit de Bab-el-Mandeb, mais à terre à travers l'Afar. La nature de la tectonique et du volcanisme de l'Afar se distingue ainsi de celle du rift africain, qui reste un « rift continental » n'ayant pas donné lieu à la génération de croûte océanique nouvelle.

Alors que les plus anciennes traces de tectonique des plaques dataient de 2,5 milliards d'années, une équipe internationale de chercheurs en géosciences en 2007 fait remonter cette tectonique à 3,8 milliards d'années au début de l'archéen. L'analyse d'inclusions dans les diamants de la ceinture de roches vertes d'Isua (en) a révélé la présence d'éclogite caractéristique de la subduction d'une plaque océanique. Un modèle numérique de tectonique des plaques en deux dimensions suggère que vers 4 milliards d'années commencent à se former les plaques tectoniques et que la tectonique s'est généralisée 1 milliard d'années plus tard : les mouvements descendants de l'asthénosphère étirent les roches de la partie mantellique de la lithosphère et déforment la taille des grains de la péridotite composant cette partie, ce qui la fragilise sur une période d'environ 10 millions d'années. La convection mantellique se déplaçant au cours du temps, les zones fragilisées qui ne sont plus soumises à la déformation voient leurs minéraux grossir, ce qui « cicatrise » la lithosphère sur une période d'un milliard d'années.

4) L'identification des principales plaques tectoniques

La théorie synthétique de la tectonique des plaques est énoncée en 1967 par l'Américain William Jason Morgan, le Britannique Dan McKenzie et le Français Xavier Le Pichon. Lors de l'exposé de sa théorie de la tectonique des plaques (1968), Le Pichon distingue 6 plaques lithosphériques principales :

- plaque africaine
- plaque nord-américaine (dont on distingue à présent la plaque caraïbe)
- plaque sud-américaine (dont on distingue à présent la plaque de Cocos et la plaque Juan de Fuca)
- plaque eurasiatique (dont on distingue à présent la plaque arabe et la plaque indo-australienne, à présent décomposée en plaque indienne et plaque australienne)
- plaque sud-pacifique (essentiellement la plaque de Nazca et la plaque antarctique)
- plaque nord-pacifique (Plaque pacifique et Plaque philippine)

En tout 14 plaques principales sont comptées en 2013. De plus, des études ultérieures plus détaillées ont conduit à distinguer un certain nombre de plaques secondaires, de moindre importance.

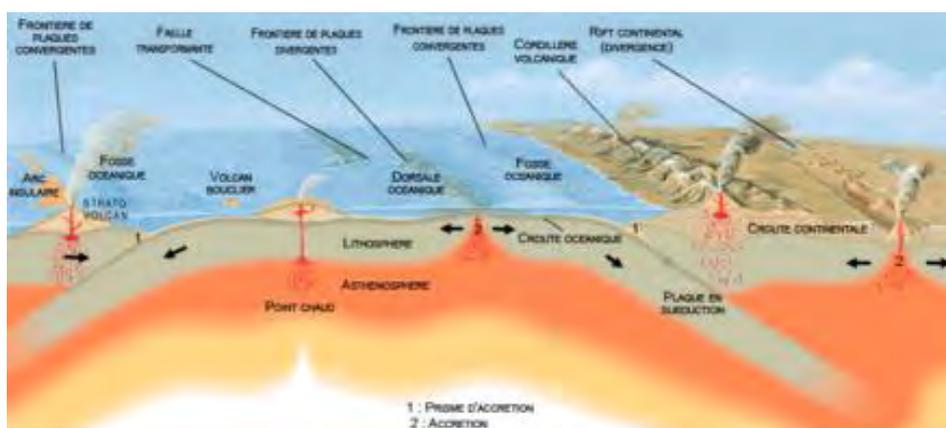
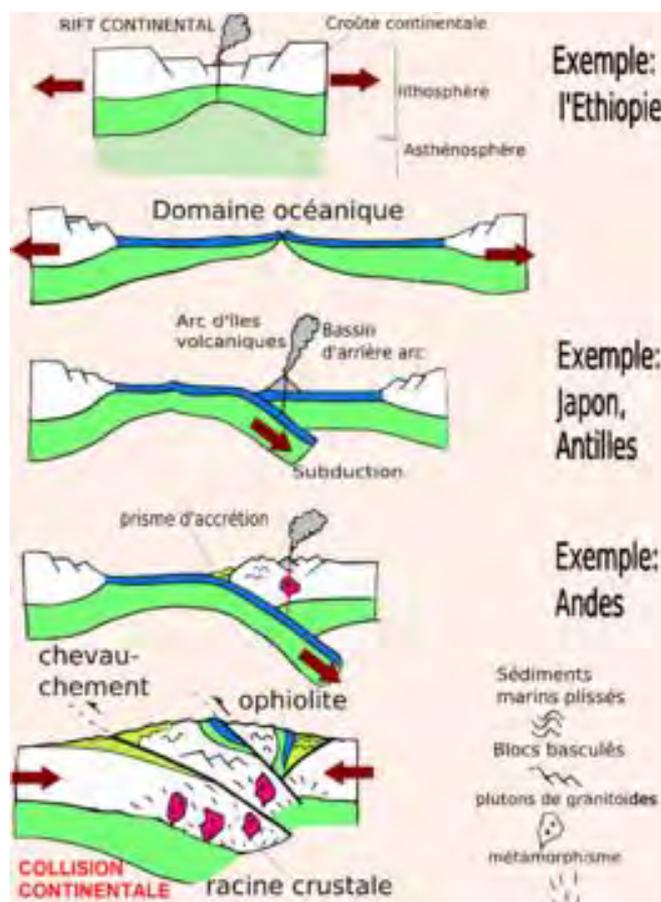


Schéma général des différents types de volcanisme associés aux mouvements des plaques tectoniques



Modèle de tectonique des plaques

On admet à présent que les plaques tectoniques sont portées par les mouvements du manteau asthénosphérique sous-jacent, et subissent des interactions dont les trois types principaux sont la divergence, la convergence, et le coulissage. À ces trois types d'interaction sont associées les trois grandes familles de failles :

- une faille normale est divergente (extensive);
- une faille inverse est convergente (compressive);
- un décrochement est transcurrent (les axes d'extension et de compression sont dans le plan horizontal).

5) Les zones de divergence

Une zone de « divergence » apparaissant dans une croûte continentale conduit transitoirement à la formation d'un rift. Un rift actif en zone continentale ne peut pas être une situation prolongée, parce que l'éloignement des deux bords de croûte continentale crée un vide qui sera comblé par de la croûte océanique, créant à terme un nouvel océan. L'exemple le plus célèbre de divergence continentale est la Vallée du grand rift en Afrique, qui est en train de séparer la plaque africaine de la plaque somalienne, qui se prolonge par le rift de la mer rouge, déjà en grande partie submergé, qui sépare la plaque africaine de la plaque arabique. Quand les croûtes continentales se sont suffisamment séparées, la zone de divergence se retrouve en milieu océanique, et sépare deux surfaces constituées de croûte océanique. Une telle zone de divergence océanique éloigne deux plaques l'une de l'autre, couplé à une remontée du manteau entre elles, permettant la formation continue de croûte océanique. Leur frontière divergente correspond à une ride océanique ou dorsale, lieu de création de lithosphère océanique et théâtre de volcanisme intense. En dehors de leurs bordures, les plaques sont rigides, de géométrie fixe : s'il y a des zones de divergence créant de la surface terrestre, il y a nécessairement aussi des zones de convergence où la surface terrestre peut disparaître. Les zones de divergence sont donc nécessairement accompagnées de zones de convergence.

6) La morphologie des dorsales océaniques

Une dorsale est toujours formée de segments de divergence, séparés par des failles transformantes parallèles au mouvement relatif des deux plaques. Cette disposition vient de ce que la zone de divergence initiale dans la croûte continentale était formée de plusieurs tronçons fragiles, mais pas nécessairement alignés. Quand les plaques s'écartent l'une de l'autre, ce sont les tronçons les plus fragiles qui cèdent de manière divergente, en faisant jouer celles de leurs lignes de faille qui sont sensiblement perpendiculaires au déplacement. Cet écartement (qui forme le rift initial) amincit la croûte, et la fragilise préférentiellement au niveau des failles ayant le plus joué. Quand le rift se transforme en océan, ce mécanisme conduit à reporter tout le déplacement d'extension sur une faille de divergence unique, qui forme en fin de comptes la ride océanique.

Cependant, dans la formation initiale du rift, le réseau des failles d'extension n'est pas nécessairement continu. Entre deux failles d'extension actives, le déplacement différentiel des plaques induit alors des contraintes de cisaillement : ces contraintes se résolvent par la formation ou l'accentuation de failles (d'abord failles transcurrentes, se transformant ensuite en failles transformantes), qui jouent préférentiellement parallèlement au déplacement des plaques. Quand le rift se transforme en océan, ces failles transformantes restent en permanence actives, mais uniquement entre chaque extrémité successive des tronçons de ride océanique, où elles assurent le glissement nécessaire à l'écartement des plaques. Au-delà de ces rides, les failles transformantes se manifestent encore par leur trace fossile, à travers la discordance qui met en contact des éléments de croûte d'âge différents, mais ne sont plus actives : les deux bords appartiennent alors à la même plaque, et se déplacent en bloc.

Il convient de noter que dans le cas des dorsales océaniques, le décalage observé entre les tronçons de dorsales n'est pas un décalage de structure fixe consécutif au jeu de la faille transformante. C'est au contraire la faille transformante qui est formée par le glissement nécessaire d'un tronçon à l'autre, parce que le décalage entre ces deux tronçons actifs entraîne une discontinuité dans le lieu de création de croûte océanique. De ce fait, si par exemple un tronçon de dorsale est décalé sur la gauche par la discontinuité d'une faille transformante, le glissement correspondant est celui d'une faille transformante dextre (et non sénestre) : la croûte océanique est créée à gauche, et le « tapis roulant » la déporte ensuite sur la droite. Dans la dorsale océanique, les failles transformantes dessinent des arcs de cercle, parce que l'écartement

de deux plaques à la limite de deux calottes sphériques conduit à des vitesses de glissement différentes d'une faille transformante à l'autre : la courbure des failles transformantes reflète et compense la différence des vitesses de glissement.

7) Les zones de convergence

Les zones de convergence sont la principale source d'orogénèse. La formation de montagnes continentales à partir de zones de convergences est un mécanisme à quatre temps. Une zone de *convergence* impliquant deux croûtes océaniques conduit l'une à plonger sous l'autre, dans un mouvement de subduction. La plaque inférieure s'enfonce dans une fosse océanique, et sur la bordure de la plaque supérieure se forme un arc volcanique. C'est la situation de la fosse des Mariannes, ou des Îles Kouriles. Dans ce type de convergence, la plaque inférieure se raccourcit, et la plaque supérieure reste stable. Si la croûte océanique de la plaque inférieure se prolonge par une croûte continentale, l'entrée de cette dernière dans la fosse océanique conduira transitoirement à une situation d'obduction : la croûte océanique supérieure passe au-dessus de la croûte continentale inférieure. Cette situation est transitoire, parce que la croûte continentale, moins dense, ne peut pas s'enfoncer et bloque le mouvement de convergence. Si la convergence se poursuit, c'est la croûte continentale (moins dense, $d = 2,7$), éventuellement chevauchée par des roches d'origine océanique, qui prendra le dessus, et la croûte océanique (la plus dense, $d = 3,2$) plongera à son tour dans un mouvement de subduction inversé, conduisant à une marge continentale active, ou marge de convergence.

Une marge continentale active est une zone de convergence, qui met en contact une croûte continentale supérieure, et une croûte océanique plongeant sous celle-ci dans une fosse de subduction. La côte ouest de l'Amérique du Sud en est un exemple. La subduction d'une plaque sous une autre entraîne de nombreuses conséquences, comme un volcanisme andésitique (ou explosif ou volcan gris), de nombreux tremblements de terre et surtout la formation des plis et des failles.

Enfin, si la convergence le long d'une marge continentale active a consommé toute la croûte océanique, elle conduit à une zone de collision, là où deux croûtes continentales se confrontent. Le moteur du mécanisme de subduction se bloque. Il n'est pas assez puissant pour faire plonger l'une des plaques dans l'asthénosphère à cause de leur faible densité. Les deux plaques se soudent pour n'en former qu'une seule. C'est le cas notamment de la chaîne de l'Himalaya, à la frontière entre la plaque indienne et la plaque eurasiatique; cette rencontre s'est produite il y a 65 millions d'années à la faveur de la migration du continent indien. Les Alpes et les chaînes de l'Atlas sont des exemples de chaîne de collision. Il faut noter que pendant la collision, le matériel sédimentaire est transporté en hauteur pour former des chaînes de montagnes où les roches sont plissées et faillées. La collision conduit à la formation de masses continentales de plus en plus importantes. John Tuzo Wilson décrit que les continents grandissent par un cycle de Wilson, une série d'étapes quasi-périodiques où les plaques tectoniques de la croûte terrestre se dispersent puis s'agrègent.

8) Les zones de décrochement

Le « coulissage » ou « transcurrence » : se dit du glissement horizontal de deux plaques, l'une à côté et le long de l'autre. Il s'agit d'un déplacement latéral d'une plaque contre une autre. Le décrochement est généralement le fait de croûtes continentales. Pendant le déplacement de cette faille se produisent des séismes très violents, dus aux frottements rugueux le long de failles épaisses et peu rectilignes. La faille de San Andreas en Californie et la faille nord-anatolienne en Turquie en sont deux exemples. Comme indiqué ci-dessus, une dorsale océanique est toujours formée de segments de divergence, séparés par des failles transformantes; cependant ces failles transformantes océaniques associées aux dorsales ne produisent guère de séismes, étant très rectilignes et sur des zones de croûte océanique de faible épaisseur. Des zones de décrochement transformantes peuvent également être associées à la limite entre plaques océaniques et plaques continentales, comme pour la plaque caraïbe et la plaque Scotia.

9) Le moteur du déplacement



Carte de l'activité tectonique soulignant les limites de plaque.

La Terre possède une chaleur importante du fait de la radioactivité (désintégration du potassium, de l'uranium et du thorium) et de la chaleur d'accrétion initiale. Elle se refroidit en évacuant la chaleur à sa surface. Pour cela, on connaît trois mécanismes : conduction thermique, convection et transfert radiatif. Au niveau du manteau terrestre, la majeure partie du flux de chaleur est évacuée par la mise en mouvement des roches (convection). La convection est induite par la présence de matériel chaud (donc moins dense) *sous* du matériel moins chaud (donc plus dense). Ces mouvements sont très lents (de l'ordre de 1 à 13 cm/an) et favorisés par la lubrification par l'eau de mer et les sédiments qui réduisent les frottements entre les plaques.

Jusqu'à peu, les géologues considéraient que le couplage mécanique entre les mouvements de l'asthénosphère et de la lithosphère était le principal moteur de la tectonique des plaques. L'importance de ce couplage entre la lithosphère (rigide et cassante) et l'asthénosphère (manteau sous-jacent ductile et déformable) est remise en cause. L'origine de la force qui rend les plaques mobiles est discutée :

- Elle peut être liée sur toute la surface de la plaque à la contrainte cisailante entre la lithosphère et l'asthénosphère (liée à la convection, et à l'importance du couplage entre la lithosphère et l'asthénosphère).
- Elle peut être due au poids de la lithosphère entraînée par subduction, qui *tire* vers la zone de convergence tout le reste de la plaque (écoulement gravitaire).
- Elle peut être due à l'altitude plus élevée de la lithosphère au niveau de la dorsale (écoulement gravitaire), qui induit une poussée sur le bord de la plaque à la ride (la formation de la lithosphère *pousse* toute la plaque).

Ces possibilités ne sont pas exclusives, mais les contributions relatives dans le mouvement sont très discutées et dépendent des études, en particulier le rôle du couplage entre la lithosphère et l'asthénosphère, considéré comme majeur jusque dans les années 1990 est fortement remis en question.

10) La dérive des continents

Cycles de Wilson



La dérive des continents, à partir de la Pangée

Le schéma ci-dessus montre la dislocation de la Pangée depuis le Trias. Dans un premier temps, ce supercontinent se sépare en Laurasia et Gondwana. La Laurasia se fragmente en Amérique du Nord et Groenland d'une part et Eurasie d'autre part, tandis que du Gondwana se détache successivement la Nouvelle-Zélande, l'Inde, puis le bloc Australie-Nouvelle Guinée, avant que ce continent ne se partage entre Amérique du Sud, Afrique et Antarctique. Cette dislocation aboutit à une recomposition des continents puisque, par exemple, l'Inde fusionne à l'Eurasie, suivie par l'Afrique et la Nouvelle Guinée. Cette alternance de dislocation et de recomposition est intervenue plusieurs fois au cours des temps géologiques.

- Il y a 1,8 milliard d'années aurait existé le supercontinent Nuna, qui se serait disloqué puis recomposé.
- Il y a 1 milliard d'années, issu de cette recomposition, le supercontinent Rodinia se serait disloqué en huit continents.
- Ces continents auraient finalement fusionné pour former un supercontinent, Pannotia, lui-même à l'origine par dislocation de la Laurentia, la Baltica et du Gondwana.
- Laurentia et Baltica ont fusionné durant l'orogénèse calédonienne pour former la Laurussia, qui elle-même a fusionné avec le Protogondwana au cours de l'orogénèse hercynienne pour former la Pangée, dont l'avenir est décrit précédemment.

Cet historique général ne prend pas en compte l'intervention des différents terranes, comme l'Avalonia, issue de la Pannotia, qui a participé à la formation de la Laurussia. La chaleur de la Terre ne s'évacue pas de la même façon selon que les continents sont regroupés en un seul ou qu'ils sont dispersés comme c'est le cas aujourd'hui et selon leur position (qui influe sur leur albédo, plus claires en zone polaire par exemple). Les chaînes de montagnes terrestres ou sous-marines modifient respectivement la circulation des masses d'air humide et des courants marins. Un supercontinent forme un « bouclier thermique » qui modifie la manière dont la chaleur s'évacue. Il se disloquera nécessairement en plusieurs fragments. Cela marquera le début d'un nouveau cycle de Wilson ainsi baptisé en l'honneur de John Tuzo Wilson (1908-1993), géophysicien canadien, qui a, le premier, émis l'hypothèse de ce rassemblement périodique des continents.

Le prochain supercontinent ?

Xavier Le Pichon, Jean-Michel Gaulier et leurs collaborateurs ont modélisé le mouvement de cinq continents se déplaçant de façon aléatoire à une vitesse de 100 millimètres par an. Leurs calculs montrent qu'il faudra environ 430 millions d'années pour que, leurs déplacements convergeant, ces continents s'unissent. Dès lors, rien n'interdit de penser que cela se concrétisera. Dans une étude en 2012, la revue *Nature* envisage la fusion d'ici une centaine de millions d'années de l'Amérique et de l'Eurasie en un nouveau continent baptisé "Amasia", centré sur le pôle nord, et séparé du continent antarctique.

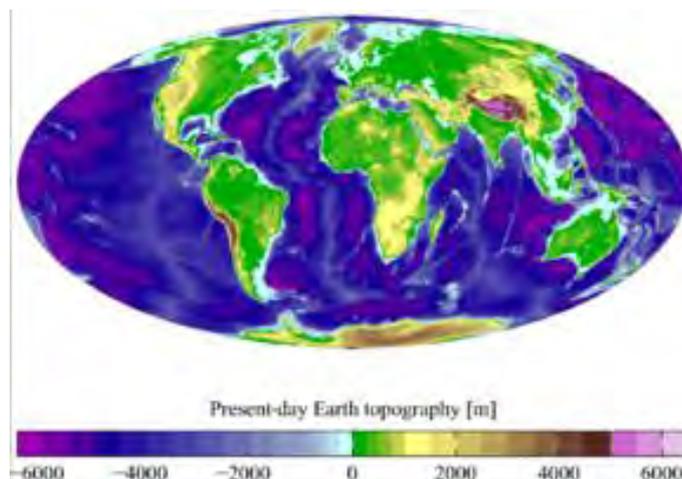
IV Géographie de la Terre

A) Surface de la Terre

Le relief de la Terre diffère énormément suivant le lieu. Environ 70,8 % de la surface du globe est recouverte par de l'eau et une grande partie du plateau continental se trouve sous le niveau de la mer. Les zones submergées ont un relief aussi varié que les autres dont une dorsale océanique faisant le tour de la Terre ainsi que des volcans sous-marins, des fosses océaniques, des canyons sous-marins, des plateaux et des plaines abyssales. Les 29,2 % non recouvertes d'eau sont composés de montagnes, de déserts, de plaines, de plateaux et d'autres géomorphologies. La surface planétaire subit de nombreuses modifications du fait de la tectonique et de l'érosion. Les éléments de surface construits ou déformés par la tectonique des plaques sont sujets à une météorisation constante du fait des précipitations, des cycles thermiques et des effets chimiques. Les glaciations, l'érosion du littoral, la construction des récifs coralliens et les impacts météoriques contribuent également aux modifications du paysage.

La lithosphère continentale est composée de matériaux de faible densité comme les roches ignées : granit et andésite. Le basalte est moins fréquent et cette roche volcanique dense est le principal constituant du plancher océanique. Les roches sédimentaires se forment par l'accumulation de sédiments qui se compactent. Environ 75 % des surfaces continentales sont recouvertes de roches sédimentaires même si

elles ne représentent que 5 % de la croûte. Le troisième type de roche rencontré sur Terre est la roche métamorphique, créée par la transformation d'autres types de roche en présence de hautes pressions, de hautes températures ou les deux. Parmi les silicates les plus abondants de la surface terrestre, on peut citer le quartz, le feldspath, l'amphibole, le mica, le pyroxène et l'olivine. Les carbonates courants sont le calcite (composant du calcaire) et la dolomite. La pédosphère est la couche la plus externe de la Terre. Elle est composée de sol et est sujette au processus de formation du sol. Elle se trouve à la rencontre de la lithosphère, de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère. Actuellement, les zones arables représentent 13,31 % de la surface terrestre et seulement 4,71 % supportent des cultures permanentes. Près de 40 % de la surface terrestre est utilisée pour l'agriculture et l'élevage soit environ $1,3 \times 10^7$ km de cultures et $3,4 \times 10^7$ km de pâturage. L'altitude de la surface terrestre de la Terre varie de -418 mètres dans la Mer morte à 8 848 mètres au sommet de l'Everest. L'altitude moyenne des terres émergées est de 840 mètres au-dessus du niveau de la mer.



Relevé altimétrique et bathymétrique de la Terre.

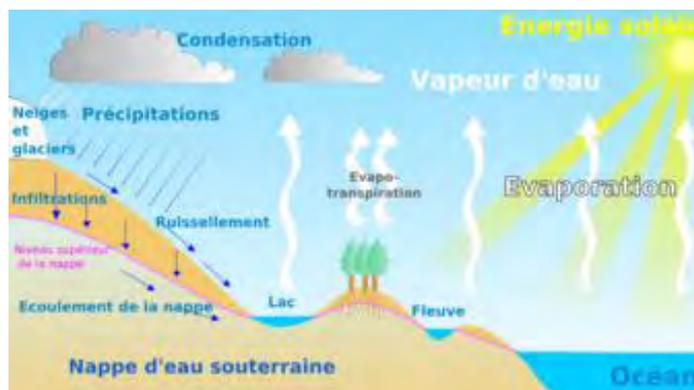
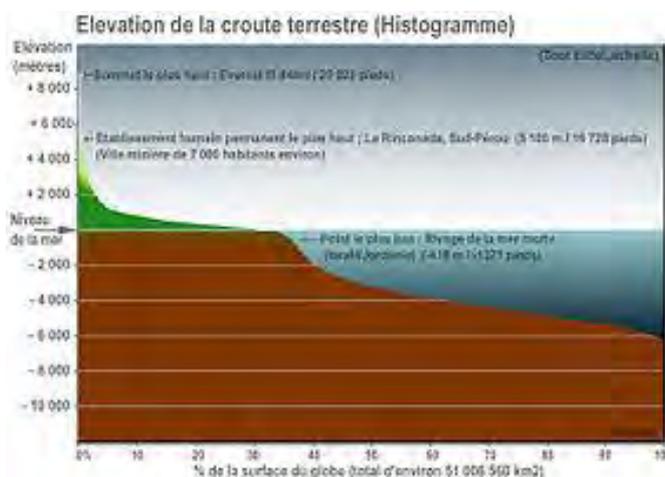
Données fournies par le National Geophysical Data Center TerrainBase Digital Terrain Model

Expansion de la Terre

Une vieille théorie nouvellement remise sur le devant de la scène explique que la Terre n'aurait pas toujours eu la même taille, et qu'elle serait en expansion. Cela a pu avoir pour conséquence un rallongement des journées, à une échelle de millions d'années. Cette théorie n'est, à ce jour, que peu reconnue par la communauté scientifique mondiale voire considérée comme de la pseudo-science.

B) Hydrosphère de la Terre

L'**hydrosphère** (du grec ancien *ὑδωρ* [*hudōr*], « eau » et *σφαῖρα* [*sphaira*], « sphère ») est un terme désignant l'ensemble des zones d'une planète où l'eau est présente. Elle concerne aussi bien l'eau sous forme liquide (océans, fleuves, nappes phréatiques, etc.), que sous forme solide (glaciers, banquise, neige éternelle, etc.) ou sous forme gazeuse (vapeur d'eau). Il y a donc recoupement avec les notions de cryosphère pour l'eau à l'état solide, et d'atmosphère pour la vapeur d'eau.



Histogramme de l'élévation de la croûte terrestre

Le cycle de l'eau, processus clé de l'hydrosphère

1) Hydrosphère terrestre

Le volume de l'hydrosphère terrestre est estimé à environ 1,5 milliard de km³, dont 93,9 % se situe dans les océans qui couvrent environ les trois-quarts de la surface du globe. Sa masse totale est estimée à 1 385 990 800 123 millions de tonnes, ce qui équivaut à environ 0,023 % de la masse totale de la Terre. L'hydrosphère terrestre est constituée à environ 97 % d'eau salée par les ions de sodium (Na⁺) et de chlore (Cl⁻). L'hydrosphère terrestre serait relativement stable. Chaque année, la Terre perd environ 90 000 tonnes d'hydrogène dans l'espace et gagne environ 50 000 tonnes de matériaux divers, dont une partie est de l'eau. L'abondance de l'eau sur la surface de la Terre est une caractéristique unique qui distingue la « planète bleue » des autres planètes du Système solaire. L'hydrosphère terrestre est principalement composée par les océans mais techniquement elle inclut également les mers, les lacs, les rivières et les eaux souterraines jusqu'à une profondeur de 2 000 mètres. La Challenger Deep de la fosse des Mariannes dans l'océan Pacifique est le lieu immergé le plus profond avec une profondeur de 10 911 mètres.

Interactions avec les autres structures terrestres

L'eau ayant une chaleur spécifique élevée, l'hydrosphère constitue un énorme réservoir de chaleur et influence de façon déterminante les climats et les vents des terres émergées. L'eau de l'hydrosphère est en perpétuel mouvement : courants, ondes et marées agitent les mers, les lacs et les fleuves, les glaciers glissent sur les continents, les icebergs voguent à la dérive, poussés par les vents et les courants, et mille ruisselets s'infiltrent dans la roche, creusant des grottes et se chargeant en sel tandis qu'ils courent vers la mer. L'hydrosphère modèle la lithosphère en l'érodant mais aussi en transportant les débris et en les accumulant au point de former de nouvelles structures géologiques.



Front du Glacier Perito Moreno (Argentine) lieu de contact entre hydrosphère, cryosphère, et lithosphère

2) Mers et océans

Les mers sont de grandes masses d'eau salée déterminées par des archipels, de grandes îles ou péninsules ou par des terres relativement proches les unes des autres. Les océans, bien plus grands, séparent les continents et atteignent une profondeur bien supérieure. Les continents se prolongent sous l'eau par une plate-forme continentale d'environ 200 m de profondeur; celle-ci s'achève par un dénivelé abrupt, le talus continental, qui rejoint les grands fonds vers 3 000 m de profondeur.

Bien que les océans et les mers communiquent les uns avec les autres, leur salinité, leur densité et leur température sont différentes. Ainsi les eaux tropicales sont-elles plus salées que les eaux où se jettent les grands fleuves et que les mers froides, du fait de la plus forte évaporation ou parce que les sels se dissolvent mieux dans une eau chaude. La plus forte salinité se rencontre dans la mer Rouge (44 g/l en moyenne et jusqu'à 300 g/l localement), la plus faible, dans la mer Baltique (2 g/l), la salinité moyenne étant de 35 g/l. La plupart de ce sel fut libéré par l'activité volcanique ou par l'érosion des roches ignées. Les océans sont également un important réservoir de gaz atmosphériques dissous qui sont essentiels à la survie de nombreuses formes de vie aquatiques. L'eau de mer a une grande influence sur le climat mondial du fait de l'énorme réservoir de chaleur que constituent les océans. Des changements dans les températures océaniques peuvent entraîner des phénomènes météorologiques très importants comme El Niño. La masse des océans est d'environ $1,35 \times 10^{18}$ t soit environ 1/4 400e de la masse totale de la Terre. Les océans couvrent une superficie de $3,618 \times 10^8$ km avec une profondeur moyenne de 3 682 mètres soit un volume estimé à $1,332 \times 10^9$ km. Environ 97,5 % de l'eau terrestre est salée. Les 2,5 % restants sont

composés d'eau douce mais environ 68,7 % de celle-ci est immobilisée sous forme de glace. On distingue deux grandes zones de profondeur et de caractéristiques relativement homogènes :

- **La zone euphotique**

Du grec eu (bon) et fotos (lumière), peu profonde, elle est la région où parvient encore de la lumière, où vivent de nombreuses plantes et où l'oxygénation est maximale. elle se partage en zone hémipélagique (0 à -50 m de profondeur), et en zone mésopélagique (-50 à -200 m) que seuls les ultraviolets atteignent et où les seules plantes sont des algues rouges et brunes;

- **La zone aphotique**

Elle englobe tout le reste. L'obscurité y est totale. On y distingue la zone infra-pélagique (-200 à -600 m), enrichie en nutriments par la proximité des côtes et de la zone euphotique et peuplée de nombreuses espèces animales; la zone bathypélagique (-600 à -2 500 m), qui comprend la majeure partie des eaux et où seuls vivent les grands carnivores et les espèces adaptées aux profondeurs; et enfin la zone abyssopélagique (-2 500 m et plus), quasi déserte.

Les caractéristiques

La pression augmente avec la profondeur - d'environ 1 000 hPa tous les 10 m. A 200 m sous le niveau de la mer, chaque centimètre carré doit supporter 1,023 kg. La température décroît de façon irrégulière et de façon différente suivant la latitude. A l'équateur, elle est en moyenne de 30 °C en surface, 15 °C à -250 m, 8 °C à -500 m, 5 °C à -1 000 m et se stabilise entre 5 et 0 °C à -4 000 m. Ainsi on ne retrouve qu'à 4 000 m de profondeur à l'équateur la température couramment trouvée en surface aux pôles. Il faut également préciser que plus de 90 % de l'eau de la planète se trouve dans les océans, qui ont une profondeur moyenne de 3 800 m.

3) Mers intérieures et lacs

Les mers intérieures et les lacs sont d'importants réservoirs d'eau plus ou moins douce. Selon leur origine on distingue les lacs volcaniques (circulaires), glaciaires (de forme allongée et irrégulière) résultant de la fonte d'anciens glaciers, tectoniques (irréguliers) formés par les mouvements de la croûte terrestre (comme par exemple la mer Morte), côtiers (formés d'eau saumâtre), karstiques (occupant des dépressions argileuses), résiduels (restes d'anciennes mers ou golfes, comme par exemple la mer Caspienne), alluvionnaires, et enfin de barrage (artificiels ou naturels).

4) Fleuves et rivières

Ils sont alimentés par les précipitations atmosphériques (via les torrents) ou la fonte des glaciers et sont caractérisés par un flux d'eau permanent. La quantité d'eau qui traverse à chaque seconde une section d'un cours d'eau est appelée son débit, mesuré en m³/s; le débit est maximal durant la crue et minimale durant l'étiage. La région recouvrant l'ensemble des affluents d'un fleuve constitue son bassin hydrographique.

C) L'atmosphère terrestre

L'**atmosphère terrestre** est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre solide. L'air sec se compose de 78,087 % de diazote, 20,95 % de dioxygène, 0,93 % d'argon, 0,0395 % de dioxyde de carbone et des traces d'autres gaz. L'atmosphère protège la vie sur Terre en absorbant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit. Il n'y a pas de frontière définie entre l'atmosphère et l'espace. Elle devient de plus en plus ténue et s'évanouit peu à peu dans l'espace. L'altitude de 120 km marque la limite où les effets atmosphériques deviennent notables durant la rentrée atmosphérique. La ligne de Kármán, à 100 km, est aussi fréquemment considérée comme la frontière entre l'atmosphère et l'espace.

Atmosphère terrestre



L'atmosphère de la Terre.

Informations générales

Épaisseur	800 km
Hauteur d'échelle	7,7 km
Pression atmosphérique	101 325 Pa (au niveau de la mer)
Masse	$5,1480 \times 10^{18}$ kg ($8,618 \times 10^{-7}$ masse

Composition volumétrique

Diazote (N₂)	78,084 %
Dioxygène (O₂)	20,953 %
Argon (Ar)	0,9340 %
Dioxyde de carbone (CO₂)	398 ppmv
Néon (Ne)	18,18 ppmv
Hélium (He)	5,24 ppmv
Méthane (CH₄)	1,745 ppmv
Krypton (Kr)	1,14 ppmv
Dihydrogène (H₂)	0,55 ppmv
Vapeur d'eau (H₂O)	de < 0.5 % à ~ 5 % (très variable)

La Terre est entourée d'une enveloppe gazeuse qu'elle retient par attraction gravitationnelle : l'atmosphère. L'atmosphère de la Terre est intermédiaire entre celle, très épaisse, de Vénus, et celle, très ténue, de Mars. La pression atmosphérique au niveau de la mer est en moyenne de 101 325 Pa, soit 1 atm par définition. L'atmosphère est constituée de 78,09 % d'azote, 20,95 % d'oxygène, 0,93 % d'argon et 0,039 % de dioxyde de carbone, ainsi que de divers autres gaz dont de la vapeur d'eau. La hauteur de la troposphère varie avec la latitude entre 8 kilomètres aux pôles et 17 kilomètres à l'équateur avec quelques variations résultant de facteurs météorologiques et saisonniers. La biosphère de la Terre a fortement altéré son atmosphère. La photosynthèse à base d'oxygène apparut il y a 2,7 milliards d'années et format l'atmosphère actuelle principalement composée d'azote et d'oxygène. Ce changement permit la

prolifération d'organismes aérobies de même que la formation de la couche d'ozone bloquant les rayons ultraviolets émis par le Soleil. L'atmosphère favorise également la vie en transportant la vapeur d'eau, en fournissant des gaz utiles, en faisant brûler les petites météorites avant qu'elles ne frappent la surface et en modérant les températures. Ce dernier phénomène est connu sous le nom d'effet de serre : des molécules présentes en faible quantité dans l'atmosphère bloquent la déperdition de chaleur dans l'espace et font ainsi augmenter la température globale. La vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'ozone sont les principaux gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre. Sans cette conservation de la chaleur, la température moyenne sur Terre serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ par rapport aux $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ actuels.

1) Description

La limite entre l'atmosphère terrestre et l'atmosphère solaire n'est pas définie précisément : la limite externe de l'atmosphère correspond à la distance où les molécules de gaz atmosphérique ne subissent presque plus l'attraction terrestre et les interactions de son champ magnétique. Ces conditions se vérifient à une altitude qui varie avec la latitude - environ 60 km au-dessus de l'équateur, et 30 km au-dessus des pôles. Ces valeurs ne sont toutefois qu'indicatives : le champ magnétique terrestre, en effet, est continuellement déformé par le vent solaire. L'épaisseur de l'atmosphère varie donc notablement. En outre, comme l'eau des océans, l'atmosphère subit l'influence de la rotation du système Terre-Lune et les interférences gravitationnelles de la Lune et du Soleil. Comme les molécules de gaz, plus légères et moins liées entre elles que les molécules de l'eau de mer, ont de grandes possibilités de mouvement, les marées atmosphériques sont des phénomènes beaucoup plus considérables que les marées océaniques. La plus grande partie de la masse atmosphérique est proche de la surface : l'air se raréfie en altitude et la pression diminue; celle-ci peut être mesurée au moyen d'un altimètre ou d'un baromètre. L'atmosphère est responsable d'un effet de serre qui réchauffe la surface de la Terre. Sans elle, la température moyenne sur Terre serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, contre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ actuellement. Cet effet de serre découle des propriétés des gaz vis-à-vis des ondes électromagnétiques.

2) Composition chimique détaillée

Elle a beaucoup varié selon les époques. Les gaz de l'atmosphère sont continuellement brassés, l'atmosphère n'est pas homogène, tant par sa composition que par ses caractéristiques physiques. La concentration des composants minoritaires, et en particulier les polluants, est très hétérogène sur la surface du globe, car des sources d'émission très locales existent, soit liées à l'activité humaine (usines, air intérieur ou extérieur, etc.) soit à des processus naturels (géothermie, décomposition de matières organiques, etc.).

Principaux constituants

Au niveau de la mer, l'air sec est principalement composé de 78,1 % de diazote, 20,9 % de dioxygène. Le 1% restants est dominé par 0,93 % d'argon et 0,04 % de dioxyde de carbone. Il comporte aussi des traces d'autres éléments chimiques, les gaz mineurs, dont la proportion varie avec l'altitude. Ceux-ci constituent moins de 0,3 % de l'atmosphère. Ce sont en majorité les gaz rares : néon, hélium, krypton, xénon et radon. Parmi ces constituants les gaz contribuant à l'effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde d'azote et l'ozone.

D'autres éléments d'origine naturelle sont présents en plus faible quantité, dont la poussière, le pollen et les spores ainsi que des virus, bactéries. De très nombreux aérosols d'origine naturelle ou anthropique sont aussi présents dans l'air, ainsi que des polluants. Ce sont notamment le CO (contrairement à une idée reçue, le CO₂ n'est pas un polluant de l'air mais un gaz à effet de serre qui a peu d'effet direct sur la santé⁴), les matières particulaires, les oxydes d'azote, le chlore (élémentaire ou surtout composés), le fluor (composés), le mercure et le soufre (en composé tel que le SO₂). Les régions agricoles sont aussi sources de méthane (fermentation des lisiers, rizières), de pesticides (plus ou moins solubles dans l'air ou dans l'humidité de l'air selon leur tension de vapeur, d'azote (issu des engrais). Fusées et avions polluent aussi l'atmosphère par leurs trainées.

Composition de l'atmosphère « sèche »	
<i>ppmv: partie par million en volume</i>	
Gaz	Volume
Diazote (N ₂)	780 840 ppmv (78,084 %)
Dioxygène (O ₂)	209 460 ppmv (20,946 %)
Argon (Ar)	9 340 ppmv (0,9340 %)
Dioxyde de carbone (CO ₂)	398 ppmv (0,0398 %) (en mai 2014)
Néon (Ne)	18,18 ppmv
Hélium (He)	5,24 ppmv
Méthane (CH ₄)	1,745 ppmv
Krypton (Kr)	1,14 ppmv
Dihydrogène (H ₂)	0,55 ppmv
À rajouter à l'atmosphère sèche :	
Vapeur d'eau (H ₂ O)	de <1 % à ~4 % (très variable)

Composants mineurs de l'atmosphère	
Gaz	Volume
Monoxyde d'azote (NO)	0,5 ppmv
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,3 ppmv
Xénon (Xe)	0,09 ppmv
Ozone (O ₃)	0,0 à 0,07 ppmv
Dioxyde d'azote (NO ₂)	0,02 ppmv
Iode (I ₂)	0,01 ppmv
Monoxyde de carbone (CO)	0,2 ppmv
Ammoniac (NH ₃)	traces

D'autres éléments d'origine naturelle sont présents en plus faible quantité, dont la poussière, le pollen et les spores ainsi que des virus, bactéries. De très nombreux aérosols d'origine naturelle ou anthropique sont aussi présents dans l'air, ainsi que des polluants. Ce sont notamment le CO (contrairement à une idée reçue, le CO₂ n'est pas un polluant de l'air mais un gaz à effet de serre qui a peu d'effet direct sur la santé⁴), les matières particulaires, les oxydes d'azote, le chlore (élémentaire ou surtout composés), le fluor (composés), le mercure et le soufre (en composé tel que le SO₂). Les régions agricoles sont aussi sources de méthane (fermentation des lisiers, rizières), de pesticides (plus ou moins solubles dans l'air ou dans l'humidité de l'air selon leur tension de vapeur, d'azote (issu des engrais). Fusées et avions polluent aussi l'atmosphère par leurs trainées.

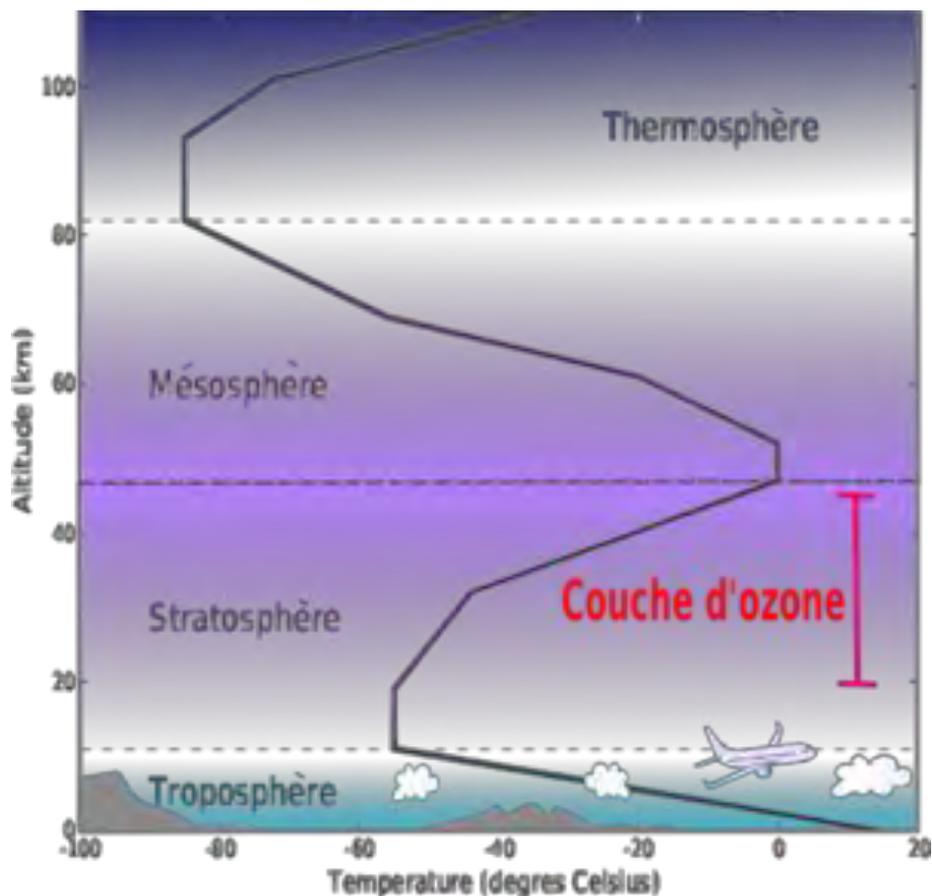
3) Évolution du taux de CO₂

Les concentrations en dioxyde de carbone s'élèvent, en 2011, à 0,0392 %, soit 392 ppm alors qu'en 1998, elle était de 345 ppm. En mai 2013 l'observatoire du Mauna Loa à Hawaï annonce que la teneur atmosphérique en CO₂ a franchi sur ce site le cap symbolique des 400 ppm (400,03 ppm de moyenne relevé le 9 mai 2013), niveau le plus élevée depuis 55 ans de mesures en ce lieu et certainement depuis deux à trois millions d'années. Il est important de noter que des concentrations supérieures ont déjà été mesurées par le passé, mais en d'autres lieux, par exemple en Alaska (avril 2012), au Canada, en Norvège (début 2013), en Équateur et aux îles Canaries, ainsi que par les mesures indépendantes de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (en Arctique en 2012 par exemple) et du *Scripps Institution of Oceanography* (seuil aussi franchi le 10 mai 2013 pour ces deux derniers). Les spécialistes estiment que l'hémisphère sud devrait franchir ce cap symbolique courant 2014, différence de quelques mois qui serait en partie liée au fait que les gaz à effet de serre sont majoritairement émis au nord de l'équateur. Par ailleurs, à cause des fluctuations saisonnières principalement dues à la végétation, des pics sont atteints en mai et en automne alors que le niveau diminue légèrement en été; en conséquence, le niveau annuel moyen actuel reste légèrement en-deçà de ce seuil symbolique, autour de 396 ppm (taux moyen entre septembre 2012 et septembre 2013, période durant laquelle le niveau a varié entre 391 et 400 ppm), mais le seuil devrait être franchi à toute date de l'année entre 2015 et 2016. Aucun niveau inférieur à 350 ppm n'a été mesuré à Hawaï depuis octobre 1988. La concentration de ce gaz a oscillé entre 180 et 280 ppm entre 800 000 ans dans le passé et le début de la révolution industrielle, ces valeurs minimales et maximales correspondant respectivement aux périodes glaciaires et interglaciaires. À l'heure actuelle la concentration de CO₂ augmenterait cent fois plus rapidement qu'à la sortie du dernier âge glaciaire il y a 10 000 ans, atteignant un niveau, variable suivant l'année, d'environ + 2,1 ppm/an contre environ + 16 ppb (0,016 ppm)/an de moyenne à l'époque. À la fin des années 1950, l'augmentation atteignait +

0,7 ppm/an, le tiers du niveau actuel. Des concentrations supérieures à l'actuelle ont certainement existé il y a environ cinquante millions d'années; cependant, d'après ce qui a pu être déterminé, la variation annuelle n'a jamais dans l'histoire récente atteint le niveau actuel.

Historique des mesures :

- Pliocène (-5 à -3 millions d'années) : 415 ppm, 350 à 450 ppm (moyenne de 400 ppm)
- "Stage 11" (- 400 000 ans) : 290 ppm
- avant la révolution industrielle (avant le XIX^e siècle) : 280 ppm
- 1958 : 315 ppm
- 1974 : 330 ppm
- 2001 : 370 ppm
- juin 2005 : 382 ppm
- 2013 : 395 ppm



Température de l'atmosphère (en °C) en fonction de l'altitude (en km)

4) Structure de l'atmosphère

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches d'importance variable : leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude. De bas en haut :

- la troposphère : la température décroît avec l'altitude (de la surface du globe à 8-15 km d'altitude); l'épaisseur de cette couche varie entre 13 et 16 km à l'équateur, mais entre 7 et 8 km aux pôles. Elle contient 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau. C'est la couche où se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies, etc.) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents);
- la stratosphère : la température croît avec l'altitude jusqu'à 0 °C (de 8-15 km d'altitude à 50 km d'altitude); elle abrite une bonne partie de la couche d'ozone;
- la mésosphère : la température décroît avec l'altitude (de 50 km d'altitude à 80 km d'altitude) jusqu'à -80 °C;
- la thermosphère : la température croît avec l'altitude (de 80 km d'altitude à 350-800 km d'altitude);
- l'exosphère : de 350-800 km d'altitude à 50 000 km d'altitude.

a) Troposphère

La troposphère, du mot grec *τρέπω* signifiant « changement », est la partie la plus basse de l'atmosphère; elle commence à la surface et s'étend entre 7 et 8 km aux pôles et de 13 à 16 km à l'équateur, avec des variations dues aux conditions climatiques. Le mélange vertical de la troposphère est assuré par le réchauffement solaire. Ce réchauffement rend l'air moins dense, ce qui le fait remonter. Quand l'air monte, la pression au-dessus de lui décroît, par conséquent il s'étend, s'opposant à la pression de l'air environnant. Or, pour s'étendre, de l'énergie est nécessaire, donc la température et la masse de l'air décroissent. Comme la température diminue, la vapeur d'eau dans la masse d'air peut se condenser ou se solidifier, relâchant la chaleur latente permettant une nouvelle élévation de la masse d'air. Ce processus détermine le gradient maximal de baisse de la température avec l'altitude, appelé gradient thermique adiabatique. La troposphère contient grossièrement 80 % de la masse totale de l'atmosphère. 50 % de la masse de l'atmosphère se trouvent en dessous d'environ 5,5 km d'altitude. À noter que la partie la plus basse de la Troposphère est aussi appelée Pèplos. Cette couche qui trouve sa limite vers 3 km est aussi qualifiée de couche sale en raison de son taux d'impureté très important (aérosol ou nucléus) qui sont des noyaux auxquels viennent se former les gouttes d'eau dans le cas d'un air ayant atteint 100 % d'humidité relative. Cette couche se termine par la pélopause. La présence de cette couche sale explique par la quasi absence d'air sur-saturé dans la couche supérieur de la troposphère.

b) Tropopause

La tropopause est la frontière entre la troposphère et la stratosphère.

c) Couche d'ozone

Bien que faisant partie de la stratosphère, la couche d'ozone est considérée comme une couche en soi parce que sa composition chimique et physique est différente de celle de la stratosphère. L'ozone (O_3) de la stratosphère terrestre est créé par les ultraviolets frappant les molécules de dioxygène (O_2), les séparant en deux atomes distincts; ce dernier se combine ensuite avec une molécule de dioxygène (O_2) pour former l'ozone (O_3). L' O_3 est instable (bien que, dans la stratosphère, sa durée de vie soit plus longue) et quand les ultraviolets le frappent, ils le séparent en O_2 et en O . Ce processus continu s'appelle le cycle ozone-oxygène. Il se produit dans la couche d'ozone, une région comprise entre 10 et 50 km au-dessus de la surface. Près de 90 % de l'ozone de l'atmosphère se trouve dans la stratosphère. Les concentrations d'ozone sont plus élevées entre 20 et 40 km d'altitude, où elle est de 2 à 8 ppm.

d) Stratosphère

La stratosphère s'étend de la tropopause, entre 7–17 km et environ 50 km. La température y augmente avec l'altitude. La stratosphère contient la majeure partie de la couche d'ozone.

e) Stratopause

La stratopause est la limite entre la stratosphère et la mésosphère. Elle se situe vers 50-55 km d'altitude. La pression représente environ 1/1000 de la pression atmosphérique au niveau de la mer.

f) Mésosphère

La mésosphère, du mot grec *μέσος* signifiant « milieu », s'étend de 50 km à environ 80–85 km. La température décroît à nouveau avec l'altitude, atteignant -100 °C (173,1 K) dans la haute mésosphère. C'est aussi dans la mésosphère que la plupart des météorites se consomment en entrant dans l'atmosphère.

g) Mésopause

La température minimale se rencontre à la mésopause, frontière entre la mésosphère et la thermosphère. C'est le lieu le plus froid de la Terre, avec une température de -100 °C (173,1 K).

h) Thermosphère

La thermosphère est la couche atmosphérique commençant vers 80–85 km et allant jusqu'à 640 km d'altitude, la température y augmente avec l'altitude. Bien que la température puisse atteindre les $1\ 500\text{ °C}$, un individu ne la ressentirait pas à cause de la très faible pression. La station spatiale internationale orbite dans cette couche, entre 320 et 380 km d'altitude. Comme description moyenne le modèle MSIS-86 est recommandé par le Committee on Space Research.

i) Thermopause

La thermopause est la limite supérieure de la thermosphère. Elle varie entre 500 et 1 000 km d'altitude.

j) Ionosphère

L'ionosphère, la partie de l'atmosphère ionisée par les radiations solaires, s'étire de 60 à 800 km et se constitue de trois couches : la couche D (60 à 90 km), la couche E (90 à 120 km), et la couche F (120 à 800 km). Elle chevauche à la fois la thermosphère et l'exosphère. Elle joue un rôle important dans l'électricité atmosphérique et forme le bord intérieur de la magnétosphère. Grâce à ses particules chargées, elle a une importance pratique car elle influence, par exemple, la propagation des ondes radio sur la Terre. Elle est le lieu où se déroulent les aurores et les phénomènes lumineux transitoires liés aux orages.

k) Exosphère

L'exosphère commence avec l'exobase, qui est aussi connu comme le « niveau critique », vers 500–1 000 km et s'étire jusqu'à plus de 10 000 km d'altitude. Elle contient des particules circulant librement et qui migrent ou proviennent de la magnétosphère ou du vent solaire.

5) Caractéristiques de l'atmosphère

a) Pression et épaisseur

La pression atmosphérique moyenne, au niveau de la mer, est de 1 013 hectopascals; la masse atmosphérique totale est de $5,1480 \times 10^{18}$ kg. La pression atmosphérique est le résultat direct du poids total de l'air se trouvant au-dessus du point où la pression est mesurée. La pression de l'air varie en fonction du lieu et du temps, car la quantité et le poids d'air varient suivant les mêmes paramètres. Toutefois, la masse moyenne au-dessus d'un mètre carré de la surface terrestre peut être calculée à partir de la masse totale de l'air et la superficie de la Terre. La masse totale de l'air est de 5 148 000 gigatonnes et la superficie de 51 007,2 megahectares. Par conséquent $5148000/51007,2 = 10,093$ tonnes par mètre carré. Ceci est environ 2,5 % inférieur à l'unité standardisée officielle de 1 atm représentant 1 013,25 hPa, ce qui correspond à la pression moyenne, non pas au niveau de la mer seul, mais à la base de l'atmosphère à partir de l'élévation moyenne du sol terrestre et du niveau de la mer. Si la densité de l'atmosphère restait constante avec l'altitude, l'atmosphère se terminerait brusquement vers 7,81 km d'altitude. La densité décroît avec l'altitude, ayant déjà diminué de 50 % dès 5,6 km. En comparaison, la plus haute montagne, l'Everest, atteint les 8,8 km d'altitude, donc l'air est moins de 50 % moins dense à son sommet qu'au niveau de la mer. Cette chute de pression est presque exponentielle, ainsi la pression diminue de moitié environ tous les 5,6 km et de 63,2 % ($1 - 1/e = 1 - 0,368 = 0,632$) tous les 7,64 km (hauteur d'échelle moyenne de l'atmosphère terrestre en dessous de 70 km). Même dans l'exosphère, l'atmosphère est encore présente, comme on peut le constater par la traînée subie par les satellites.

Les équations de pression par altitude peuvent être utilisées afin d'estimer l'épaisseur de l'atmosphère. Les données suivantes sont données pour référence :

- 50 % de la masse de l'atmosphère est en dessous de 5,6 km d'altitude;
- 90 % de la masse de l'atmosphère est en dessous de 16 km d'altitude. L'altitude courante des transports aériens commerciaux est de 10 km et le sommet de l'Everest est à 8 848 m au-dessus du niveau de la mer. Dans la région supérieure, où les gaz sont raréfiés, se produisent des aurores et d'autres effets atmosphériques. Le vol le plus élevé de l'avion X-15 a atteint, en 1963, une altitude de 108,0 km.

b) Densité et masse

La densité de l'air au niveau de la mer est d'environ $1,2 \text{ kg/m}^3$ (1,2 g/L). Les variations naturelles de la pression atmosphérique se produisent à chaque altitude et à chaque changement de temps. Ces variations sont relativement faibles dans les altitudes habitées, mais elles deviennent plus prononcées dans l'atmosphère supérieure puis dans l'espace à cause des variations des radiations solaires. La densité atmosphérique décroît avec l'altitude. Cette variation peut être modélisée par la formule du nivellement barométrique. Des modèles plus sophistiqués sont utilisés par les météorologues et les agences spatiales pour prédire le temps et l'abaissement progressif de l'orbite des satellites. La masse de l'atmosphère est de 5×10^{15} tonnes soit 1/1 200 000 la masse de la Terre. D'après le National Center for Atmospheric Research, la « masse totale de l'atmosphère est de $5,1480 \times 10^{18}$ kg avec une variation annuelle due à la vapeur d'eau de $1,2$ à $1,5 \times 10^{15}$ kg en fonction de l'utilisation des données sur la pression de surface et la

vapeur d'eau. La masse moyenne de la vapeur d'eau est estimée à $1,27 \times 10^{16}$ kg et la masse de l'air sec est de $5,1352 \pm 0,0003 \times 10^{18}$ kg. »

c) Opacité

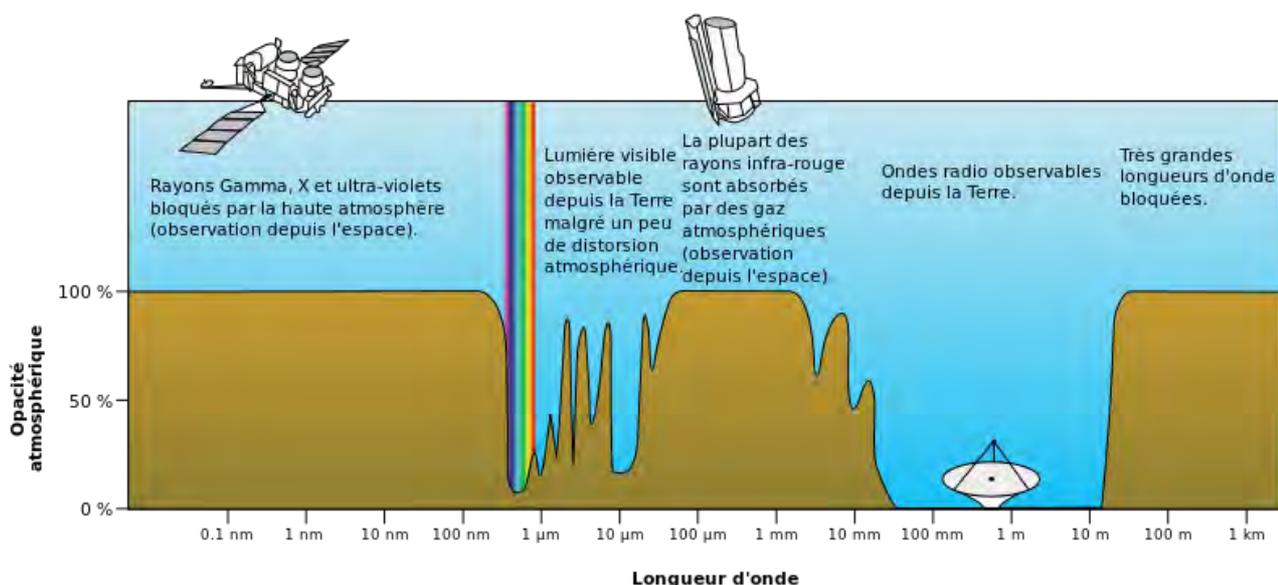
Les radiations solaires (ou rayonnement solaire) correspondent à l'énergie que reçoit la Terre du Soleil. La Terre réémet aussi des radiations vers l'espace, mais sur des longueurs d'onde plus importantes invisibles à l'œil humain. Suivant les conditions, l'atmosphère peut empêcher les radiations d'entrer dans l'atmosphère ou d'en sortir. Parmi les exemples les plus importants de ces effets il y a les nuages et l'effet de serre.

d) Diffusion des ondes

Quand la lumière traverse l'atmosphère, les photons interagissent avec elle à travers la diffusion des ondes. Si la lumière n'interagit pas avec l'atmosphère, c'est la *radiation directe* et cela correspond au fait de regarder directement le soleil. Les *radiations indirectes* concernent la lumière qui est diffusée dans l'atmosphère. Par exemple, lors d'un jour couvert quand les ombres ne sont pas visibles il n'y a pas de radiations directes pour la projeter, la lumière a été diffusée. Un autre exemple, dû à un phénomène appelé la diffusion Rayleigh, les longueurs d'onde les plus courtes (bleu) se diffusent plus aisément que les longueurs d'onde les plus longues (rouge). C'est pourquoi le ciel paraît bleu car la lumière bleue est diffusée. C'est aussi la raison pour laquelle les couchers de soleil sont rouges. Parce que le soleil est proche de l'horizon, les rayons solaires traversent plus d'atmosphère que la normale avant d'atteindre l'œil par conséquent toute la lumière bleue a été diffusée, ne laissant que le rouge lors du soleil couchant.

e) Absorption optique

L'absorption optique est une autre propriété importante de l'atmosphère. Différentes molécules absorbent différentes longueurs d'onde de radiations. Par exemple, l'O₂ et l'O₃ absorbent presque toutes les longueurs d'onde inférieures à 300 nanomètres. L'eau (H₂O) absorbe la plupart des longueurs d'onde au-dessus de 700 nm, mais cela dépend de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Quand une molécule absorbe un photon, cela accroît son énergie.



Transmittance (ou opacité) atmosphérique de la Terre à diverses longueurs d'onde et radiation électromagnétique, y compris lumière visible

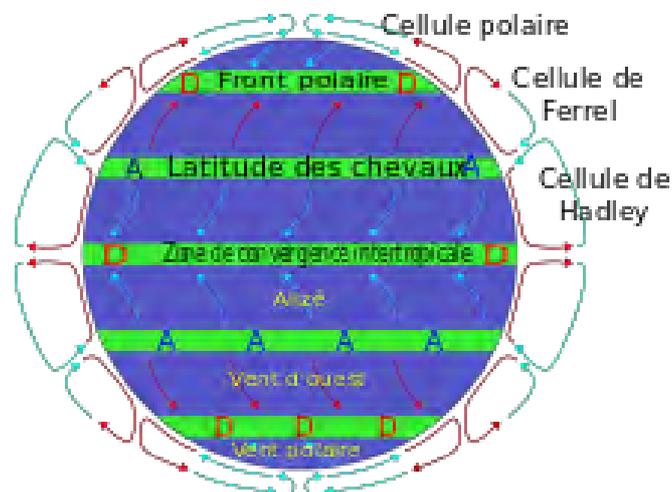
Quand les spectres d'absorption des gaz de l'atmosphère sont combinés, il reste des « fenêtres » de faible opacité, autorisant le passage de certaines bandes lumineuses. La fenêtre optique va d'environ 300 nm (ultraviolet-C) jusqu'aux longueurs d'onde que les humains peuvent voir, la lumière visible (communément appelé lumière), à environ 400–700 nm et continue jusqu'aux infrarouges vers environ 1100 nm. Il y a aussi des fenêtres atmosphériques et radios qui transmettent certaines ondes infrarouges et radio sur des longueurs d'onde plus importantes. Par exemple, la fenêtre radio s'étend sur des longueurs d'onde allant de un centimètre à environ onze mètres. Le graphe ci-dessus représente 1-T (exprimé en %) (T:transmittance).

f) Émission

L'émission est l'opposé de l'absorption, quand un objet émet des radiations. Les objets tendent à émettre certaines quantités de longueurs d'onde suivant les courbes d'émission de leur « corps noir », par conséquent des objets plus chauds tendent à émettre plus de radiations sur des longueurs d'onde plus courtes. Les objets froids émettent moins de radiations sur des longueurs d'onde plus longues. Par exemple, le Soleil est approximativement à 6 000 K (5 730 °C), ses pics de radiation approchent les 500 nm, et sont visibles par l'œil humain. La Terre est approximativement à 290 K (17 °C), par conséquent ses pics de radiations approchent les 10 000 nm (10 μm), ce qui est trop long pour que l'œil humain les perçoive. À cause de sa température, l'atmosphère émet des radiations infrarouges. Par exemple, lors des nuits où le ciel est dégagé la surface de la Terre se rafraîchit plus rapidement que les nuits où le ciel est couvert. Ceci est dû au fait que les nuages (H₂O) sont d'importants absorbeurs et émetteurs de radiations infrarouges. L'effet de serre est directement lié à l'absorption et à l'émission. Certains composants chimiques de l'atmosphère absorbent et émettent des radiations infrarouges, mais n'interagissent pas avec la lumière visible. Des exemples communs de ces composants sont le CO₂ et l'H₂O. S'il y a trop de ces gaz à effet de serre, la lumière du soleil chauffe la surface de la Terre, mais les gaz bloquent les radiations infrarouges lors de leur renvoi vers l'espace. Ce déséquilibre fait que la Terre se réchauffe, entraînant ainsi des changements climatiques.

g) Circulation

La circulation atmosphérique est le mouvement à l'échelle planétaire de la couche d'air entourant la Terre qui redistribue la chaleur provenant du Soleil en conjonction avec la circulation océanique. En effet, comme la Terre est un sphéroïde, la radiation solaire incidente au sol varie entre un maximum aux régions faisant face directement au Soleil, situé selon les saisons plus ou moins loin de l'équateur, et un minimum à celles très inclinées par rapport à ce dernier proches des Pôles. La radiation réémise par le sol est liée à la quantité d'énergie reçue. Il s'ensuit un réchauffement différentiel entre les deux régions. Le déséquilibre ainsi créé a pour conséquence des différences de pression, qui sont à l'origine des circulations atmosphériques. Celle-ci, combinée aux courants marins, est le moyen qui permet de redistribuer la chaleur sur la surface de la Terre. Les détails de la circulation atmosphérique varient continuellement, mais la structure de base reste assez constante.



Cellules de circulation simplifiées

h) Phénomènes optiques

La composition de l'atmosphère terrestre la rend relativement transparente aux rayonnements électromagnétiques dans le domaine du spectre visible. Elle est cependant relativement opaque aux rayonnements infrarouges émis par le sol, ce qui est à l'origine de l'effet de serre. Il s'y produit aussi différents phénomènes optiques causés par des variations continues ou non de l'indice de réfraction du milieu de propagation des ondes électromagnétiques. Parmi ces phénomènes, les plus notables sont les arcs-en-ciel et les mirages. La couleur du ciel diurne, quant à elle, est due à la variation de la diffusion du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde. Des couleurs inhabituelles s'observent cependant lors des aurores polaires (aurores boréales ou australes), qui résultent de l'interaction entre les particules du vent solaire et la haute atmosphère.

i) Météorologie et climat



Couverture nuageuse de la Terre photographiée par le satellite Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer de la NASA

L'atmosphère terrestre n'a pas de limite clairement définie, elle disparaît lentement dans l'espace. Les trois-quarts de la masse atmosphérique sont concentrées dans les premiers 11 kilomètres de l'atmosphère. Cette couche la plus inférieure est appelée la troposphère. L'énergie du Soleil chauffe cette couche et la surface en dessous ce qui entraîne une expansion du volume atmosphérique. Cet air avec une densité inférieure s'élève et est remplacé par de l'air plus dense car plus froid. La circulation atmosphérique qui en résulte est un acteur déterminant dans le climat et la météorologie du fait de la redistribution de la chaleur qu'elle implique. Les principales bandes de circulations sont les alizés dans la région équatoriale à moins de 30° et les vents d'ouest dans les latitudes intermédiaires entre 30° et 60°. Les courants océaniques sont également importants dans la détermination du climat en particulier la circulation thermohaline qui distribue l'énergie thermique des régions équatoriales vers les régions polaires. La vapeur d'eau générée par l'évaporation de surface est transportée par les mouvements atmosphériques. Lorsque les conditions atmosphériques permettent une élévation de l'air chaud et humide, cette eau se condense et retombe sur la surface sous forme de précipitations. La plupart de l'eau est ensuite transportée vers les altitudes inférieures par les réseaux fluviaux et retourne dans les océans ou dans les lacs. Ce cycle de l'eau est un mécanisme vital au soutien de la vie sur Terre et joue un rôle primordial dans l'érosion des reliefs terrestres. La distribution des précipitations est très variée de plusieurs mètres à moins d'un millimètre par an. La circulation atmosphérique, les caractéristiques topologiques et les gradients de températures déterminent les précipitations moyenne sur une région donnée. La quantité d'énergie solaire atteignant la Terre diminue avec la hausse de la latitude. Aux latitudes les plus élevées, les rayons solaires atteignent la surface suivant un angle plus faible et doivent traverser une plus grande colonne d'atmosphère. Par conséquent, la température moyenne au niveau de la mer diminue d'environ 0,4 °C à chaque degré de latitude en s'éloignant de l'équateur. La Terre peut être divisée en ceintures latitudinales de climat similaires. En partant de l'équateur, celles-ci sont les zones tropicales (ou équatoriales), subtropicales, tempérées et polaires. Le climat peut également être basé sur les températures et les précipitations. La classification de Köppen (modifiée par Rudolph Geiger, étudiant de Wladimir Peter Köppen) est la plus utilisée et définit cinq grands groupes (tropical humide, aride, tempéré, continental et polaire) qui peuvent être divisées en sous-groupes plus précis.

j) Haute atmosphère



Photographie montrant la Lune à travers l'atmosphère terrestre. NASA

On a vu qu'au-dessus de la troposphère, l'atmosphère est habituellement divisée en trois couches, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. Chaque couche possède un gradient thermique adiabatique différent définissant l'évolution de la température avec l'altitude. Au-delà, l'exosphère se transforme en magnétosphère, où le champ magnétique terrestre interagit avec le vent solaire. La couche d'ozone se trouve dans la stratosphère et bloque une partie des rayons ultraviolets ce qui est important pour la vie sur Terre. La ligne de Kármán, définie comme se trouvant à 100 kilomètres au-dessus de la surface terrestre, est la limite habituelle entre l'atmosphère et l'espace. L'énergie thermique peut accroître la vitesse de certaines particules de la zone supérieure de l'atmosphère qui peuvent ainsi échapper à la gravité terrestre. Cela entraîne une lente mais constante « fuite » de l'atmosphère dans l'espace. Comme l'hydrogène non lié a une faible masse moléculaire, il peut atteindre la vitesse de libération plus facilement et disparaît dans l'espace à un rythme plus élevé que celui des autres gaz. La fuite de l'hydrogène dans l'espace déplace la Terre d'un état initialement réducteur à un état actuellement oxydant. La photosynthèse fournit une source d'oxygène non lié mais la perte d'agents réducteurs comme l'hydrogène est considéré comme une condition nécessaire à l'accumulation massive d'oxygène dans l'atmosphère. Ainsi la capacité de l'hydrogène à quitter l'atmosphère terrestre aurait pu influencer la nature de la vie qui s'est développée sur la planète. Actuellement, la plus grande partie de l'hydrogène est convertie en eau avant qu'il ne s'échappe du fait de l'atmosphère riche en oxygène. La plupart de l'hydrogène s'échappant provient de la destruction des molécules de méthane dans la haute atmosphère.

D) Le champ magnétique de la Terre

Le champ magnétique terrestre a pour l'essentiel la forme d'un dipôle magnétique avec les pôles actuellement situés près des pôles géographiques de la planète. À l'équateur du champ magnétique, son intensité à la surface terrestre est de $3,05 \times 10^{-5}$ T, avec un moment magnétique global de $7,91 \times 10^{15}$ T m. Selon la théorie de la dynamo, le champ est généré par le cœur externe fondu où la chaleur crée des mouvements de convection au sein de matériaux conducteurs, ce qui génère des courants électriques. Ceux-ci produisent le champ magnétique terrestre. Les mouvements de convection dans le noyau externe sont organisés spatialement selon un mode spécifique de cette géométrie (colonnes de Busse), mais présentent néanmoins une composante temporelle relativement chaotique (au sens de la dynamique non-linéaire); bien que le plus souvent plus ou moins alignés avec l'axe de rotation de la Terre, les pôles magnétiques se déplacent et changent irrégulièrement d'alignement. Cela entraîne des inversions du champ magnétique terrestre à intervalles irréguliers, approximativement plusieurs fois par million d'années pour la période actuelle, le Cénozoïque. L'inversion la plus récente eut lieu il y a environ 700 000 ans.

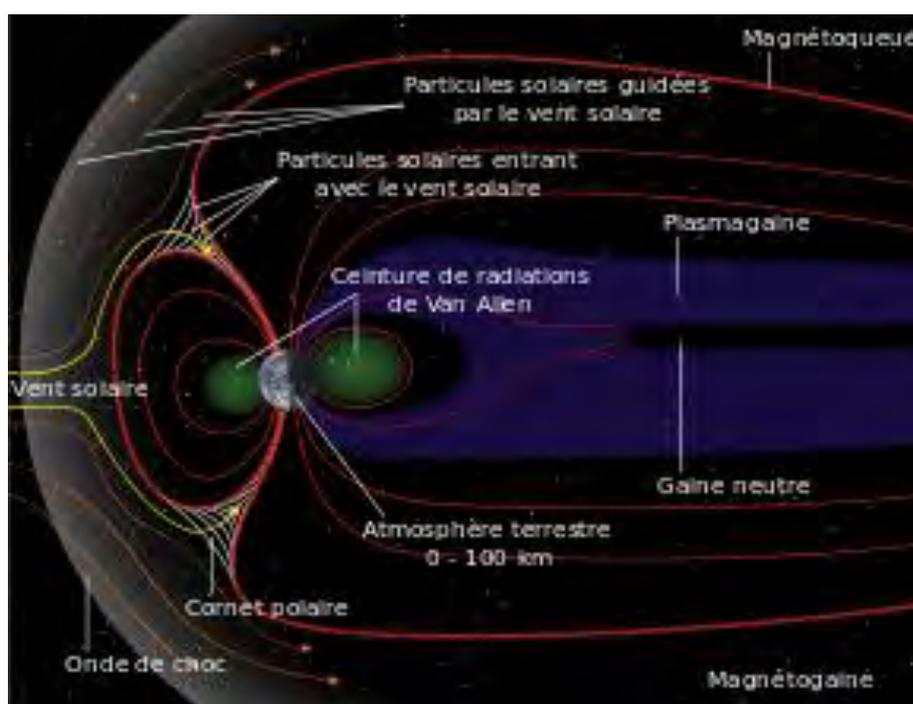


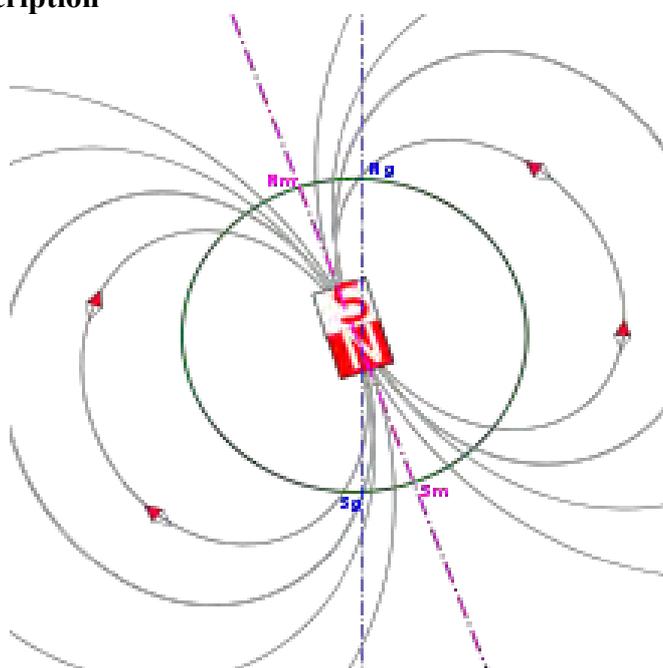
Schéma de la magnétosphère terrestre. Le vent solaire progresse de la gauche vers la droite

Le champ magnétique forme la magnétosphère qui dévie les particules du vent solaire et s'étend jusqu'à environ treize fois le rayon terrestre en direction du Soleil. La collision entre le champ magnétique et le vent solaire forme les ceintures de Van Allen, une paire de régions toroïdales contenant un grand nombre de particules énergétiques ionisées. Lorsque, à l'occasion d'arrivées de plasma solaire plus intenses que le vent solaire moyen, par exemple lors d'événements d'éjections de masse coronale vers la Terre, la déformation de la géométrie de la magnétosphère sous l'impact de ce flux solaire, permet le processus de reconnexion magnétique, et une partie des électrons de ce plasma solaire entre dans l'atmosphère terrestre en une ceinture autour aux pôles magnétiques; il se forme alors des aurores polaires, qui sont l'émission d'une lumière de fluorescence résultant de la désexcitation des atomes et molécules, essentiellement d'oxygène de la haute et moyenne atmosphère, excités par les chocs des électrons solaires.

1) Origine

Le champ magnétique de la Terre est engendré par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la Terre. Selon les études de John Tarduno de l'université de Rochester (États-Unis), la Terre possédait déjà un champ magnétique il y a 3,45 milliards d'années.

2) Description



Le champ magnétique terrestre peut être vu comme celui d'un aimant droit

Le champ magnétique terrestre peut être comparé, en première approximation, à celui d'un aimant droit (ou d'un dipôle magnétique, ou d'une bobine plate parcourue par un courant). Le point central de cet aimant n'est pas exactement au centre de la Terre, il s'en trouve à quelques centaines de kilomètres. Cette approximation ne doit pas faire oublier que le champ a des composantes multipolaires dont l'intensité, bien que beaucoup plus faible que la composante dipolaire, n'est pas négligeable, notamment lors d'une inversion du champ magnétique terrestre qui voit l'affaiblissement de l'intensité du dipôle si bien que les composantes non dipolaires deviennent prédominantes. La théorie du potentiel décrit, à partir de l'équation de Laplace, qu'à cet aimant droit se superposent en second ordre un quadripôle, au troisième ordre un octopôle, etc., jusqu'à l'infini. Cette décomposition dite en harmoniques sphériques admet des coefficients qui pondèrent l'importance à attribuer à chaque aimant. Le premier à avoir mesuré leur valeur est Gauss à partir d'un maillage d'observatoires magnétiques répartis autour de la Terre, puis d'en tirer des études statistiques. D'autres planètes du système solaire possèdent un champ magnétique : Mercure, Saturne, Uranus, Neptune et surtout Jupiter. Le Soleil lui-même en possède un. Bien que les aimants aient été connus depuis l'Antiquité, ce sont les Chinois qui, vers l'an 1000-1100 les utilisèrent pour s'orienter à l'aide de la boussole. La relation entre les aimants et le champ magnétique terrestre fut découverte en 1600, par William Gilbert, un physicien anglais et médecin de la reine Élisabeth I^{re} qui publie en 1600 *de Magno Magnete Tellure* (Du Grand Aimant de la Terre). Cette théorie est la première concernant des

caractéristiques globales de la Terre, avant la gravité d'Isaac Newton. Il démontra comment une boussole placée à la surface d'une boule magnétisée (la « Terrella ») indique toujours le même point, comme elle le fait sur la Terre.

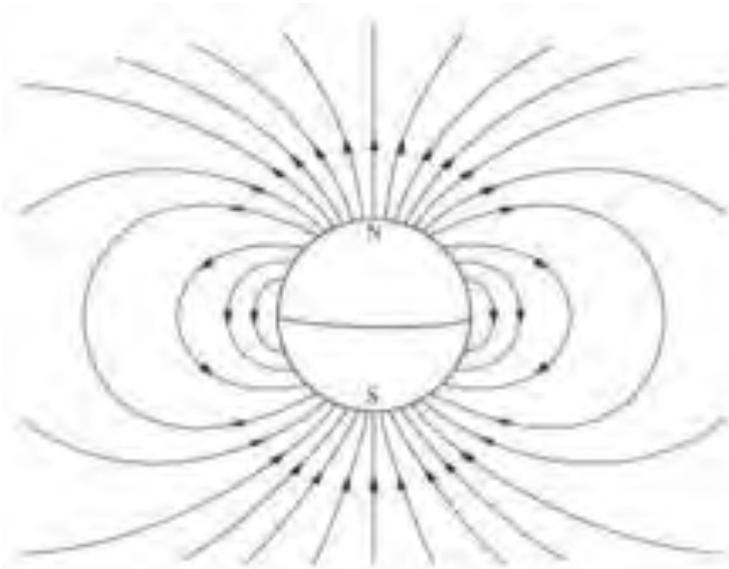
3) Notion de pôle

L'ensemble des lignes de champ magnétique de la Terre situées au-dessus de l'ionosphère, soit à plus de 1 000 km, est appelé magnétosphère. L'influence du champ magnétique terrestre se fait sentir à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres.

Le **pôle Nord magnétique** terrestre est en fait un pôle de magnétisme « sud ». Il s'agit d'une pure convention, due au choix d'appeler « nord » la pointe de l'aiguille de la boussole qui *pointe* approximativement le pôle Nord géographique.

L'axe géomagnétique, passant par les deux pôles magnétiques, fait un angle de $11,5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Une mesure d'avril 2007 par le projet « Poly-Artique » situa le pôle Nord magnétique (Nm) à une latitude de 83.95°N et une longitude de 121.02°O . Soit étant situé à 673 km du pôle Nord géographique (Ng) et ayant une vitesse moyenne de déplacement de 55km/an (soit une moyenne d'environ 150m/jour ou 6m/h). À l'été 2010, il a été estimé qu'il n'était plus qu'à 550 km du pôle Nord géographique. En outre la position du pôle magnétique varie au cours de la journée, se déplaçant ainsi de plusieurs dizaines de km autour de sa position moyenne.

Le **pôle Sud magnétique**, quant à lui, se trouve au large de la Terre Adélie, dans la mer d'Urville, à 65°S et 138°E .



Le dipôle terrestre

Position des pôles magnétiques				
Pôle Nord magnétique	(2001) $81^\circ 18' \text{N } 110^\circ 48' \text{O}$	(2004) $82^\circ 18' \text{N } 113^\circ 24' \text{O}$	(2005) $82^\circ 42' \text{N } 114^\circ 24' \text{O}$	(2010) $85^\circ 00' \text{N } 132^\circ 36' \text{O}$
Pôle Sud magnétique	(1998) $64^\circ 36' \text{S } 138^\circ 30' \text{E}$	(2004) $63^\circ 30' \text{S } 138^\circ 00' \text{E}$	(2005) $63^\circ 06' \text{S } 137^\circ 30' \text{E}$	(2010) $64^\circ 24' \text{S } 137^\circ 18' \text{E}$

4) Propriétés du champ magnétique

En un point donné du champ magnétique terrestre, le vecteur champ magnétique possède une composante verticale B_v (dirigée vers le centre de la Terre) et une composante horizontale B_0 . Aux pôles magnétiques, la composante horizontale a une valeur nulle. L'angle formé par B et B_0 est appelé « inclinaison ». Il augmente lorsque l'on se rapproche des pôles en tendant vers 90° .

Le vent solaire est responsable de ces variations par les courants électriques qu'il engendre dans l'ionosphère et la magnétosphère. Les orages magnétiques peuvent perturber le champ magnétique terrestre en faisant varier l'intensité de la composante horizontale B_0 . De plus, les vents solaires déforment le champ magnétique terrestre. Côté jour, il est aplati et du côté nuit, il s'étire sur une dizaine de rayons

terrestres. La valeur de la densité de flux du champ (induction) magnétique est exprimée en teslas (nom de l'unité dans le Système International d'unités), en l'honneur de Nikola Tesla. Actuellement, elle est de l'ordre de 47 μT au centre de la France. L'*archéomagnétisme*, fondé sur l'étude des traces de champ magnétique fixées dans les objets archéologiques (briques, céramiques, etc.), et le *paléomagnétisme*, fondé plutôt sur les roches, permettent de comprendre l'évolution du géomagnétisme au fil du temps; en datant les inversions de polarité magnétique au travers des âges, par exemple.

5) Applications

La boussole

L'aiguille d'une boussole parfaite (non perturbée par un champ parasite), s'oriente suivant la composante parallèle au cadran (normalement positionné horizontalement), restant tangente à la ligne de champ du lieu où elle se trouve. La boussole indique la direction du *Pôle Nord magnétique* (et non celle du *Pôle Nord géographique*); la différence angulaire relative étant appelée la *déclinaison magnétique*, dont la valeur dépend du lieu où l'on se trouve. La boussole utilisée en navigation, appelée compas, n'indique généralement pas le Nord magnétique, mais le *Nord compas*, direction à laquelle il faut apporter encore une autre correction (appelée la déviation du compas), afin de retrouver la direction du Nord magnétique. La déclinaison magnétique d'un lieu est fournie sur les cartes détaillées (1/50000 ou 1/25000) de la région. Sur les cartes marines et aéronautiques est également fournie une estimation de sa variation annuelle (par exemple diminution de 6' par an).

Le paléomagnétisme

On distingue l'archéomagnétisme, fondé sur l'étude des traces de champ magnétique fixées dans les objets archéologiques (briques, céramiques, etc.), du paléomagnétisme fondé sur l'analyse des variations du champ magnétique enregistrées par les roches. Lors de la solidification « rapide » d'un matériau (cuisson d'une poterie, éruption volcanique...), les dipôles magnétiques qu'il contient se retrouvent figés, donnant ainsi un instantané de la direction du champ magnétique terrestre. Les travaux de Xavier Le Pichon dans les années 70, ont permis de mettre en évidence le phénomène de dérive des continents, à partir de l'étude de la variation du champ magnétique terrestre enregistrée au niveau des dorsales médio-Atlantique. On a ainsi pu découvrir que le champ magnétique terrestre a subi de multiples inversions de polarité au cours des millions d'années.

L'exploration minière

La prospection minière constitue un des grands domaines d'application de l'étude du géomagnétisme. Différentes roches possédant différentes aimantations, la valeur de l'intensité du champ magnétique terrestre s'en trouve modifiée. Il est ainsi possible d'obtenir une carte des structures en profondeur, selon les variations d'aimantation des roches.

Un bouclier protecteur pour la vie

Le champ magnétique terrestre joue un rôle essentiel dans le développement de la vie sur Terre, en déviant les particules mortelles du vent solaire formant ainsi les aurores boréales et australes. Les scientifiques observent toutefois une diminution du champ magnétique terrestre, l'anomalie magnétique de l'Atlantique sud en étant le signe le plus spectaculaire. Lorsque le noyau se sera refroidi et solidifié (dans quelques milliards d'années) et qu'en conséquence le champ magnétique aura disparu, il est probable que les formes de vie existantes ne pourront plus subsister. Ces conditions sont celles qui règnent aujourd'hui sur la Lune et Mars.

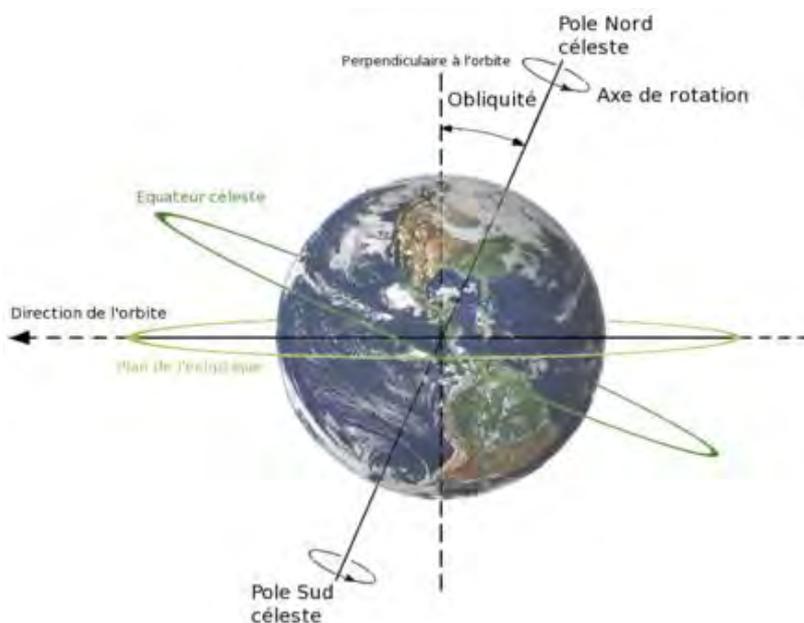
Un des moyens de guidage d'animaux migrants

De nombreux animaux grands migrants terrestres (ex. : oiseaux) ou aquatiques (ex. : tortues marines) semblent dotés d'une perception fine du champ magnétique terrestre, même si d'autres sens interviennent lors des migrations. Par exemple les tortues caouanne sont sensibles à la latitude en fonction du champ magnétique terrestre et de son inclinaison. Ainsi de très jeunes tortues de cette espèce placées, peu après leur éclosion, en bassin reproduisant des conditions de champ magnétique d'autres régions (Porto-Rico et Cap-Vert, situés sur leur route migratoire habituelle à la même latitude (20 ° N), mais à des longitudes différentes) se sont rapidement orientées dans la direction qu'elles prendraient dans cet environnement (respectivement vers le NE et vers le SE).

V Rotation et orbite

A) Rotation

La **rotation de la Terre** est un mouvement de la Terre qui peut être défini, en première approximation, comme le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles géographiques qui relie le pôle Nord au pôle Sud. Elle ne doit pas être confondue avec la révolution de la Terre, mouvement avec lequel elle se conjugue et qui peut être défini, en première approximation, comme le mouvement de translation elliptique de la Terre autour du Soleil. La rotation de la Terre est un mouvement complexe qui peut être décrit comme la combinaison de trois mouvements : la rotation propre, mouvement circulaire autour de l'axe; la précession, mouvement conique décrit par l'axe autour de sa position moyenne; et la nutation, oscillation de l'axe. Le mouvement de nutation peut lui-même être décrit comme la combinaison de plusieurs nutations dont la principale, dite de Bradley, a une amplitude de 9,2 secondes d'arc et une période de 18,6 ans. La Terre accomplit un tour sur elle-même, d'ouest en est (sens direct), par rapport au système de référence céleste (jour stellaire ou jour sidéral) en un petit peu moins de 86 164,1 secondes, soit 23 h 56 min 4,1 s. Le temps de faire une révolution autour du Soleil (soit 31 556 925 s), la Terre fait un petit peu plus de 366,24 de ces tours (jours sidéraux) sur elle-même, soit une année sidérale. La combinaison des deux mouvements fait que le Soleil semble tourner $366,24 - 1 = 365,24$ fois autour de la Terre (jours solaires de 86 400 s en moyenne) en une année. Comme la Terre n'est pas rigoureusement un solide massif indéformable, le concept de vitesse de rotation angulaire doit être soigneusement défini par des géodésiens et des astronomes, puis mesuré. Ce service est effectué par l'IERS (*International Earth Rotation Service*), qui met en ligne toutes les données connues.



Inclinaison de l'axe terrestre (auss appelé obliquité) et sa relation avec l'équateur céleste et le plan de l'écliptique, ainsi qu'avec l'axe de rotation de la Terre

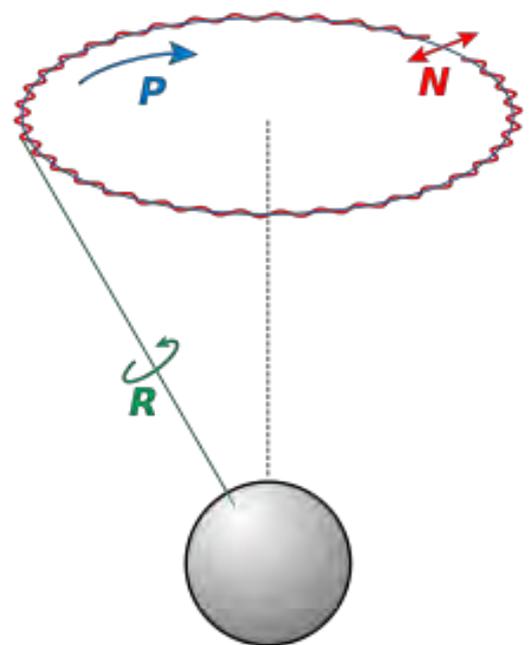


Diagramme présentant le mouvement de rotation d'un solide indéformable comme la combinaison de trois mouvements : la rotation propre R (en vert), la précession P (en bleu) et la nutation N (en rouge)

La vitesse de rotation oscille de manière irrégulière. Dans la période de rotation (longueur du jour), on observe principalement une variation saisonnière d'environ un millièème de seconde (ms) et des changements décennaux (entre 10 et 70 ans) de l'ordre de cinq millisecondes. De plus, les actions du soleil et de la Lune sur le soulèvement de la marée produisent un couple retardateur qui induit une augmentation séculaire de la durée du jour d'environ deux millisecondes par siècle et un éloignement de la Lune de 3,84 centimètres par an (voir Rotation synchrone). Par rapport aux étoiles, l'axe de rotation balaye en 25 800 ans un cône axé sur les pôles du plan de l'écliptique (l'axe perpendiculaire à l'orbite terrestre), dont le demi-angle au sommet (l'obliquité de l'écliptique) vaut environ $23^{\circ}26'$. À ce mouvement, la précession, se superposent de petites oscillations périodiques, les nutations, dont la principale, en 18,6 ans, a une amplitude de $20''$. La précession-nutation est provoquée par l'action gravitationnelle conjointe de la Lune et du Soleil sur le bourrelet équatorial de la Terre, et de ce fait, fait l'objet de modèles relativement précis, donnant la position spatiale de l'axe de rotation à la milliseconde de degré près. L'axe de rotation oscille également dans la Terre de $1''$ au plus, principalement aux périodes de 430 jours et 365 jours. Le pôle de rotation est l'intersection de l'axe de rotation avec la surface de l'hémisphère nord. À l'heure actuelle la direction du pôle dans l'espace comme dans la Terre est mesurée avec une précision de l'ordre de 0,1 milliseconde d'arc.

Origine

On considère que les planètes se forment en même temps que leur étoile, par accrétion et condensation d'un nuage de gaz et de poussières sous l'influence de la gravitation. Tous les modèles de formation planétaire commencent donc par la formation d'une, voire de deux ou plus, étoiles au sein d'un effondrement, suivie par l'accrétion des poussières dans le disque résiduel

circumstellaire (extrait de planète). Il est statistiquement peu probable que la somme des moments angulaires (moment angulaire) de chacune des particules ou météorites du disque circumstellaire qui a engendré la Terre par accréation soit nul. De plus, en se rapprochant de ce qui sera le centre de la future planète, les constituants accélèrent leur vitesse angulaire pour respecter le principe de conservation de la quantité de mouvement. La future planète tournera donc dans le sens de la somme des moments individuels et plus vite que la somme des vitesses. Une partie de l'énergie mécanique d'accréation (frottement) sera transformée en chaleur. L'élévation de température consécutive, si elle n'a pas permis de démarrer une réaction nucléaire a tout de même ramolli la Terre. Les forces conjuguées de la gravitation (forme sphérique) et de la force centrifuge (bourellet à l'équateur) ont modelé cette forme que nous lui connaissons aujourd'hui avec cette vitesse de rotation conservée jusqu'à nous et que nous appelons "un jour", dans la direction approximative de l'étoile polaire et de ce côté que nous appelons *l'est*.

Difficulté de définition

Par analogie, lorsque l'on observe un essaim d'abeilles, son mouvement global de translation, par le vent par exemple, est facile à définir; mais son mouvement intrinsèque de rotation, lié aux mouvements des abeilles, l'est moins. La Terre n'étant pas un simple solide, il faut définir précisément sa rotation globale. Néanmoins, on connaît bien le mouvement des plaques tectoniques, du moins mesure-t-on précisément le déplacement d'un point de la croûte terrestre avec un GPS par exemple, ce qui permet d'établir une convention, dite de Tisserand, pour figer un modèle théorique, l'ITRS (Système International de Référence Terrestre) puis d'y caler un modèle pratique évidemment entaché d'erreur, l'ITRF (Repère de Référence Terrestre International).

Il ne reste plus, alors, qu'à tenir compte des autres facteurs intervenants dans les différents milieux et interfaces terrestres :

- des vents (aéronomie), de la marée atmosphérique, de la marée thermique solaire;
- des courants océaniques, des marées océaniques, des interactions Océan-Atmosphère;
- de la marée terrestre; des mouvements du manteau (le rebond post-glaciaire a déplacé énormément le pôle (nord) vers le Groenland, des mouvements de la graine du noyau et du noyau lui-même et enfin de l'interaction noyau-manteau;
- des interactions TAO (Terre-Atmosphère-Océan) : par exemple l'altitude de Brest varie beaucoup et celle de Rennes beaucoup moins.

La Terre ainsi « solidifiée » par ces différentes « réductions-d'erreurs-systématiques », il ne reste plus qu'à étudier l'action des astres sur ce solide, repéré par ses angles d'Euler (voir rotation).

Longueur du jour

La « longueur » du vecteur rotation, soit $\omega = 2\pi/T$ donne la longueur du jour stellaire T , c'est-à-dire l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs de la même étoile au méridien. Il est proche du jour sidéral, l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du point vernal (animé de la précession) au méridien. Cependant on utilise la longueur du jour solaire LOD = 1,002 737 811 911 354 48 T (de l'anglais « Length of Day »), qui est l'intervalle de temps séparant deux passages consécutifs du « soleil moyen » au méridien. Le LOD vaut 86 400 s TAI (le jour atomique) à plus ou moins 5 ms près. L'International Earth Rotation Service détermine quotidiennement l'écart du LOD avec le jour atomique. Cet écart présente une variation saisonnière de l'ordre de la milliseconde, à laquelle se superposent des oscillations à plus long terme entre 10 et 70 ans, atteignant 5 ms et difficilement prévisibles. Selon la théorie commune, ces oscillations sont provoquées par le couplage entre le noyau fluide et le manteau. Sur des échelles de temps encore plus grandes, la décélération de la rotation terrestre devient prédominante et entraîne une augmentation de la longueur du jour de deux à quatre millisecondes sur deux siècles. La longueur du jour est mesurée grâce à la technique GPS et les tirs lasers sur satellites artificiels avec une précision de l'ordre de 0,020 ms = 20 μ s. On peut ainsi calculer l'écart de la longueur du jour par rapport au jour atomique.

Herpolhodie

C'est le mouvement angulaire du vecteur rotation dans l'espace (plus précisément le système de référence céleste). Il est caractérisé par sa précession de période 26 000 ans, déjà détectée par Hipparque, et sa nutation. Il existe des irrégularités, car la Terre n'est pas totalement un solide.

Polhodie

De pôle hodos (le chemin) : C'est le mouvement du vecteur rotation dans le système de référence terrestre (ITRF : *international terrestrial reference frame*, défini correctement (la tectonique des plaques de quelques centimètres par an oblige sur un sol aussi mouvant d'avoir une convention précise si l'on veut détecter un mouvement au millimètre près). À l'heure actuelle, ce mouvement est relevé très précisément par géodésie satellitaire et le VLBI.

Arrêt

La force de gravitation tend à synchroniser la rotation d'un satellite avec la rotation du corps autour duquel il est en orbite, jusqu'à ce que les deux corps apparaissent fixes dans le ciel vus l'un de l'autre. Or la Terre est un satellite du soleil et a elle-même un satellite (la lune), ce qui soumet la Terre à (principalement) deux influences opposées.

- En tant que membre du couple Terre-Lune, la Terre devrait tourner sur elle-même en un mois lunaire. La vitesse de rotation de la Terre étant actuellement plus grande, il y a un ralentissement de la Terre et l'énergie de rotation ainsi récupérée est transférée en énergie potentielle de la Lune, qui se traduit par un éloignement de la Lune (qui augmente la durée du mois lunaire).
- En tant que membre du couple Soleil-Terre, la Terre devrait tourner sur elle-même en une année (elle aurait alors par rapport au soleil une « face éclairée » et une « face cachée », comme actuellement la Lune vis-à-vis de la Terre)

Des calculs suggèrent qu'il faudra plusieurs milliards d'années pour arriver à une synchronisation, voire plus que la durée de vie estimée du Soleil. La rotation du soleil sur lui-même, celle de la Terre autour du soleil, et celle de la lune autour de la terre seraient alors identiques.

B) Orbite

L'**orbite de la Terre** désigne l'orbite de la Terre autour du Soleil. Ce mouvement périodique suit la forme d'une ellipse presque circulaire dont la période de révolution correspond à une année sidérale, soit un peu plus de 365 jours. Conjuguée avec l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre, l'orbite de la Terre entraîne le cycle annuel des saisons. Le mouvement de la Terre autour du Soleil s'effectue à une vitesse orbitale d'environ 30 km/s, entraînant à chaque année un parcours d'environ un milliard de km. Du point de vue du pôle Nord de la Terre, cette dernière parcourt son orbite dans le sens antihoraire. Cette direction correspond, à midi, à l'ouest d'un observateur situé sur l'équateur terrestre. L'orbite de la Terre se situe dans la zone habitable circumstellaire du Système solaire qui permet, notamment, la présence d'eau sous forme liquide à sa surface. Cependant, la variation périodique, sur des milliers d'années, de certains paramètres de l'orbite et de l'axe de rotation terrestres entraîne des périodes de glaciations plus ou moins étendues sur la planète. Décrite précisément à partir du XVII^e siècle, l'orbite de la Terre est la source de plusieurs étalons et référentiels, dont la durée de l'année, la longueur de l'unité astronomique, la valeur du parsec et le plan de l'écliptique.

Historique

La représentation de la Terre dans l'Univers a fait l'objet de plusieurs modèles au cours de l'histoire. L'idée que la Terre puisse être en mouvement et parcourir une orbite est relativement récente et n'est acceptée que depuis quelques centaines d'années. Elle réfère à l'héliocentrisme, qui place le Soleil au centre avec les planètes qui tournent autour, formant le Système solaire. Historiquement, l'héliocentrisme a été précédé par le géocentrisme, qui plaçait la Terre au centre de l'Univers avec l'ensemble de la voûte céleste tournant autour. L'*Almageste* de Ptolémée, publié au II^e siècle, est la référence sur le sujet pendant plus de mille ans.



Système héliocentrique simplifié de Copernic extrait de Des révolutions des sphères célestes (1543)

Bien que des idées héliocentriques auraient été exprimées dès l'Antiquité, ce n'est qu'à partir du XVI^e siècle qu'elles sont considérées sérieusement, lors de la publication de *Des révolutions des sphères célestes* (1543) par Nicolas Copernic, qui lance la révolution copernicienne. Freiné par une conception circulaire des orbites, qui n'augmente pas la précision des observations par rapport au modèle géocentrique, ainsi que par les autorités religieuses de l'époque, l'héliocentrisme mettra encore plus d'une centaine d'années avant de s'imposer en Occident.

Au début du XVII^e siècle, Johannes Kepler affirme que les orbites des planètes sont des ellipses. L'astronome établit les lois de Kepler, qui permettent de décrire la position des planètes avec une précision beaucoup plus grande que celle donnée par les modèles géocentrique et héliocentrique circulaire. Ces lois seront expliquées plus tard par la loi universelle de la gravitation, exposée par Isaac Newton dans les *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Cette dernière consolidera définitivement l'héliocentrisme comme modèle décrivant l'organisation des corps du Système solaire.

Caractéristiques physiques

La Terre effectue un tour complet tous les 365,256363004 jours, ce qui correspond à une année sidérale. La vitesse orbitale de la Terre est de 29,78 km/s, ce qui est assez rapide pour couvrir le diamètre de la planète (12 700 km) en sept minutes ou parcourir la distance Terre-Lune (~384 000 km) en quatre heures. Du point de vue des pôles nord de la Terre et du Soleil, la Terre tourne dans le sens antihoraire sur son orbite et sur son axe, tout comme le Soleil tourne en sens antihoraire sur son axe selon ce point de vue. Ce parcours suit la forme d'une ellipse d'une excentricité d'environ 0,0167. L'orbite de la Terre n'est donc pas un cercle parfait avec pour milieu le Soleil. Le Soleil est plutôt déphasé sur l'un des foyers de l'ellipse. Le schéma suivant montre la relation entre la ligne des solstices, la ligne des équinoxes et la ligne des apsides de l'orbite de la Terre. Le périhélie se situe entre le 2 et le 5 janvier, alors que l'aphélie se situe entre le 3 et le 5 juillet. Les solstices se situent entre le 20-21 juin et le 21-22 décembre, alors que les équinoxes se situent entre le 19-21 mars et le 22-23 septembre. À long terme, les caractéristiques physiques de l'orbite de la Terre ne sont pas stables. Elles sont influencées, notamment, par l'interaction gravitationnelle que s'exercent entre eux les corps célestes.

Caractéristiques futures

Des mathématiciens et astronomes tels Laplace, Lagrange, Gauss, Poincaré, Kolmogorov, Vladimir Arnold et Jürgen Moser, ont cherché à prouver la stabilité des mouvements planétaires. Cela a conduit à de nombreux développements mathématiques montrant une certaine stabilité des orbites planétaires du Système solaire. Cependant, le problème s'assimile à un problème à N corps, pour lequel il n'existe pas de nos jours de solution exacte. Par contre, une étude de Jacques Laskar publiée en 1989 montre que le Système solaire, et plus particulièrement le Système solaire interne (Mercure, Vénus, Terre et Mars), est chaotique à partir d'une échelle de temps de quelques dizaines de millions d'années, avec un temps de Lyapounov (en) évalué à 5 millions d'années.

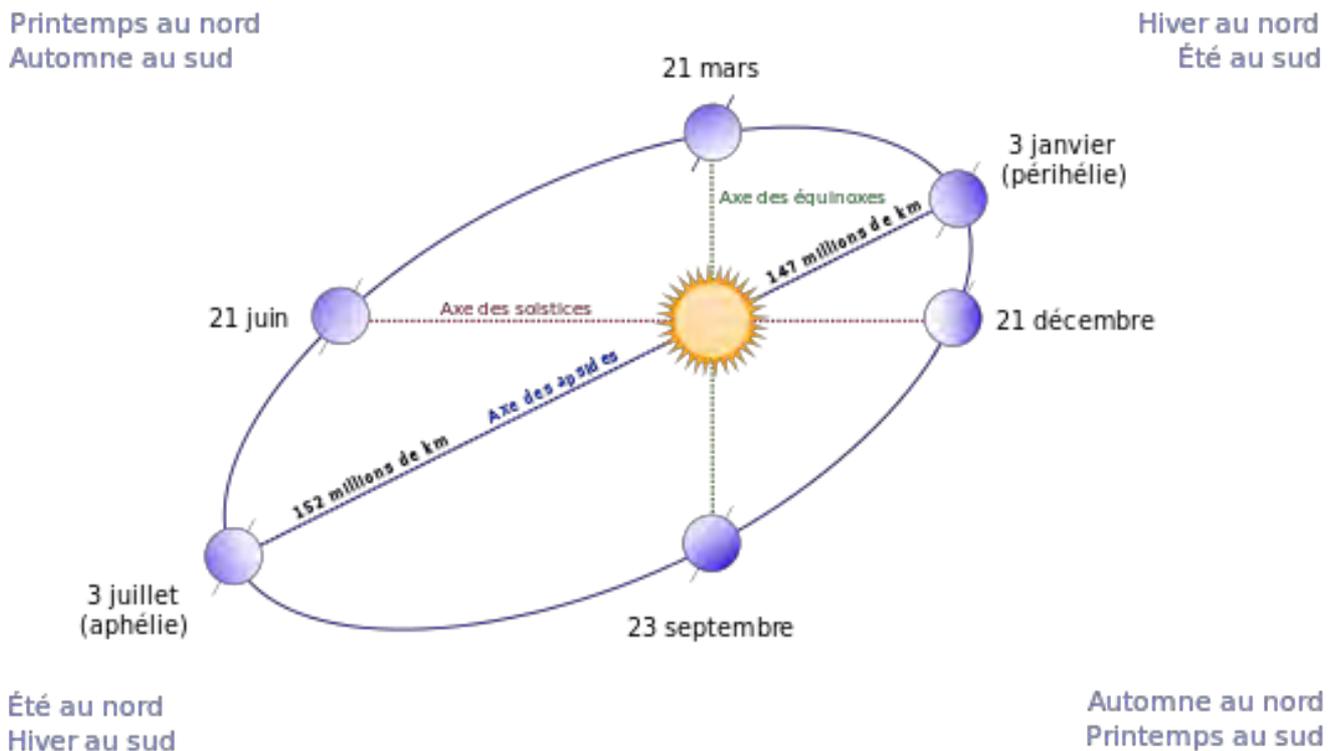


Schéma de l'orbite de la Terre. La forme elliptique est ici **très fortement** exagérée

C) Inclinaison de l'axe et saisons

L'**inclinaison de l'axe** ou **obliquité** est une grandeur qui donne l'angle entre l'axe de rotation d'une planète (ou d'un satellite naturel d'une planète) et une perpendiculaire à son plan orbital. Dans le système solaire, les planètes ont des orbites qui se situent toutes à peu près dans le même plan. Celui de la Terre est appelé l'écliptique. Chaque planète tourne en outre autour de son axe de rotation, phénomène à

l'origine de la succession des jours locaux de chaque planète. Cet axe de rotation n'est jamais perpendiculaire au plan orbital de la planète, mais incliné d'un certain angle, très variable suivant les planètes du système solaire. Toujours suivant les planètes, cet axe est soumis au phénomène de la précession, de façon plus ou moins marquée. Mais en première approximation, cet axe de rotation garde à court terme une direction fixe dans l'espace. Dans le cas de la Terre, cet angle était de $23^{\circ} 26' 14,427''$ (ou 23.4373408135°) au 1^{er} janvier 2015, soit $0,468''$ de moins qu'il y a un an. Il est à noter que cette donnée tient compte de la nutation dont l'angle était de $-9,540''$ au 1^{er} janvier 2015. Par simplification de langage, on assimile parfois inclinaison de l'axe et inclinaison de l'écliptique. On parle aussi d'obliquité de l'écliptique. Du fait de la précession, l'inclinaison de l'axe de la Terre perd de nos jours environ $0,4680''$ par an. Selon Ptolémée, ce fut Ératosthène (v. 276 - v.194 av. J.-C.) qui fut le premier à démontrer l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur. Il établit sa valeur à $23^{\circ}51'$. Mais Pythéas avait déjà effectué ces calculs presque un siècle avant grâce à ses mesures faites à Marseille et validées par l'observation du soleil de minuit au-delà du cercle polaire lors de son expédition vers 325 à 300 av. J.-C. L'astronome danois Tycho Brahe la détermina en 1587 à $23^{\circ}30'30''$. C'est l'existence et le maintien de cette inclinaison naturelle qui entraîne, par le déplacement de la planète sur son orbite, la succession des saisons. Ainsi, pour la Terre, de mars à septembre, la partie nord du globe voit le Soleil plus haut à midi dans le ciel que la partie sud, et c'est l'été dans l'hémisphère nord. Comme les rayons solaires arrivent sur Terre avec un angle plus proche de 90° , une même unité de surface reçoit plus de rayons lumineux qu'à midi dans le sud à la même époque. Du fait de cette inclinaison, le Soleil se lève plus tôt, se couche plus tard, et les jours sont de fait plus longs. Les rayons solaires dans l'hémisphère sud sont beaucoup plus inclinés et arrosent une plus grande surface, ils distribuent donc moins de chaleur par unité de surface : c'est l'hiver. Le Soleil paraît aussi plus bas sur l'horizon et les jours sont plus courts, avec un astre qui se lève plus tard et se couche plus tôt. Ces effets sont d'autant plus prononcés que la latitude de l'observateur est grande. À l'équateur, l'effet est d'ailleurs strictement nul, et la durée du jour et de la nuit ne varie pas (même si la position du Soleil dans le ciel varie). Aux pôles, l'effet est extrême, si bien que le jour et la nuit y durent 6 mois chacun. D'un point de vue astronomique, on peut noter quatre points particuliers sur la trajectoire d'une planète en fonction de son inclinaison :

- lorsque le côté nord de l'axe de la Terre penche vers le Soleil, c'est le solstice de juin, le jour le plus long pour l'hémisphère Nord. Le Soleil à midi est au zénith du tropique du Cancer, qui a une latitude de $23^{\circ} 26' 15''$ nord. C'est le jour le plus court pour l'hémisphère Sud;
- lorsque le côté sud de l'axe de la Terre penche vers le Soleil, c'est le solstice de décembre, le jour le plus court pour l'hémisphère nord. Le Soleil à midi est au zénith du tropique du Capricorne, qui a une latitude de $23^{\circ} 26' 15''$ sud. C'est le jour le plus long pour l'hémisphère Sud;
- les deux autres points correspondent aux équinoxes de printemps et d'automne. L'axe se trouve alors dans un plan orthogonal à la direction du Soleil; la durée des jours est égale à celle des nuits, au nord comme au sud, et le Soleil à midi est au zénith de l'équateur.

En ce qui concerne la Terre, une propriété importante de l'obliquité est la variation cyclique de sa valeur : celle-ci varie entre $24,5044^{\circ}$ (ou $24^{\circ} 30' 16''$) et $22,0425^{\circ}$ (ou $22^{\circ} 2' 33''$), suivant un cycle de 41 000 années. Les saisons varient donc suivant les millénaires de forte inclinaison ou d'inclinaison plus faible, une inclinaison plus forte impliquant des saisons plus marquées. Ce caractère cyclique est utilisé en cyclostratigraphie. Il a été démontré récemment par J. Laskar que la Lune stabilise la valeur de l'obliquité autour de 23° , et l'empêche ainsi de varier de façon chaotique. D'après W.R. Ward, le rayon de l'orbite de la Lune (lequel est en permanence en train de croître à cause des effets de marées) passera de 60 à 66,5 fois le rayon de la Terre en environ 1,5 milliard d'années. Une résonance planétaire se produira alors, induisant des oscillations de l'inclinaison entre 22° et 38° . Ensuite, en approximativement 2 milliards d'années, quand la Lune atteindra la distance de 68 fois le rayon de la Terre, une autre résonance provoquera de plus grandes oscillations, entre 27° et 60° . Ceci aura des effets extrêmes sur le climat.

L'angle d'inclinaison de la Terre est relativement stable au cours du temps. L'inclinaison entraîne la nutation, un balancement périodique ayant une période de 18,6 années. L'orientation (et non l'angle) de l'axe de la Terre évolue et réalise un cycle complet en 25 771 années. Cette précession des équinoxes est la cause de la différence de durée entre une année sidérale et une année tropique. Ces deux mouvements sont causés par le couple qu'exercent les forces de marées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre. De plus, les pôles se déplacent périodiquement par rapport à la surface de la Terre

selon un mouvement connu sous le nom d'oscillation de Chandler. À l'époque moderne, la périhélie de la Terre a lieu vers le 3 janvier et l'aphélie vers le 4 juillet. Ces dates évoluent au cours du temps du fait de la précession et d'autres facteurs orbitaux qui suivent un schéma cyclique connu sous le nom de paramètres de Milanković.

1) Paramètres de Milanković

Les paramètres de Milanković sont le nom donné aux paramètres astronomiques terrestres qui ont un effet sur les changements climatiques. On parle aussi de **cycles de Milanković**. Ces paramètres sont l'excentricité, l'obliquité et la précession. La terminologie de « paramètres de Milanković » est surtout utilisée dans le cadre de la théorie astronomique des paléoclimats. Joseph-Alphonse Adhémar, James Croll et Milutin Milanković sont les principaux scientifiques ayant avancé l'idée que ces trois paramètres interviennent dans les variations climatiques naturelles, en particulier sur Terre. Cette hypothèse n'a été soutenue par des données expérimentales cohérentes qu'en 1976, avec l'article fondamental de Hays, John Imbrie et Shackleton. Ces changements climatiques naturels ont pour principale conséquence les périodes glaciaires et interglaciaires. Leur étude en termes de phénomènes périodiques est du ressort la cyclostratigraphie.

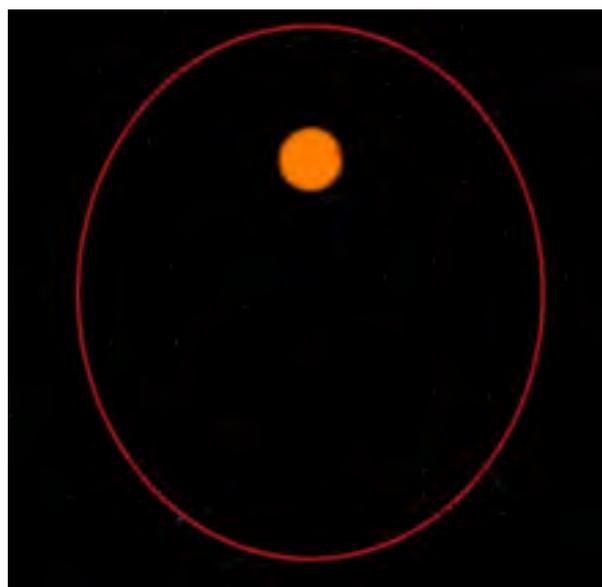
2) Les paramètres de la Terre

La théorie des paramètres de Milanković s'applique à toutes les planètes. Le climat de Mars a notamment été étudié. Pour la suite, nous étudierons le cas de la Terre en utilisant un système de coordonnées écliptiques dans lequel le soleil sera fixe. Lorsque cela n'est pas précisé, l'hémisphère nord est pris en exemple pour les étés ou les hivers.

3) L'excentricité de l'orbite terrestre



Excentricité nulle de l'orbite terrestre



Excentricité maximale

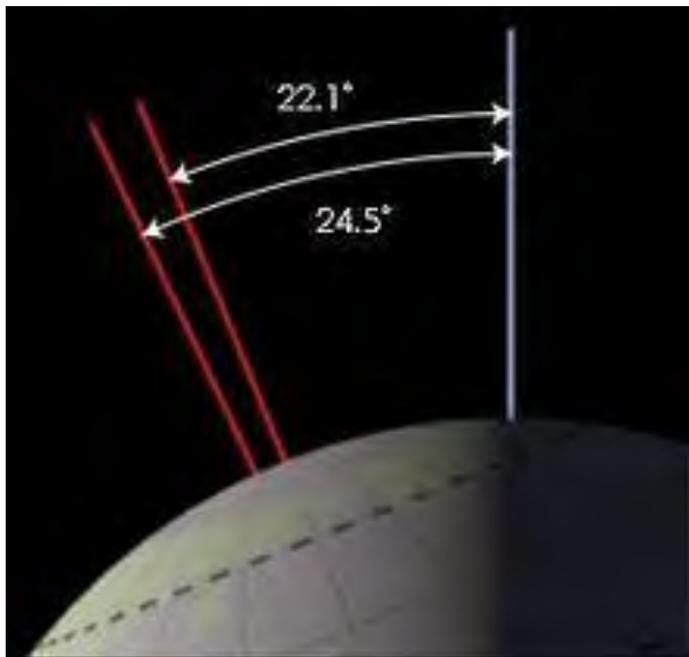
L'orbite terrestre décrit une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers. L'excentricité de l'ellipse est une mesure de la différence entre cette ellipse et le cercle. La forme de l'orbite terrestre varie dans le temps entre une forme quasi circulaire (excentricité faible de 0,005) et une forme plus elliptique (excentricité élevée de 0,058). La principale composante de cette variation fluctue sur une période de 413 000 ans. D'autres composants de cette variation fluctuent sur des périodes entre 95 000 et 125 000 ans. L'excentricité actuelle de la terre est de 0,017.

Cette excentricité est due aux attractions gravitationnelles exercées entre la Terre et les autres planètes du système solaire ainsi que le Soleil, selon les lois de Newton.

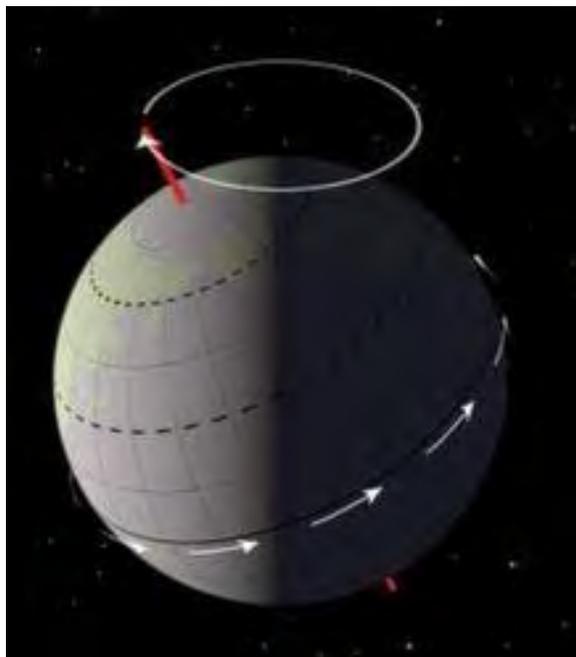
4) L'obliquité terrestre

L'obliquité de la terre, aussi appelée inclinaison terrestre, correspond à l'angle entre son axe de rotation et un axe perpendiculaire au plan de son orbite. L'obliquité terrestre varie entre $22,1^\circ$ et $24,5^\circ$ approximativement tous les 41 000 ans. Quand l'obliquité croît, les deux hémisphères reçoivent plus de radiation du soleil en été et moins en hiver. Cette obliquité est due elle aussi aux interactions

gravitationnelles que la Terre subit de la part des planètes. Cette variation est faible par rapport à la variation de l'obliquité martienne qui varie entre $14,9^\circ$ et $35,5^\circ$. Actuellement, la Terre possède une obliquité de $23,44^\circ$. Ce qui correspond à une valeur moyenne entre les deux extrema. L'obliquité est dans une phase descendante et atteindra son minimum dans environ 10 000 ans. En prenant comme seul paramètre d'influence l'obliquité, les étés deviendraient plus froids et les hivers plus chauds.



Variation de l'obliquité terrestre



La précession terrestre

5) La précession terrestre

La Terre ne tourne pas sur elle-même comme un ballon parfaitement sphérique mais plutôt comme une toupie car elle est soumise à la précession. Cette précession provient du fait que les attractions du Soleil et de la Lune ne sont pas uniformes sur Terre à cause du bourrelet équatorial de la Terre. Ceci a deux conséquences différentes :

- D'un côté, cela va influencer sur l'indication du Pôle Nord céleste (*quelle étoile nous indique le nord*). Reprenons pour cela notre toupie : *La toupie tourne dans un premier temps de façon droite puis, en perdant sa vitesse, sa tige va commencer à dessiner une sorte de cercle*. Cette tige sur Terre est en réalité l'axe nord-sud (passant par les deux pôles géographiques), cet axe dessine dans l'espace un cercle par rapport au pôle Nord céleste (*qui ne varie pas*). L'axe nord-sud effectue le cercle complet en 25 760 ans. Aujourd'hui, α Ursae Minoris, appelée étoile polaire, se situe à $0,8^\circ$ du pôle Nord céleste.

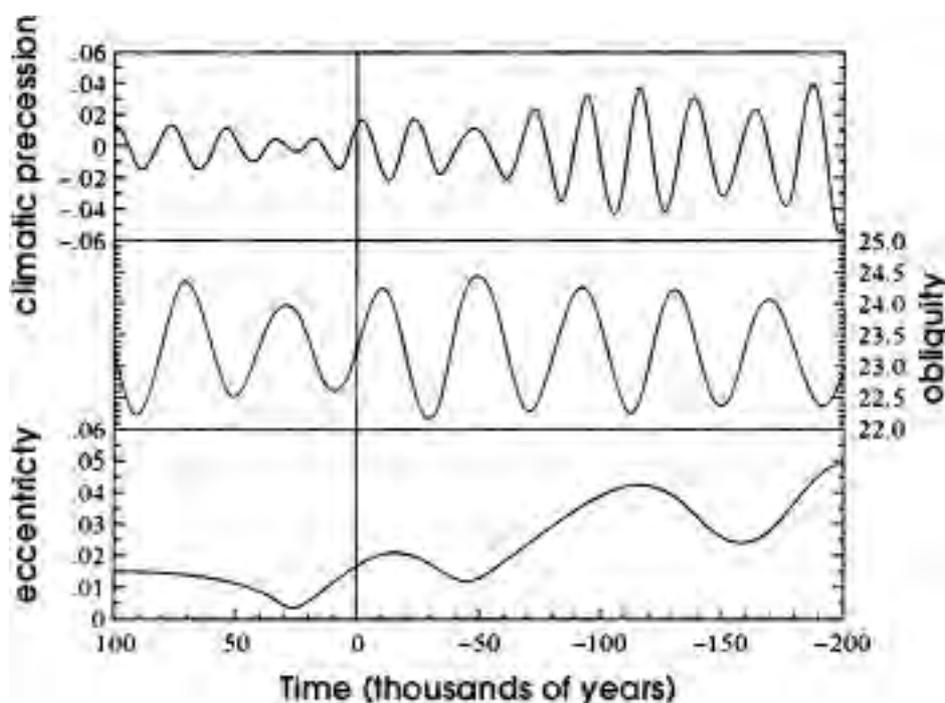
- D'un autre côté, cela influe sur ce que l'on appelle la précession des équinoxes (*ce qui détermine les « changements de saisons » astronomiquement parlant*). Le point vernal rétrograde (*se déplace vers l'ouest*) de $50,38''$ par an, mais la précession due aux autres planètes du système solaire (*donc hors Soleil et Lune*) est de $0,12''$ dans le sens inverse; donc la précession se fait de $50,26''$ par an vers l'ouest.

6) La nutation

La précession de l'axe de rotation terrestre dessine un cercle sur la sphère céleste. Cependant ce cercle n'est pas parfait. L'attraction de la Lune (et du Soleil mais dans une moindre mesure) implique ce qu'on appelle la nutation. En effet, la Lune attire la Terre (*nous pouvons d'ailleurs le voir avec le phénomène des marées*) et cette attraction se remarque par une légère oscillation (ayant la forme d'une sinusoïde) de l'axe de rotation terrestre. Cette oscillation parcourt un cycle complet en 18,6 années.

Le phénomène résulte du fait que l'influence de la Lune n'est pas toujours identique au cours du temps : elle est minimale lorsque la distance angulaire entre la Lune et l'équateur est la plus petite, elle est maximale lorsque la distance est la plus grande. Comme ce phénomène n'est pas très influent pour le sujet, nous allons l'ignorer pour les conséquences des paramètres de Milanković.

7) Les conséquences sur Terre



Les variations de tous les paramètres (Temps en milliers d'années)

a) Les conséquences de l'excentricité terrestre

L'excentricité est l'un des facteurs les plus importants dans les changements climatiques naturels puisque la Terre au périhélie peut recevoir de 20 à 30 % d'énergie (*émise par le Soleil*) de plus qu'à l'aphélie. Étant donné que l'excentricité n'est pas liée aux changements de saisons, cela peut avoir deux conséquences différentes :

- Si l'été correspond au périhélie et l'hiver à l'aphélie alors la Terre reçoit beaucoup d'énergie en été et moins en hiver, donc il y a des étés « chauds » et des hivers « froids ».
- Si par contre l'été correspond à l'aphélie et l'hiver au périhélie (*comme « plus ou moins » actuellement dans l'hémisphère nord*), la Terre reçoit peu d'énergie en été mais plus en hiver, donc les étés sont « frais » et les hivers sont « doux ».

b) Les conséquences de l'obliquité terrestre

L'obliquité possède une influence sur les saisons. En effet, si la Terre est dans une période de forte inclinaison par rapport au Soleil, alors les saisons seront très marquées (*différences importantes entre été et hiver*) et à l'inverse une faible inclinaison homogénéise les saisons (*peu de différences entre l'été et l'hiver*). Cependant, il faut préciser que ces différences se sentent seulement lorsque l'on s'éloigne de l'équateur, où l'obliquité a peu d'influence (*dans un climat équatorial on trouve 2 périodes très chaudes et très humides aux équinoxes et 2 périodes relativement froides et sèches aux solstices, dont l'intensité varie avec l'obliquité*).

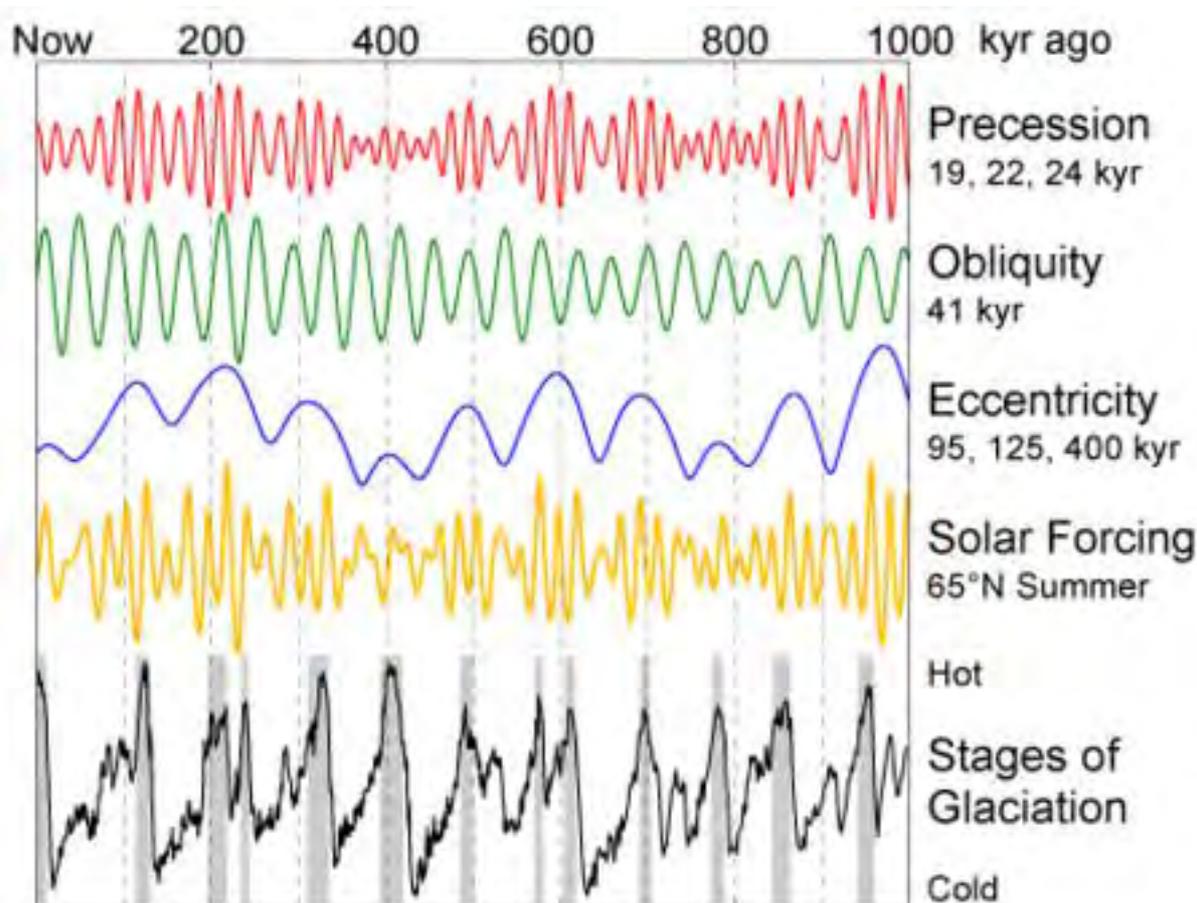
c) Les conséquences de la précession terrestre

La précession a deux conséquences. La première n'a aucune influence sur les changements climatiques, (*elle est indiquée pour information*), l'étoile qui pointe le pôle nord céleste change avec le temps. En effet, aujourd'hui il s'agit de α Ursæ Minoris (l'étoile polaire dans la Petite Ourse) mais dans 12 000 ans, ce sera Véga. Plus intéressant, la précession des équinoxes n'influence pas directement les changements de température ; en fait la précession est responsable de la date du changement de saisons (*printemps/été par exemple*). Il faut savoir que les saisons sont délimitées par ce que l'on appelle la ligne des solstices et la ligne des équinoxes : *Exemple simple : lorsque la Terre dépasse la ligne des solstices le jour du solstice d'été, la Terre rentre dans l'été*.

La précession agit donc sur la croix formée par ces lignes, elle la fait tourner autour du Soleil. En d'autres termes, le 21 juin n'est pas (*astronomiquement parlant*) toujours le jour du solstice d'été. De cela, nous

pouvons donc dire qu'une année selon le calendrier n'équivaut pas à une année astronomique. *Plus simplement, les 365,25 jours ne correspondent pas à un tour (parfait) de la Terre autour du Soleil.* Cet effet est donc indirect, mais pour les scientifiques, il est important.

d) Les conséquences de ces trois facteurs



Les variations et la conséquence sur la température. 1 kyr = 1 kiloyear = 1000 ans)

Ces trois facteurs combinés ont donc différentes conséquences :

- La variation d'énergie solaire reçue sous les hautes latitudes au cours de l'année.
- Les différences de température entre les continents et les océans à cause de l'albédo.
- Les variations sur les changements de saison (*plus élevées aux hautes latitudes*).
- Les différences de température entre les hémisphères dues à l'inclinaison.
- Par contre, ces paramètres n'ont aucune influence sur la quantité totale annuelle d'énergie solaire reçue par la Terre.

Confirmation de cette théorie

Suite au forage de Vostok (Antarctique), les chercheurs ont pu étudier le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (qui est noté $\delta^{18}\text{O}$) dans la glace extraite. Ils se sont aperçus que la courbe représentant le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ avait des similitudes avec la courbe issue des cycles de Milanković. Étant donné que la correspondance température / $\delta^{18}\text{O}$ est fermement établie, on peut alors penser que les paramètres de Milanković peuvent être la cause des changements climatiques naturels.

Depuis que ces variations orbitales sont établies, les scientifiques tentent de trouver un modèle capable de relier insolation à 65° et $\delta^{18}\text{O}$ marqueur des variations passées du climat. Ce n'est pas évident à trouver car la fonte d'un inlandsis est mal cernée. Dans le passé récent (-1 million d'années), la périodicité est de l'ordre de 100 000 ans avec environ 90 000 ans d'englacement et 10 000 de dégel ; mais au-delà, le forçage est plutôt à une période de 41 000 ans (c'est la transition du Pléistocène moyen), correspondant à un forçage plus direct par l'obliquité. Les forages benthiques permettent de remonter jusqu'au Néogène, ce qui a permis de fonder la nouvelle échelle de temps géologique (ATNTS 2004).

VI Habitabilité

A) Habitabilité d'une planète

L'**habitabilité d'une planète** est la mesure de la capacité d'un corps astronomique à développer et accueillir la vie. Cette notion peut donc être notamment utilisée à la fois pour les planètes et leurs satellites naturels. D'après les connaissances acquises par l'étude de la biologie terrestre, les éléments nécessaires au maintien de la vie sont une source d'énergie couplée à de la matière mobilisable, sachant que différents modèles sont proposés à l'appui de l'origine de la vie. Cependant, la notion d'habitabilité comme « possibilité d'accueillir la vie » est intrinsèquement limitée par la comparaison aux conditions biologiques terrestres, ce qui implique que plusieurs autres critères d'ordre géophysique, géochimique et astrophysique soient respectés. Dans la mesure où l'existence d'une vie extraterrestre est inconnue, l'habitabilité d'une planète est en effet en grande partie une extrapolation des conditions terrestres et des caractéristiques générales qui apparaissent favorables au développement de la vie au sein du Système solaire. L'eau liquide est notamment considérée comme un élément indispensable à un écosystème viable. La recherche dans ce domaine relève donc à la fois de la planétologie et de l'astrobiologie. L'idée que des planètes autres que la Terre puissent accueillir la vie est ancienne. Au cours de l'histoire, le débat a été autant philosophique que scientifique. La fin du XX^e siècle a été le théâtre de deux découvertes majeures. Tout d'abord, l'observation et l'exploration par des sondes de planètes et satellites du Système solaire ont fourni des informations essentielles qui ont permis de définir des critères d'habitabilité et des comparaisons géophysiques entre la Terre et les autres corps célestes. D'autre part, la découverte de planètes extrasolaires, qui a débuté en 1995 et s'est accélérée depuis, a été le second tournant important. Elle a confirmé que le Soleil n'est pas la seule étoile à abriter des planètes et a élargi le champ des recherches sur l'habitabilité au-delà du Système solaire.

B) Systèmes planétaires appropriés

Définir la notion d'*habitabilité d'une planète* commence par l'étude des étoiles. L'habitabilité d'une planète dépend en effet en grande partie des caractéristiques du système planétaire (et donc de l'étoile) qui l'abrite. Lors du projet Phoenix du programme SETI, les scientifiques Margaret Turnbull et Jill Tarter développèrent la notion d'*HabCat* (pour Catalogue de systèmes stellaires habitables) en 2002. Le catalogue fut constitué en extrayant les 120 000 étoiles les plus proches de la Terre du catalogue Hipparcos. Ensuite, une sélection plus précise a permis d'isoler 17 000 *HabStars*. Le choix des critères fut un bon point de départ pour comprendre quelles caractéristiques astrophysiques sont nécessaires pour accueillir des planètes habitables.

C) Classe spectrale

La classe spectrale d'une étoile indique la température de la photosphère, qui pour les étoiles de la séquence principale est liée à leur masse. On estime actuellement que le domaine spectral approprié pour les étoiles susceptibles d'accueillir des systèmes abritant la vie (*HabStars*) va du début de la classe « F » ou « G » jusqu'à « mi-K ». Cela correspond aux températures allant d'un peu plus de 7 000 K à un peu plus de 4 000 K. Le Soleil, étoile de la classe G2, est à dessein au milieu de ce domaine. Les étoiles de ce type ont un certain nombre de particularités qui sont importantes du point de vue de l'habitabilité des planètes :

- Elles brûlent au moins quelques milliards d'années, ce qui laisse suffisamment de temps à la vie pour se développer. Les étoiles de la séquence principale plus lumineuses, celles des classes « O », « B » et « A », brûlent en général moins d'un milliard d'années et dans certains cas moins de 10 millions d'années.
- Elles émettent suffisamment de rayons ultraviolets pour initier d'importantes réactions dans l'atmosphère, telles que la formation de l'ozone, mais pas trop, car cela détruirait la vie.
- L'eau liquide peut exister à la surface de planètes orbitant à une distance qui n'entraîne pas de rotation synchrone.

Ces étoiles ne sont ni « trop chaudes », ni « trop froides », et brûlent suffisamment longtemps pour que la vie ait une chance d'y apparaître. Ce type d'étoiles constitue probablement 5 à 10 % des étoiles de notre galaxie. Par contre, la question de savoir si les étoiles moins lumineuses, c'est-à-dire celles entre la fin de

la classe K et la classe M (les naines rouges), sont également susceptibles d'accueillir des planètes habitables reste ouverte. Elle est cependant cruciale, car la majorité des étoiles sont de ce type.

D) Zone habitable stable

La zone habitable (HZ en anglais) est un domaine théorique à proximité de l'étoile au sein duquel toutes les planètes présentes pourraient disposer d'eau liquide à leur surface. Après une source d'énergie, l'eau liquide est considérée comme l'élément le plus important pour la vie, en grande partie en raison du rôle qu'elle joue sur Terre. Il est possible que cela ne soit que le reflet d'un biais dû à la dépendance à l'eau des espèces terrestres. Si des formes de vie étaient découvertes sur des planètes dont l'eau est absente (par exemple, dans de l'ammoniac), la notion de zone habitable devrait être profondément révisée et même entièrement écartée car trop restrictive.

Une zone habitable « stable » présente deux particularités :

1°) sa localisation doit peu varier au cours du temps. La luminosité des étoiles augmente avec leur âge et une zone habitable donnée s'écarte de l'étoile au fur et à mesure. Si cette migration est trop rapide (par exemple, pour une étoile super-massive), les planètes ne sont dans la zone habitable que pour une très courte durée, ce qui réduit considérablement la probabilité que la vie s'y développe. Déterminer la zone habitable et son déplacement au cours de la vie de l'étoile est très difficile : des rétroactions, telles que celles dues au cycle du carbone ont tendance à compenser l'impact de l'augmentation de la luminosité. Ainsi, de même que l'évolution de l'étoile, les hypothèses faites sur les conditions atmosphériques et la géologie de la planète ont une très grande influence sur le calcul d'une zone habitable. En effet, les paramètres proposés pour calculer la zone habitable du Soleil ont fortement varié tandis que cette notion se développait.

2°) aucun corps de masse importante tel qu'une planète gazeuse géante ne doit être présent dans la zone habitable ou à proximité de celle-ci : sa présence pourrait empêcher la formation de planètes telluriques. Si, par exemple, Jupiter était apparue dans la région qui est actuellement entre les orbites de Vénus et la Terre, celles-ci n'auraient probablement pas pu se former (*sauf en tant que satellite de cette planète*). Si à une certaine époque, les scientifiques supposaient que la combinaison *planète tellurique sur les orbites intérieures - planètes géantes gazeuses sur les orbites extérieures* était la norme, les découvertes récentes de planètes extrasolaires ont contredit cette hypothèse. De nombreuses planètes gazeuses géantes ont été trouvées sur des orbites proches de leur étoile, annihilant toute zone habitable potentielle.

Les données actuelles sur les planètes extrasolaires sont probablement biaisées car les grosses planètes ayant des orbites excentriques et proches de l'étoile sont plus faciles à trouver que les autres. À ce jour, il n'a pas encore été possible de déterminer quel type de système planétaire est le plus courant.

E) Faible variation de luminosité

Toutes les étoiles connaissent des variations de luminosité, mais l'amplitude de ces fluctuations est très différente d'une étoile à l'autre. La plupart des étoiles sont relativement stables, mais une minorité significative d'entre elles est variable et présente souvent de soudaines et intenses augmentations de luminosité. Par conséquent, la quantité d'énergie radiative que reçoivent les corps en orbite connaît de brusques variations. Ces dernières sont donc de mauvaises candidates pour accueillir des planètes capables d'accueillir la vie dans la mesure où les forts changements de flux énergétiques auraient un impact négatif sur la survie des organismes. Par exemple, des êtres vivants adaptés à un domaine de température particulier auraient probablement du mal à survivre à d'importantes variations de température. De plus, les sursauts de luminosité sont généralement accompagnés par l'émission de doses massives de rayons gamma et de rayons X, radiations qui pourraient être létales. L'atmosphère des planètes pourrait atténuer de tels effets (une augmentation de 100 % de la luminosité solaire, soit un *doublement*, n'implique qu'une augmentation primaire de « seulement » ~20 % de la température (absolue) sur Terre, soit ~50 °C), mais il est également possible que de telles planètes ne soient pas capables de retenir leur atmosphère car les fortes radiations la frappant à répétition pourraient la disperser. Le Soleil ne connaît pas ce type de variations : au cours du cycle solaire, l'écart entre les luminosités minimum et maximum est d'environ 0,1 %. Il existe des preuves importantes (et contestées) que les changements de luminosité du Soleil, bien que mineurs, ont eu un effet significatif sur le climat terrestre durant la période historique. Le petit âge glaciaire pourrait avoir été causé par la diminution de la

luminosité solaire sur une longue durée⁵. Ainsi, il n'est pas nécessaire qu'une étoile soit une étoile variable pour que ses changements de luminosité affectent l'habitabilité. Parmi les analogues solaires connus, celui qui ressemble le plus fortement au Soleil est 18 Scorpii. La grande différence entre les deux étoiles est l'amplitude du cycle solaire qui est bien plus grande sur 18 Scorpii, ce qui diminue considérablement la probabilité que la vie puisse se développer sur son orbite.

F) Métallicité élevée

Si les éléments les plus abondants dans une étoile sont toujours l'hydrogène et l'hélium, il existe une grande variation dans la quantité d'éléments métalliques (en astronomie, on appelle « métal » ou qualifie de « métallique » tout élément plus lourd que l'hélium) qu'elles contiennent. Une proportion élevée de métaux dans une étoile correspond à la quantité d'éléments lourds présents dans le disque protoplanétaire initial. D'après la théorie de formation des systèmes planétaires au sein des nébuleuses solaires, une faible quantité de métaux dans l'étoile diminue significativement la probabilité que des planètes se forment autour. Toute planète s'étant formée autour d'une étoile pauvre en métaux est probablement de faible masse, et par là même serait défavorable à la vie. Des études spectroscopiques de systèmes dans lesquels des exoplanètes ont été trouvées confirment la relation entre un taux élevé en métaux et la formation de planètes : « les étoiles avec des planètes, ou du moins avec des planètes similaires à celles que nous trouvons actuellement, sont clairement plus riches en métaux que les étoiles sans compagnon planétaire ». L'influence de la métallicité est discriminante quant à l'âge potentiel des étoiles habitables : les étoiles formées au début de l'histoire de l'univers ont des faibles taux de métaux et une probabilité correspondante d'accueillir des compagnons planétaires.

G) Systèmes binaires

Les estimations actuelles suggèrent qu'au moins la moitié des étoiles sont dans des systèmes binaires, ce qui complique sérieusement la délimitation de la notion d'habitabilité. La distance entre les deux étoiles d'un système binaire est comprise entre une unité astronomique et quelques centaines. Si la séparation entre les deux étoiles est grande, l'influence gravitationnelle de la seconde étoile sur une planète tournant autour de la première étoile sera négligeable : son habitabilité n'est pas modifiée à moins que l'orbite soit fortement excentrique. Cependant, lorsque les deux étoiles sont plus rapprochées, la planète ne pourrait avoir une orbite stable. Si la distance entre une planète et son étoile principale excède un cinquième de la distance minimale entre les deux étoiles, la stabilité orbitale de la planète n'est pas garantie. Il n'est pas sûr que les planètes puissent se former dans un système binaire car les forces gravitationnelles pourraient gêner la formation des planètes. Des travaux théoriques d'Alan Boss (en) du Carnegie Institute ont montré que des géantes gazeuses peuvent se former autour des étoiles de systèmes binaires de façon similaire à leur formation autour des étoiles solitaires. Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, souligne le fait que les étoiles binaires ne doivent pas être systématiquement écartées lors de la recherche de planètes habitables. Centauri A et B ont une distance minimale de 11 UA (23 UA en moyenne) et toutes deux devraient avoir des zones habitables stables. Une simulation de la stabilité orbitale à long terme de planètes dans ce système montre que des planètes situées à environ 3 UA d'une des deux étoiles peuvent rester sur une orbite stable (c'est-à-dire que le demi-grand axe dévie de moins de 5 %). La zone habitable de Centauri A serait au moins de 1,2 à 1,3 UA et celle de Centauri B de 0,73 à 0,74 UA.



Vue d'artiste des trois étoiles de l'exoplanète HD 188753 Ab

H) Caractéristiques planétaires

L'hypothèse principale faite sur les planètes habitables est qu'elles sont telluriques. De telles planètes, dont la masse serait du même ordre de grandeur que celle de la Terre, sont principalement composées de silicates et n'ont pas conservé des couches gazeuses externes d'hydrogène et d'hélium comme les planètes gazeuses. Une forme de vie qui résiderait dans les couches supérieures de nuages des géantes gazeuses n'est pas exclue, bien que ce soit considéré comme improbable étant donné l'absence de surface solide, donc de milieu fixe préservant une homéostasie, la gravité n'est pas un obstacle majeur. Par contre, les satellites naturels de telles planètes pourraient très bien accueillir la vie; cependant, il se pourrait bien qu'ils présentent une caractéristique de masse défavorable : ils ne pourraient rarement atteindre et dépasser la masse de Mars (voir la section *Masse*).

Lors de l'analyse des environnements probablement capables d'accueillir la vie, on distingue en général les organismes unicellulaires tels que les bactéries et les archaea des formes de vie animales, plus complexes. L'unicellularité précède nécessairement la multicellularité dans tout arbre phylogénétique hypothétique et l'apparition d'organismes unicellulaires n'entraîne pas nécessairement l'apparition de formes de vie plus complexes. Les caractéristiques planétaires listées plus bas sont considérées comme essentielles pour la vie, mais dans tous les cas, les conditions d'habitabilité d'une planète seront plus restrictives pour les organismes multicellulaires tels que les plantes et les animaux que pour la vie unicellulaire.

I) Masse

Les planètes de faible masse seraient de mauvaises candidates pour accueillir la vie pour deux raisons. Tout d'abord, leur gravité plus faible tend à rendre leur atmosphère plus ténue. Les molécules constitutives de la vie ont une probabilité beaucoup plus élevée d'atteindre la vitesse de libération et d'être éjectées dans l'espace lorsqu'elles sont propulsées par le vent solaire ou par une collision. Les planètes dont l'atmosphère n'est pas épaisse ne disposeraient pas de suffisamment de matière pour la biochimie initiale, ont peu d'isolation et un mauvais transfert thermique à travers leur surface (par exemple, Mars avec sa fine atmosphère, est plus froide que l'aurait été la Terre à la même distance) et moins de protection contre les radiations haute-fréquence et les météoroïdes. De plus, les planètes plus petites ont un diamètre plus petit et donc de plus grands ratios surface-volume que leurs cousines de grande taille. De tels corps ont tendance à voir leur énergie s'échapper beaucoup plus rapidement après leur formation et ont donc peu d'activité géologique. Ils n'ont pas de volcans, de tremblements de terre et d'activité tectonique qui fournissent à la surface des éléments favorisant la vie et à l'atmosphère des molécules régulant la température (comme le dioxyde de carbone).

Le terme « faible masse » n'est que relatif : la Terre est considérée de faible masse lorsqu'elle est comparée aux planètes géantes du Système solaire, mais est la plus grande, la plus massive et la plus dense des planètes telluriques. Elle est suffisamment grande pour que sa gravité retienne son atmosphère et pour que son noyau liquide continue à rester actif et chaud, engendrant ainsi une activité géologique à la surface (la désintégration des éléments radioactifs au cœur de la planète est l'autre source de chaleur des planètes). Mars, au contraire, est presque (ou peut-être totalement) inactive et a perdu la majeure partie de son atmosphère. Ainsi, il semble que la masse minimale d'une planète pour qu'elle soit habitable se situe quelque part entre celle de Mars et celle de la Terre (ou Vénus), $\geq 1/2$ masse terrestre (?). Toutefois, cette règle peut admettre des exceptions : Io, un satellite de Jupiter plus petit que les planètes telluriques, a une activité volcanique en raison des contraintes engendrées par l'influence gravitationnelle jovienne. Sa voisine, Europe, pourrait abriter un océan liquide sous sa surface glacée en raison de l'énergie créée par le champ de gravitation jovien et les interactions avec Io et Ganymède. Pour une raison différente, une des lunes de Saturne, Titan, est d'intérêt certain : elle a conservé une atmosphère épaisse et les réactions biochimiques sont possibles dans le méthane liquide à sa surface. Ces satellites sont des exceptions, mais ils prouvent que la masse ne doit pas être considérée comme discriminante en termes d'habitabilité. Il faut aussi spécifier ce qu'on recherche; possibilité de vie(s), microbiennes, pluricellulaire, ou animale complexe pouvant mener vers une civilisation technologique.

Enfin, une grosse planète aura probablement un grand noyau composé de fer. Ce dernier crée un champ magnétique qui protège la planète du vent solaire, qui en son absence aurait tendance à « éroder »

l'atmosphère planétaire et à bombarder de particules ionisées les êtres vivants. La masse n'est pas le seul élément à prendre en compte pour déterminer l'existence d'un champ magnétique. La planète doit aussi avoir un mouvement de rotation suffisamment rapide pour produire un effet dynamo au sein de son noyau.



Mars, avec son atmosphère ténue, est plus froide que l'aurait été la Terre à la même distance

J) Orbite et rotation

Comme pour d'autres critères, la stabilité serait primordiale pour les orbites et la rotation d'une planète afin qu'elle soit habitable. Plus grande est l'excentricité orbitale, plus grande est la fluctuation de la température à la surface de la planète. Bien qu'ils s'adaptent, les organismes vivants ne peuvent supporter une trop grande variation, notamment si celle-ci recouvre à la fois le point d'ébullition et le point de fusion du principal solvant biotique de la planète (sur Terre, l'eau). Si, par exemple, les océans de notre planète se vaporisaient (même partiellement) et congelaient tour à tour, il serait difficile d'imaginer que la vie telle qu'on la connaît aurait pu y évoluer. L'orbite de la Terre est presque circulaire, son excentricité étant de moins de 0,02. Les autres planètes du Système solaire (à l'exception de Mercure) ont des excentricités similaires. Les données recueillies sur les excentricités des planètes extrasolaires ont surpris la plupart des chercheurs : 90 % ont des excentricités plus grandes que celles des planètes du Système solaire, la moyenne étant de 0,25. Cette caractéristique pourrait être due à un simple biais d'observation car une forte excentricité augmente l'oscillation de l'étoile et facilite donc la détection de la planète.

Le mouvement d'une planète autour de son axe de rotation doit sans doute respecter certaines caractéristiques pour que la vie ait une chance d'évoluer.

- La planète ne doit pas conserver une même face tournée vers son étoile, sinon, la face éclairée serait très chaude, desséchée, et la face obscure, gelée, conserverait toute l'eau, sous forme de glace.
- Le cycle jour-nuit ne doit pas être trop long. Si un jour prend plus d'une (à 2) semaines (terrestres), la différence de température entre la partie éclairée et la partie sombre sera élevée et les problèmes sont similaires à ceux d'une très grande excentricité orbitale.
- La planète doit avoir des saisons modérées. S'il y a un peu d'inclinaison axiale (par rapport à la perpendiculaire à l'écliptique), les saisons ne seront pas prononcées et un des principaux stimulants du dynamisme de la biosphère disparaîtra; de telles planètes seront en général plus froides que si elles avaient été plus inclinées. Si une planète a une forte inclinaison, les saisons seront extrêmes et l'homéostasie de la biosphère aura du mal à s'exercer. À l'heure actuelle, les effets exacts de ces changements peuvent seulement être simulés : des études ont montré que même des inclinaisons extrêmes (jusqu'à 85 °) pourraient être compatibles avec la vie pourvu « qu'elle n'occupe pas les continents exposés chaque saison à la température la plus élevée ».
- L'oscillation doit rester faible. Le cycle de précession de la Terre dure 23 000 ans. S'il était beaucoup plus court ou si l'oscillation était plus importante, des changements climatiques importants affecteraient grandement l'habitabilité.

La Lune semble jouer un rôle crucial dans la régulation du climat terrestre en stabilisant l'inclinaison de l'axe de rotation. Il a été suggéré qu'une planète dont l'inclinaison aurait un mouvement chaotique ne pourrait accueillir la vie : un satellite de la taille de la Lune pourrait être non seulement utile, mais même indispensable pour permettre l'habitabilité. Cette thèse est cependant controversée.

K) Géochimie

On estime en général que toute vie extraterrestre devrait être bâtie sur la même chimie que celle de la Terre : c'est la thèse émergente du chauvinisme du carbone. Les quatre éléments les plus importants pour la vie terrestre (le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote) sont aussi les quatre éléments chimiques réactifs les plus abondants dans l'Univers. En effet, des molécules prébiotiques simples, telles que les acides aminés, ont été trouvées dans des météorites et dans l'espace interstellaire. En masse, ces quatre éléments constituent environ 96 % de la biomasse terrestre. Les atomes de carbone ont une capacité incomparable à établir des liaisons chimiques entre eux et à former de grandes structures complexes, ce qui les rend idéaux pour être la base des mécanismes complexes qui constituent les êtres vivants. L'eau, composée d'oxygène et d'hydrogène, constitue le solvant dans lequel les processus biologiques et les premières réactions menant à l'apparition de la vie se sont produits. L'énergie provenant de la liaison covalente entre les atomes de carbone et ceux d'hydrogène libérés par la dissociation des glucides et d'autres molécules organiques est le carburant de toutes les formes de vie complexes. Ces quatre éléments s'associent pour former des acides aminés, qui eux-mêmes constituent des protéines, composants essentiels des organismes vivants.

Les abondances relatives des différents éléments dans l'espace ne sont pas toujours similaires sur les différentes planètes. Par exemple, des quatre éléments sus-mentionnés, seul l'oxygène est présent en grande quantité dans la croûte terrestre. Cela peut être en partie expliqué par le fait que beaucoup de ces éléments, tels que l'hydrogène et l'azote, ainsi que d'autres molécules simples, telles que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le méthane, l'ammoniac et l'eau, sont gazeux aux températures élevées. Dans les régions chaudes à proximité du Soleil, ces molécules volatiles n'ont pas joué un grand rôle dans la formation géologique des planètes. Elles étaient en effet piégées à l'état gazeux sous les croûtes nouvellement constituées. Celles-ci sont composées en grande partie de molécules non volatiles sous formes rocheuses, comme la silice (une molécule composée de silicium et d'oxygène dont la grande abondance dans la croûte terrestre explique celle de l'oxygène). Le dégazage des molécules volatiles par les premiers volcans aurait contribué à la formation de l'atmosphère des planètes. L'expérience de Miller-Urey a montré qu'avec un apport d'énergie, les acides aminés pouvaient être synthétisés à partir de molécules simples présentes dans l'atmosphère primaire. Même ainsi, le dégazage volcanique ne peut expliquer la quantité d'eau des océans terrestres. La majeure partie de l'eau nécessaire à la vie, et peut-être du carbone, est sans doute venue du Système solaire externe où, éloignée de la chaleur du Soleil, elle a pu rester solide. Les comètes, et les chondrites carbonées s'écrasant sur la Terre au début du Système solaire y auraient déposé de grandes quantités d'eau, ainsi que les autres molécules volatiles dont la vie a besoin (dont les acides aminés). Cela aurait permis l'apparition rapide de la vie sur Terre. Ainsi, bien qu'il soit probable que les quatre éléments principaux soient présents en d'autres endroits, un système habitable aurait besoin d'un apport continu de corps en orbite afin de fournir en éléments les planètes intérieures. Il est possible que la vie telle que nous la connaissons sur Terre n'existerait pas sans l'apport des comètes et des chondrites carbonées. La question de savoir si d'autres éléments pourraient servir de briques de base pour des formes de vie bâties sur une chimie différente reste toutefois débattue.

L) Autres considérations

1) Habitabilité des systèmes autour des naines rouges



Vue d'artiste d'une naine rouge.

Déterminer l'habitabilité des naines rouges pourrait aider à déterminer si la vie est courante dans l'Univers. En effet, les naines rouges représenteraient 80 à 85 % des étoiles de notre galaxie, ce qui correspondrait environ à « 160 milliards sur les 200 milliards d'étoiles dans la Voie lactée ».

Pendant des années, les astronomes ont écarté les naines rouges des systèmes potentiellement habitables. Leur petite taille (entre 0,1 et 0,6 masse solaire) correspond à des réactions nucléaires extrêmement lentes : elles émettent très peu de lumière (entre 0,01 et 3 % de celle du Soleil). Toute planète en orbite autour d'une naine rouge devrait être très près de son étoile-hôte pour avoir une température de surface comparable à celle de la Terre : de 0,3 UA (légèrement moins que Mercure) pour une étoile comme Lacaille 8760, à 0,032 UA (l'année d'une telle planète durerait 6 jours terrestres) pour une étoile comme Proxima du Centaure. À ces distances, la gravité de l'étoile engendre une rotation synchrone. Une moitié de la planète serait constamment éclairée, tandis que l'autre ne le serait jamais. La seule possibilité pour qu'une vie potentielle ne soit pas soumise à une chaleur ou un froid extrême est le cas où cette planète aurait une atmosphère suffisamment épaisse pour transférer la chaleur de l'hémisphère éclairé vers l'hémisphère nocturne. Pendant longtemps, on a supposé qu'une atmosphère aussi épaisse empêcherait la lumière de l'étoile d'atteindre la surface, rendant la photosynthèse impossible. De récentes découvertes tendent cependant à contester ce point de vue. Des études menées par Robert Haberle et Manoj Joshi du *Ames Research Center* de la NASA ont montré que l'atmosphère d'une planète autour d'une naine rouge aurait seulement besoin d'être 15 % plus épaisse que celle de la Terre pour permettre à la chaleur de l'étoile de se diffuser sur la face jamais éclairée. L'eau resterait gelée sur cette face dans certains de leurs modèles. Cette marge est par ailleurs tout à fait compatible avec la photosynthèse. Martin Heath du Greenwich Community College a montré que l'eau de mer pourrait également circuler sans geler entièrement du côté à l'ombre si les océans étaient suffisamment profonds sur cette face pour permettre un libre mouvement de l'eau sous la couche de glace située à la surface. Ainsi, une planète avec des océans et une atmosphère appropriés en orbite autour d'une naine rouge, pourrait, au moins en théorie, accueillir la vie. La taille n'est cependant pas le seul critère rendant la présence de vie improbable autour des naines rouges. Une planète autour d'une naine rouge ne serait éclairée que d'un seul côté et donc la photosynthèse serait impossible sur plus de la moitié de sa surface (le côté nocturne et les zones à l'ombre sur la face éclairée). De plus, les radiations d'une naine rouge sont principalement dans l'infrarouge alors que sur Terre, la photosynthèse utilise la lumière visible. Pourtant, une partie de son spectre est bien dans le visible (principalement dans le rouge) et la photosynthèse (terrestre) se fait une bonne part avec cette fenêtre spectrale. De plus, on peut imaginer un système utilisant le proche infrarouge. Les naines rouges sont beaucoup plus variables et violentes que leurs cousines plus grandes et plus stables. Elles sont souvent couvertes de taches solaires qui peuvent diminuer la lumière émise par l'étoile jusqu'à 40 % pendant quelques mois tandis qu'à d'autres périodes de gigantesques éruptions solaires doublent sa brillance en quelques minutes. De telles variations endommageraient fortement la vie, bien qu'il soit possible qu'elles stimuleraient l'évolution des espèces en augmentant le taux de mutation et en modifiant rapidement le climat. Les naines rouges ont cependant un avantage majeur sur les autres étoiles comme systèmes hôtes de la vie : elles brûlent très longtemps. L'humanité est apparue sur Terre 4,5 milliards d'années après la formation de notre planète et la vie telle que nous la connaissons disposerait de conditions adéquates autour de notre étoile pour seulement 500 millions à moins d'1 milliard d'années supplémentaires. Au contraire, les naines rouges peuvent brûler des dizaines de milliards d'années car les réactions nucléaires dont elles sont le siège sont beaucoup plus lentes que celles des plus grosses étoiles. La vie y disposerait donc de bien plus de temps pour se développer et pour évoluer. De plus, même si la probabilité de trouver une planète dans la zone habitable autour d'une naine rouge est faible, le nombre total de zones habitables autour des naines rouges est égal à celui des étoiles semblables au Soleil étant donné leur grand nombre.

2) Les naines brunes

Les naines brunes sont (peut-être) plus nombreuses que les naines rouges. Cependant, elles ne sont pas considérées comme des étoiles, car elles n'émettent que très peu de chaleur. En 2004, il est découvert la première exoplanète orbitant autour d'une naine brune, 2M1207b orbitant autour de 2M1207. La masse de ce corps est estimée entre 3 et 10 masses de Jupiter. Cette observation confirme la possibilité de présence de planètes autour des naines brunes, quoiqu'en théorie leur disque de poussière et de gaz soit peu massif

et se dissiperait avant la formation d'une planète de taille importante. Toutefois une naine brune étant beaucoup plus froide que notre Soleil, la zone habitable serait restreinte et très proche de la naine brune, et se réduirait à mesure de son refroidissement. Il est probable que les systèmes autour des naines brunes ne puissent pas héberger la vie, du moins telle que nous la connaissons.

3) « Bons Jupiters »

Les *Bons Jupiters* sont des planètes géantes gazeuses, comme la planète Jupiter de notre Système solaire, qui tournent autour de leur étoile sur des orbites circulaires, suffisamment loin de la zone habitable pour ne pas avoir un effet perturbateur, mais suffisamment proches pour « protéger » les planètes telluriques situées sur des orbites intérieures. Tout d'abord, elles stabilisent les orbites de ces planètes, et par là même leur climat. De plus, elles contribuent à limiter le nombre de comètes et d'astéroïdes qui pourraient causer des impacts dévastateurs sur une planète abritant la vie. Jupiter tourne autour du Soleil à une distance environ 5 fois plus grande que ne le fait la Terre (~5,2 ua). C'est à une distance comparable que les scientifiques espèrent trouver des « bons Jupiters » autour d'autres étoiles. Le rôle de Jupiter fut mis en lumière en 1994 lorsque la comète Shoemaker-Levy 9 s'y écrasa. Si la gravité jovienne n'avait pas capturé la comète, celle-ci aurait très bien pu entrer dans le Système solaire intérieur. De plus, il stabilise les astéroïdes en limitant la variabilité de leurs orbites, les plaçant en « familles » délimitées par les lacunes dites « de Kirkwood », réduisant par-là la fréquence des impacts sur les planètes telluriques.



Les planètes géantes gazeuses, comme Jupiter ont un rôle important dans un Système solaire

Aux premiers âges du Système solaire, Jupiter eut un rôle inverse : elle contribua à augmenter l'excentricité des orbites des objets de la ceinture d'astéroïdes. Un grand nombre d'entre eux s'écrasèrent sur la Terre et lui fournirent de grande quantité d'éléments volatils. Avant que la Terre n'atteigne la moitié de sa masse actuelle, les corps glacés de la région autour de Jupiter et Saturne et de petits corps de la ceinture d'astéroïdes initiale apportèrent de l'eau sur Terre en raison des perturbations gravitationnelles de leurs trajectoires engendrées par Jupiter et Saturne. Ainsi, alors que les géantes gazeuses sont désormais d'utiles protectrices, elles furent importantes en permettant l'apport de matière indispensable à l'habitabilité.

4) Le voisinage galactique

Des scientifiques ont aussi émis l'hypothèse que certaines zones de la galaxie (« zones galactiques habitables ») permettent mieux que d'autres l'existence de la vie. Le Système solaire dans lequel nous vivons, dans le bras d'Orion, sur un côté de la Voie lactée, est considéré comme étant un emplacement favorable. Très éloigné du centre galactique, il évite certains dangers :

- Il n'est pas dans un amas globulaire.
- Il n'est pas à proximité d'une source active de rayons gamma.

- Il est éloigné du trou noir supermassif communément associé à Sagittarius A*.
- L'orbite circulaire du Soleil autour du centre galactique ne le fait pas rencontrer un des bras spiraux de la galaxie, où les radiations intenses et la gravitation perturberaient considérablement toute forme de vie.

Un isolement stellaire relatif est en définitive ce dont un système où la vie est présente a besoin. Si le Système solaire était entouré de nombreux systèmes voisins, ceux-ci pourraient déranger la stabilité des orbites des objets du Système solaire (notamment les objets du nuage d'Oort et de la ceinture de Kuiper qui pourraient avoir des conséquences catastrophiques s'ils étaient déviés vers l'intérieur du Système solaire). Des proches voisins augmentent aussi la possibilité d'être dans la zone fatale d'un pulsar ou d'une explosion de supernova.

M) Indice d'habitabilité planétaire

L'indice d'habitabilité planétaire (en anglais : *PHI, Planetary Habitability Index*) est un indice proposé par certains exobiologistes et astrophysiciens. Il se distingue de l'indice de similarité avec la Terre, qui offre une vision davantage géocentrée.

Candidates

- Deux planètes telluriques autour de Gliese 581, une naine rouge à 20,5 années-lumière de la Terre, sont situées dans cette zone habitable : Gliese 581 c, Gliese 581 d. Gliese 581 d orbite à 0,22 UA de son étoile, qui est 77 fois moins lumineuse que le Soleil, ce qui donne une zone d'habitabilité plus resserrée.
- Le système planétaire constitué autour de l'étoile HD 10180 comporte lui aussi une planète comprise dans la zone d'habitabilité. Cette planète, HD 10180g, qui se situe 42,2 % plus loin (de son étoile) que la distance Terre-Soleil, est d'une masse d'environ 21,4 fois celle de la Terre. Une année sur cette planète durerait l'équivalent de 1,65 année terrestre (601,2 jours terrestres).
- La planète Gliese 1214 b est une super-Terre en orbite autour de Gliese 1214, une naine rouge située à 42 al, d'une taille de 21 % de celle du Soleil et d'une luminosité de 0,3 %. Elle est âgée de 6 milliards d'années, soit 1,5 de plus que le Soleil. Gliese 1214 est peut-être la première planète océan jamais découverte (planète complètement recouverte d'un profond océan d'eau). Elle pourrait potentiellement porter la vie.
- Une planète gazeuse qui orbite à 0,92 ua autour d'HD 28185, une étoile approximativement comparable au Soleil, se situe dans la zone d'habitabilité de son système stellaire et elle pourrait donc posséder un ou plusieurs satellites naturels potentiellement habitables.
- La planète HD 85512 b située à 36 années-lumière, et d'une masse 3,6 fois plus élevée que la Terre ferait le tour de son étoile, une naine orange HD 85512, en ~54,5 jours (terrestres). Elle se situerait sur le bord inférieur de la « zone habitable » entourant cette étoile. HD 85512 b est bien plus proche de son étoile que la Terre du Soleil, orbitant à 0,26 ua, mais elle reçoit aussi un peu plus de rayonnement de son étoile que la Terre du Soleil. Si cette planète possède une couverture nuageuse de 50 % afin de protéger la surface d'une partie des rayons de l'étoile ainsi qu'une atmosphère quasi-identique à celle de la Terre; compte tenu de ses caractéristiques, la vie pourrait y être possible. Mais il est tout aussi possible qu'elle ait une atmosphère épaisse avec un fort effet de serre, et qu'elle soit en fait une sorte d'exo-Vénus.

N) Les conditions de vie sur Terre

1) Biosphère

Les formes de vie de la planète sont parfois désignées comme formant une « biosphère ». On considère généralement que cette biosphère a commencé à évoluer il y a environ 3,5 milliards d'années. La biosphère est divisée en plusieurs biomes, habités par des groupes similaires de plantes et d'animaux. Sur terre, les biomes sont principalement séparés par des différences de latitudes, l'altitude et l'humidité. Les biomes terrestres se trouvant au-delà des cercles Arctique et Antarctique, en haute altitude ou dans les zones très arides sont relativement dépourvus de vie animale et végétale alors que la biodiversité est maximale dans les forêts tropicales humides.

2) Ressources naturelles

La Terre fournit des ressources qui sont exploitables par les humains pour diverses utilisations. Certaines ne sont pas renouvelables, comme les combustibles fossiles, qui sont difficiles à reconstituer sur une courte échelle de temps. D'importantes quantités de combustibles fossiles peuvent être obtenues de la croûte terrestre comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel ou les hydrates de méthane. Ces dépôts sont utilisés pour la production d'énergie et en tant que matière première pour l'industrie chimique. Les minerais se sont formés dans la croûte terrestre et sont constitués de divers éléments chimiques utiles comme les métaux. La biosphère terrestre produit de nombreuses ressources biologiques pour les humains comme de la nourriture, du bois, des médicaments, de l'oxygène et assure également le recyclage de nombreux déchets organiques. Les écosystèmes terrestres dépendent de la couche arable et de l'eau douce tandis que les écosystèmes marins sont basés sur les nutriments dissous dans l'eau. Les humains vivent également sur terre en utilisant des matériaux de construction pour fabriquer des abris. En 1993, l'utilisation humaine des terres était approximativement répartie ainsi :

Utilisation des terres	Terres arables	Cultures permanentes	Pâturages permanents	Forêts	Zones urbaines	Autre
Pourcentage	13,13 %	4,71 %	26 %	32 %	1,5 %	30 %

La superficie irriguée estimée en 1993 était de 2 481 250 km.

3) Risques environnementaux

D'importantes zones de la surface terrestre sont sujettes à des phénomènes météorologiques extrêmes comme des cyclones, des ouragans ou des typhons qui dominent la vie dans ces régions. Entre 1980 à 2000, ces événements ont causé environ 11 800 morts par an. De même, de nombreuses régions sont exposées aux séismes, aux glissements de terrain, aux éruptions volcaniques, aux tsunamis, aux tornades, aux dolines, aux blizzards, aux inondations, aux sécheresses, aux incendies de forêt et autres calamités et catastrophes naturelles. De nombreuses régions sont sujettes à la pollution de l'air et de l'eau créée par l'homme, aux pluies acides, aux substances toxiques, à la perte de végétation (surpâturage, déforestation, désertification), à la perte de biodiversité, à la dégradation des sols, à l'érosion et à l'introduction d'espèces invasives. Selon les Nations unies, un consensus scientifique existe qui lie les activités humaines au réchauffement climatique du fait des émissions industrielles de dioxyde de carbone, et plus généralement des gaz à effet de serre. Cette modification du climat risque de provoquer la fonte des glaciers et des calottes glaciaires, des amplitudes de température plus extrêmes, d'importants changements de la météorologie et une élévation du niveau de la mer.

4) Géographie humaine



Image composite de la Terre pendant la nuit réalisée par les satellites du DMSP en 1994-1995. Cette image n'est pas une photographie et de nombreux éléments sont plus lumineux que ce qu'ils apparaîtraient en cas d'observation directe

La Terre compte approximativement 7,16 milliards d'habitants en 2013. Les projections indiquent que la population mondiale atteindra 9,55 en 2050. La plupart de cette croissance devrait se faire dans les pays en développement. La densité de population humaine varie considérablement autour du monde mais une majorité vit en Asie. En 2020, 60 % de la population devrait vivre dans des zones urbaines plutôt que rurales. On estime que seul un-huitième de la surface de la Terre convient pour les humains ; trois-quarts de la Terre sont recouverts par les océans et la moitié des terres émergées sont des déserts (14 %), des hautes montagnes (27 %) ou d'autres milieux peu accueillants. L'implantation humaine permanente la plus au nord est Alert sur l'île d'Ellesmere au Canada (82°28'N). La plus au sud est la station d'Amundsen-Scott en Antarctique située près du pôle sud (90°S). La totalité des terres émergées, à l'exception de certaines zones de l'Antarctique et du Bir Tawil non revendiqué que ce soit par l'Égypte ou le Soudan, sont revendiquées par des nations indépendantes. En 2011, on compte 204 États souverains dont 193 sont membres des Nations Unies. De plus, il existe 59 territoires à souveraineté limitée et de nombreuses entités autonomes ou contestées. Historiquement la Terre n'a jamais connu une souveraineté s'étendant sur l'ensemble de la planète même si de nombreuses nations ont tenté d'obtenir une domination mondiale et ont échoué. L'Organisation des Nations unies est une organisation internationale qui fut créée dans le but de régler pacifiquement les conflits entre nations. Les Nations-Unies servent principalement de lieu d'échange pour la diplomatie et le droit international public. Lorsque le consensus est obtenu entre les différents membres, une opération armée peut être envisagé. Le premier humain à avoir orbité autour de la Terre fut Youri Gagarine le 12 avril 1961. Au total, en 2004, environ 400 personnes se sont rendues dans l'espace et douze d'entre-elles ont marché sur la Lune. En temps normal, les seuls humains dans l'espace sont ceux se trouvant dans la station spatiale internationale. Les astronautes de la mission Apollo 13 sont les humains qui se sont le plus éloignés de la Terre avec 400 171 kilomètres en 1970.



Les sept continents de la Terre :

-  Amérique du Nord
-  Amérique du Sud
-  Antarctique
-  Afrique
-  Europe
-  Asie
-  Océanie

VII La Lune

Lune ☾



Face visible de la Lune

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	384 467 km (0,00257 UA)
Apogée	405 696 km (0,0027 UA)
Périgée	363 104 km (0,0024 UA)
Circonférence orbitale	2 449 000 km
Excentricité	0,05490
Période de révolution	27,321582 j (27 j 7 h 43.1 min)
Période synodique	29,530589 j
Vitesse orbitale moyenne	1,022 km/s
Vitesse orbitale maximale	1,052 km/s
Vitesse orbitale minimale	0,995 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	5,145°
Nœud ascendant	?
Argument du périhélie	?
Satellites connus	0
Satellite de	la Terre

Caractéristiques physiques

Rayon équatorial	1 737,4 km (0,273 Terre)
Rayon polaire	1 735,97 km (0,273 Terre)
Périmètre équatorial	10 921 km
Superficie	37 871 220,85 km ²

Volume	2,1958×10 ¹⁰ km ³ (0,020 Terre)
Masse	7,3477×10 ²² kg (0,0123 Terre)
Masse volumique globale	3,3464×10 ³ kg/m ³
Gravité de surface	1,622 m/s ² (0,1654 g)
Vitesse de libération	2,38 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	27,321582 j
Vitesse de rotation (à l'équateur)	16,6572 km/h
Inclinaison de l'axe	6,687°
Albédo géométrique visuel	0,136
Température de surface :	
Maximum :	396 K (123 °C)
Moyenne :	196 K (-77 °C)
Minimum :	40 K (-233 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	10 ⁻¹⁰ Pa

A) Caractéristiques physiques

La **Lune** est l'unique satellite naturel de la Terre. Suivant la désignation systématique des satellites, la Lune est appelée **Terre I**; cependant en pratique cette forme n'est pas utilisée. Elle est le cinquième plus grand satellite du système solaire, avec un diamètre de 3 474 km. La distance moyenne séparant la Terre de la Lune est de 384 467 km. La Lune est le premier et le seul objet non terrestre visité par l'homme. Le premier à y avoir marché est l'astronaute Neil Armstrong le 21 juillet 1969. Après lui, onze autres hommes ont foulé le sol de la Lune, tous membres du programme Apollo. Relativement grand, son diamètre est environ le quart de celui de la Terre. Au sein du Système solaire, c'est l'un des plus grands satellites naturels (après Ganymède, Titan, Callisto et Io) et le plus grand d'une planète non gazeuse. De plus, c'est la plus grande lune du Système solaire par rapport à la taille de sa planète (même si Charon est proportionnellement plus grand par rapport à la planète naine Pluton). Elle est relativement proche de la taille de la planète Mercure (environ les trois quarts du diamètre de cette dernière). Les satellites naturels orbitant autour des autres planètes sont communément appelés « lunes » en référence à la Lune de la Terre.

Mesure de la distance Terre-Lune à l'aide du réflecteur laser

Le réflecteur laser *installé par l'équipage d'Apollo 11* est utilisé de manière continue depuis 1969. Des tirs laser sont effectués depuis plusieurs observatoires installés sur Terre en direction des réflecteurs laser déposés par la mission Apollo 11 ainsi que par les missions Apollo 14 et 15. Au cours des premières années la précision de la distance entre la Terre et la Lune est passée grâce à ces tirs d'environ 500 mètres à 25 cm. En améliorant les techniques utilisées, de nouvelles mesures ont permis de ramener cette incertitude à 16 cm en 1984. L'Observatoire McDonald (États-Unis) puis l'Observatoire de la Côte d'Azur en France se sont dotés d'équipements spécifiques qui ont permis de réduire l'imprécision à 3 cm à la fin des années 1980/début des années 1990. Enfin depuis mi 2005 l'observatoire du Point Apache au Nouveau-Mexique a pris le relais en utilisant un équipement encore plus perfectionné et effectue des mesures avec une précision inférieure au millimètre.

Pour plus d'informations sur l'exploration de la Lune sous toutes ses formes, consultez le document pdf qui s'appelle « La conquête spatiale »



La Lune photographiée par la sonde Galileo le 9 décembre 1990

La face visible (depuis la Terre) est à droite et la face cachée à gauche

La longueur du demi grand axe entre la Lune et la Terre est 384 460 km. Le diamètre moyen de la Lune est 3.474 km. La force qu'exerce la Terre sur la Lune est environ $1,95 \times 10^{20}$ newtons.

B) Influence gravitationnelle sur la Terre - Principe des forces de marée

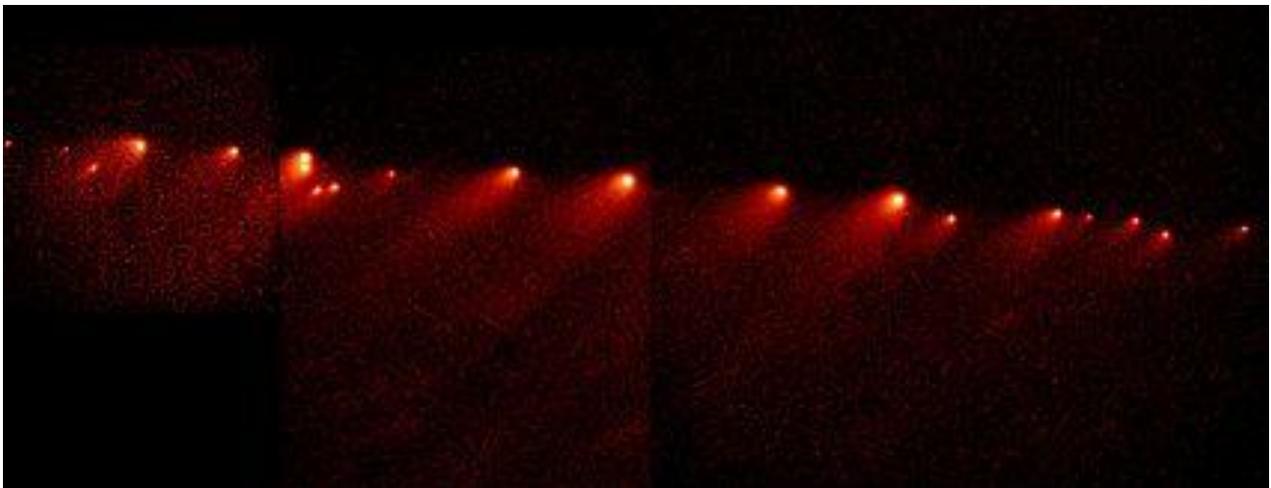


La Terre et son satellite, distance non respectée



Représentation à l'échelle de la taille et de la distance de la Terre et de la Lune.

Parmi les influences les plus connues, des plus réelles aux plus romantiques, citons la force de marée. La **force de marée** est une conséquence secondaire de la force d'attraction gravitationnelle et elle est la cause des marées. Dans certains cas, la force de marée est suffisamment puissante pour disloquer le satellite d'un corps spatial.



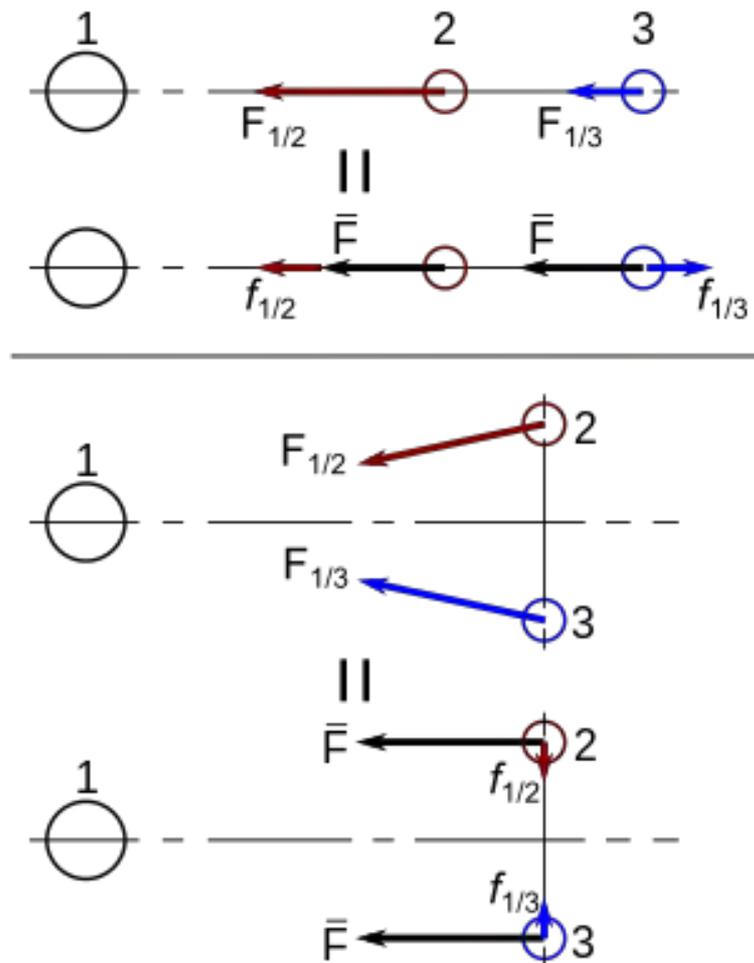
La comète Shoemaker-Levy 9 en 1994 après avoir été brisée par les forces de marée de Jupiter au cours d'un passage précédent, en 1992

Principe des forces de marée

Imaginons deux masses d'un même côté d'un astre et alignées sur la direction de cet astre qu'on nommera par la suite « primaire » (mais qui n'est pas forcément le plus massif des trois), qui les attire. En vertu de la loi d'attraction universelle, la plus proche de l'astre sera plus attirée que l'autre et tendra donc à s'en séparer. Imaginons maintenant une autre configuration où la ligne qui joint les deux masses est perpendiculaire à la ligne qui va de leur centre de masse à l'astre. Les forces d'attraction ont des directions convergentes (vers l'astre); ainsi les masses auront une tendance à se rapprocher. Ainsi l'astre primaire sera à la fois responsable du mouvement accéléré de l'ensemble des deux masses, plus précisément de leur centre de masse, mais aussi responsable de forces qui régissent le mouvement relatif de ces deux masses et qu'on appelle forces de marée. La force de marée est donc une interaction gravitationnelle indirecte entre ces masses induites par un ou plusieurs astres primaires.

L'expression exacte de cette force de marée sera dérivée plus loin. Le résultat essentiel, dans le cas le plus fréquent où une des masses, par exemple la Terre, est beaucoup plus grande que l'autre, par exemple une petite masse d'eau de l'océan ou un satellite de la terre, et où la distance qui les sépare est beaucoup plus petite que la distance à l'astre primaire (la distance Terre-Lune par exemple), est que dans la configuration alignée cette force de marée est « centrifuge » et a pour intensité

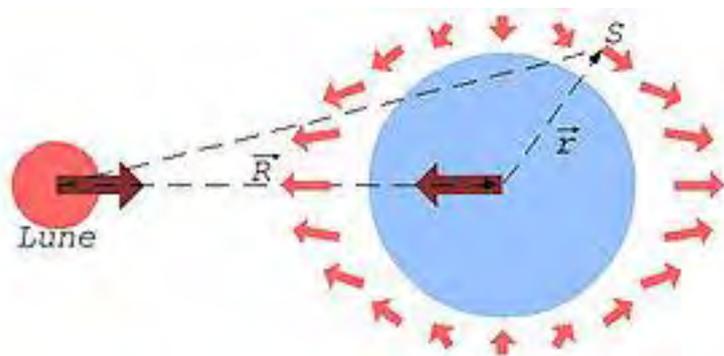
$2GmM_Lr/R^3$ où r est la distance de la masse d'eau ou du satellite au centre de la terre et m sa masse, R la distance à l'astre primaire (la lune ici) et G la constante universelle de la gravitation. Dans l'autre configuration envisagée, la force de marée est « centripète » et deux fois moins intense. Cette force de marée, s'exerçant entre les constituants d'un satellite (dans ce cas, les deux masses considérées sont parties intégrantes d'un seul et même corps), tend à le déformer, voire parfois à le briser lorsque la force de marée centrifuge l'emporte sur l'interaction gravitationnelle directe des deux parties ou sur les forces de cohésion de ces mêmes parties (voir ci-dessous la sous-section sur la limite de Roche).



Les forces d'attraction qu'exerce l'astre 1 sur les astres 2 et 3, notées $F_{1/2}$ et $F_{1/3}$, peuvent se décomposer en une composante moyenne \bar{F} et une composante différentielle $f_{1/2}$ et $f_{1/3}$. Cette composante différentielle tend à éloigner les astres 2 et 3 (haut) ou à les rapprocher (bas).

Dans le cas où ce satellite a une rotation propre non synchrone avec sa révolution autour de l'astre, la déformation périodique qui en résulte est responsable des marées océaniques et/ou terrestres. De plus cette déformation périodique entraîne, par le biais des forces de friction, un échauffement du satellite. Ces forces de friction sont aussi à l'origine d'un couple qui tend à synchroniser sa rotation propre et sa révolution autour de l'astre, comme c'est déjà le cas pour la lune qui nous montre toujours la même face. Ce même phénomène est également responsable du ralentissement progressif de la rotation de la Terre d'environ 2 ms/siècle. Ces forces de friction sont enfin responsables de la modification de l'orbite, le satellite pouvant s'écraser sur l'astre ou, au contraire, s'en éloigner comme c'est le cas pour l'orbite de la Lune qui s'éloigne d'environ 4 cm par an de la Terre.

La force de marée induite par la Lune, astre primaire, qui régit le mouvement relatif du satellite S par rapport à la Terre est représentée en rouge en direction et en intensité par les flèches. Notons la symétrie par rapport au centre de la Terre



- l'activité sismique : le magma du manteau, présent sous la croûte terrestre solide, subit lui aussi du fait de son état visqueux des mouvements, correspondant au passage du satellite. Pour certains, la fragmentation de la croûte en plaques serait une conséquence de la présence de la Lune. Il est important de réaliser que ceci n'est plausible que parce que la Lune était beaucoup plus près de la Terre à ses origines. Pour le volcanologue Jacques-Marie Bardintzeff, « la Lune a un effet de marée bien connu sur la Terre. Mais son influence est trop faible pour déclencher une éruption. Cependant pour un volcan en activité, la Lune peut modifier légèrement son comportement. Bien différent est le cas de Io, lune (satellite) de Jupiter. L'énorme Jupiter provoque des éruptions fantastiques sur Io ».
- l'évolution des espèces : le nautilus possède une coquille en spirale formée d'anneaux. Chaque jour, il forme un anneau supplémentaire. Au bout d'un mois se forme une nouvelle cloison intérieure. Ce phénomène est lié à l'instinct de frai du nautilus, qui le fait remonter près de la surface à chaque pleine Lune. Si l'on observe des coquilles fossiles, la fréquence des cloisons intérieures augmente proportionnellement à leur ancienneté. C'est une confirmation indirecte et indépendante de l'allongement du mois dû à l'augmentation progressive de la distance Terre-Lune.
- l'obliquité terrestre : l'obliquité de la Terre varie entre 21 et 24° environ par rapport à l'équateur céleste. Celle de Mars qui n'a pas de satellite naturel comparable varie entre 20 et 60°. Les scientifiques pensent donc que la Lune stabilise la Terre dans son mouvement comme si elle était un contrepoids — simplement parce que le moment d'inertie du système Terre-Lune est bien plus grand que celui de la Terre seule.
- depuis longtemps, les calendriers indiquent les phases de la Lune, notamment pour les activités rurales (visibilité de nuit) ou de pêche (marées).

L'attraction gravitationnelle entre la Terre et la Lune cause les marées sur Terre. Le même effet a lieu sur la Lune faisant en sorte que sa période de rotation est identique au temps qu'il lui faut pour orbiter autour de la Terre, présentant ainsi toujours la même face vers la Terre. En orbitant autour de la Terre, différentes parties du côté visible de la Lune sont illuminées par le Soleil, causant les phases lunaires.

À cause du couple des marées, la Lune s'éloigne de la Terre à un rythme d'environ 38 millimètres par an, produisant aussi l'allongement du jour terrestre de 23 microsecondes par an. Sur plusieurs millions d'années, l'effet cumulé de ces petites modifications produit d'importants changements. Durant la période du Dévonien, il y a approximativement 410 millions d'années, il y avait ainsi 400 jours dans une année, chaque jour durant 21,8 heures. La Lune aurait eu une influence importante dans le développement de la vie en régulant de climat de la Terre. Les preuves paléontologiques et les simulations informatiques

montrent que l'inclinaison de l'axe de la Terre est stabilisée par les effets de marées avec la Lune. Certains scientifiques considèrent que sans cette stabilisation contre les couples appliqués par le Soleil et les planètes sur le renflement équatorial, l'axe de rotation aurait pu être très instable ce qui aurait provoqué des changements chaotiques au cours des millions d'années comme cela semble avoir été le cas pour Mars. La Lune est aujourd'hui à une distance de la Terre telle que, vue de la Terre, notre satellite a la même taille apparente (taille angulaire) que le Soleil. Le diamètre angulaire (ou l'angle solide) des deux corps est quasiment identique car, même si le diamètre du Soleil est 400 fois plus important que celui de la Lune, celle-ci est 400 fois plus rapprochée de la Terre que ce dernier. Ceci permet des éclipses solaires totales et annulaires sur Terre. Le consensus actuel sur les origines de la Lune est celle d'un impact géant entre un planétoïde de la taille de Mars, appelé Théia, et la Terre (ou proto-Terre) nouvellement formée. Cette hypothèse explique en partie le fait que la composition de la Lune ressemble particulièrement à celle de la croûte terrestre.

C) Autres satellites

1) Un second satellite ?

2006 RH₁₂₀ est un petit météoroïde d'environ 4 mètres de diamètre qui, entre septembre 2006 et juin 2007, était temporairement en orbite autour de la Terre. Ce corps céleste a été éjecté de son orbite terrestre en juillet 2007, après avoir parcouru quatre orbites autour de la Terre pendant une durée totale d'environ un an. Même si la Terre possédait pendant ce temps un deuxième satellite naturel, sa désignation de « seconde lune » resta temporaire. De façon générale, 2006 RH₁₂₀ serait plutôt astéroïde géocroiseur, éventuellement un astéroïde Aten. Certaines chutes de météorites pourraient provenir de petits corps en orbite autour de la Terre.

2) Satellites artificiels

En janvier 2014, on comptait 1 167 satellites artificiels en orbite autour de la Terre (contre 931 en 2011). Un seul de ces satellites est habité en permanence : la **Station Spatiale Internationale**

3) Quasi-satellites et autres objets du cortège entourant la Terre

a) Troyens

Dans le système Soleil-Terre

2010 TK₇ est le premier astéroïde troyen connu de la Terre, autour du point de Lagrange L₄ du couple Terre-Soleil, 60° en avance par rapport à la Terre sur son orbite autour du Soleil.

Dans le système Terre-Lune

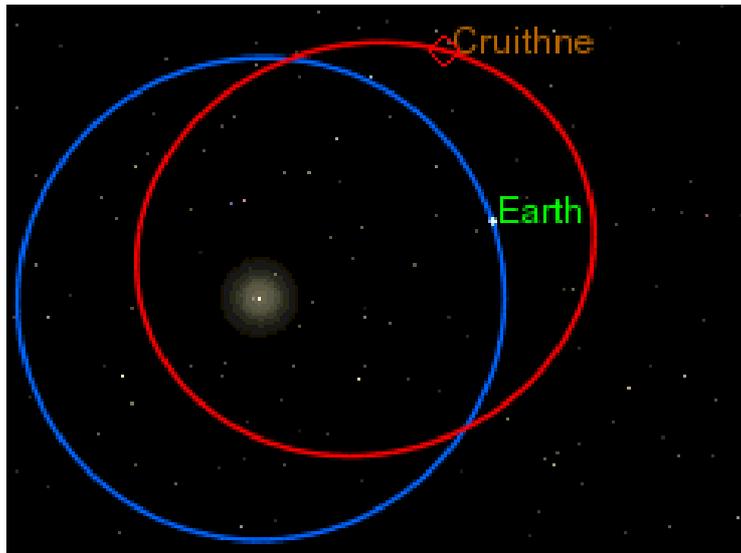
Les nuages de Kordylewski graviteraient aux points L₄ et L₅ du système Terre-Lune, mais leur existence reste incertaine à ce jour.

b) Autres satellites co-orbitaux

Un satellite co-orbital est un satellite naturel d'une planète orbitant sur une même orbite qu'une autre lune de ladite planète. La Terre a au moins sept satellites co-orbitaux :

- (3753) Cruithne est un astéroïde géocroiseur de classe Aten. D'environ cinq kilomètres de diamètre, son orbite liée à celle de la Terre l'a parfois fait surnommer « seconde lune de la Terre » bien qu'il ne soit pas un satellite de celle-ci mais plutôt un « compagnon ». Cruithne fut découvert le 10 octobre 1986 par l'astronome amateur J. Duncan Waldron sur une photographie prise par le télescope de Schmidt de l'observatoire de Siding Spring à Coonabarabran en Nouvelle-Galles du Sud (Australie). Sa découverte, sous la désignation provisoire 1986 TO, fut annoncée le 14 octobre 1986 par une circulaire du Bureau central des télégrammes astronomiques de l'Union astronomique internationale. Préalablement, Cruithne avait été observée, le 10 octobre 1983, sous la désignation 1983 UH, par l'astronome italien Giovanni De Sanctis et son confrère danois, Richard M. West, à l'observatoire de La Silla (809) de l'Observatoire européen austral au Chili. Conrad M. Bardwell identifia 1986 TO à 1983 UH. Son orbite inhabituelle ne fut pas déterminée avant 1997, par Paul A. Wiegert (en) et Kimmo A. Innanen, de l'Université d'York à Toronto, et Seppo Mikkola, de l'Université de Turku en Finlande. L'astéroïde porte le nom des Cruithnes qui habitèrent l'Écosse et des parties de l'Irlande entre 800 av. J.-C. et 1000; le nom se réfère peut-être plus spécifiquement à leur légendaire premier chef, également nommé Cruithne.

Dimensions et orbite



Les orbites héliocentriques de la Terre (en bleu) et de Cruithne (en rouge)

Cruithne fait environ 5 kilomètres de diamètre. Il est situé sur une orbite elliptique normale autour du Soleil, avec une période orbitale quasiment égale à celle de la Terre. Cruithne parcourt son orbite elliptique en un peu moins d'un an, s'approchant pratiquement jusqu'à l'orbite de Mercure et s'éloignant au-delà de celle de Mars. Du point de vue d'un observateur terrestre, Cruithne décrit une trajectoire ressemblant à une sorte de haricot, une boucle autour du point de Lagrange L₄. Au plus près, Cruithne est distant de la Terre d'environ 12 millions de km (30 fois la distance Terre-Lune); au plus loin, l'angle Terre-Soleil-Cruithne atteint 120°. La période orbitale de Cruithne étant très légèrement plus courte que celle de la Terre, le « haricot » se décale petit à petit, s'éloignant de la Terre dans un premier temps, passant de l'autre côté du Soleil avant de revenir à peu près jusqu'au point de Lagrange L₄ en environ 385 ans. À ce moment-là, la Terre et Cruithne procèdent à un échange d'énergie orbitale (un effet d'appui gravitationnel), affectant l'orbite de Cruithne d'un peu plus d'un demi-million de kilomètres (et celle de la Terre d'environ 1,3 cm). La période de révolution de Cruithne devient alors plus grande que celle de la Terre et la trajectoire de l'astéroïde se décale à nouveau petit à petit, dans le sens inverse. Le phénomène se répète dans l'autre sens 385 ans plus tard, raccourcissant la période de révolution de Cruithne afin de procéder à nouveau au processus. Globalement, Cruithne décrit donc une orbite en fer à cheval du point de vue de la Terre. Bien qu'on pense que l'orbite de Cruithne ne soit pas stable sur le long terme (à plus de 5 000 ans), il est possible qu'il soit dans cette configuration de résonance orbitale depuis 100 000 ans. Cruithne s'est approché au plus près de la Terre en 1902, sera à nouveau proche vers 2292 mais de l'autre côté du fer-à-cheval, puis encore une fois vers 2676. Il n'existe aucun risque de collision entre Cruithne et la Terre, les deux corps ne s'approchant jamais à moins de 12 millions de kilomètres. Cruithne n'est jamais visible à l'œil nu à aucun endroit de son orbite.

- 2002 AA₂₉

L'astéroïde **2002 AA₂₉** (également écrit **2002 AA29**) a été découvert par LINEAR le 9 janvier 2002. C'est un quasi-satellite de la Terre. L'astéroïde suit une orbite en fer à cheval qui le fait se rapprocher de la Terre tous les 95 ans puisqu'il suit la même orbite que celle de la Terre autour du Soleil et il devrait, dans les prochains 600 ans, commencer à orbiter autour de la planète. Il mesure près de 60 mètres de diamètre. J. Richard Gott et Edward Belbruno de l'Université de Princeton ont spéculé que 2002 AA₂₉ et la Lune furent formés après l'impact de Théia, qui aurait frappé la Terre au début de son histoire.

- 2001 GO₂

2001 GO₂ est un astéroïde Apollon découvert en 2001. Sa distance minimale d'intersection de l'orbite terrestre est de 0,003968 ua, il possède une orbite en fer à cheval par rapport à la Terre. Les **astéroïdes Apollon** (ou **Apollo**) sont une famille d'astéroïdes géocroiseurs. Elle est nommée d'après (1862) Apollon, le premier de cette famille à avoir été découvert. Les astéroïdes sont classés dans cette famille si leur demi-grand axe est strictement supérieur à 1 ua et leur périhélie inférieur à 1,017 ua. On connaît actuellement (15 janvier 2015) 6 434 astéroïdes Apollon dont 928 sont numérotés et 65 nommés.

- (164207) 2004 GU₉

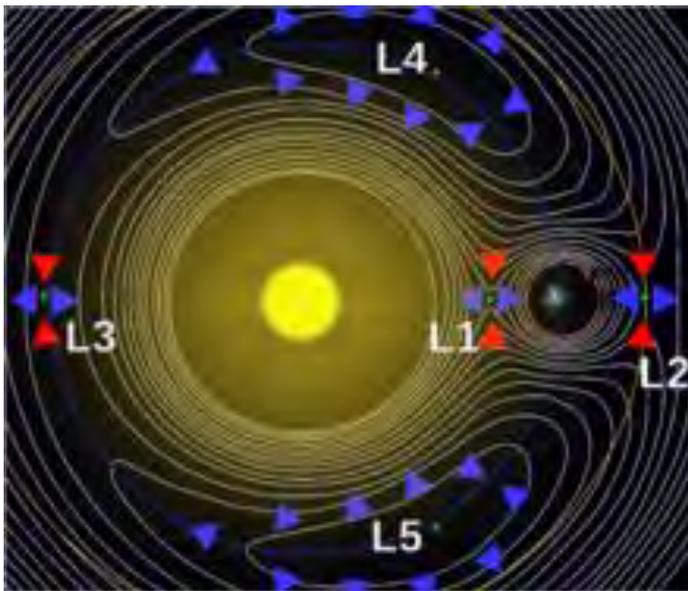
(164207) 2004 GU₉ (également écrit (164207) 2004 GU₉) est un astéroïde Apollon découvert par LINEAR en 2004 à Socorro (704). L'astéroïde suit une orbite en fer à cheval en coordination avec la Terre. D'autres sont dans le même cas que lui : 2002 AA₂₉, 2001 GO₂ ou 2003 YN₁₀₇. Il mesure entre 200 et 300 mètres de diamètre. Sa distance minimale d'intersection de l'orbite terrestre est de 0,000 560 unité astronomique, soit environ 84 000 kilomètres.

- (54509) YORP

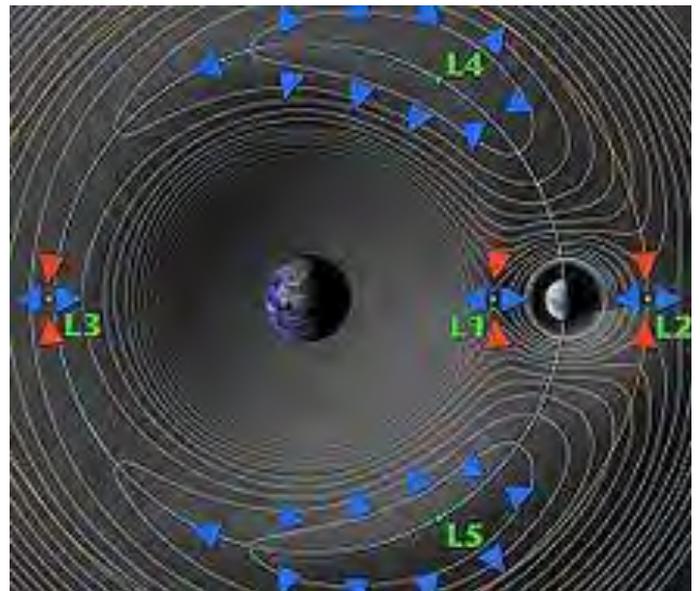
(54509) YORP, anciennement dénommé 2000 PH₅, est un astéroïde Apollon découvert par le projet LINEAR le 3 août 2000. L'analyse de la rotation de l'objet a permis pour la première fois de mettre en évidence l'effet YORP. (54509) YORP est un objet géocroiseur ayant une période orbitale très proche d'une année, il décrit relativement à la Terre une orbite en fer à cheval. Il s'approche donc de part et d'autre de la Terre environ tous les 100 ans. Il fit huit passages proches de 1999 à 2006 à chaque fois vers fin juillet, au plus près à 4,5 distances Terre-Lune en 2002. Il ne présente pas de risque de collision pour les 2000 prochaines années. Ses caractéristiques orbitales font penser qu'il fut à l'origine un objet éjecté du système Terre-Lune.

- 2010 SO₁₆

2010 SO₁₆ est un astéroïde géocroiseur de la famille Apollo. Il a été découvert en septembre 2010 par le satellite WISE. C'est un quasi-satellite de la Terre. Il partage la même orbite que la Terre, et possède une orbite en fer à cheval. Il met 175 ans pour aller d'une extrémité de son orbite à l'autre et ne passe jamais à moins de 4 millions de kilomètres de la Terre. Son diamètre estimé est de 300 mètres et pourrait être un reliquat de la formation de la Terre, issu des points de Lagrange L₄ et L₅ du système Soleil-Terre. Il serait sur cette orbite depuis environ 250 000 ans.



Points de Lagrange du système Terre-Soleil

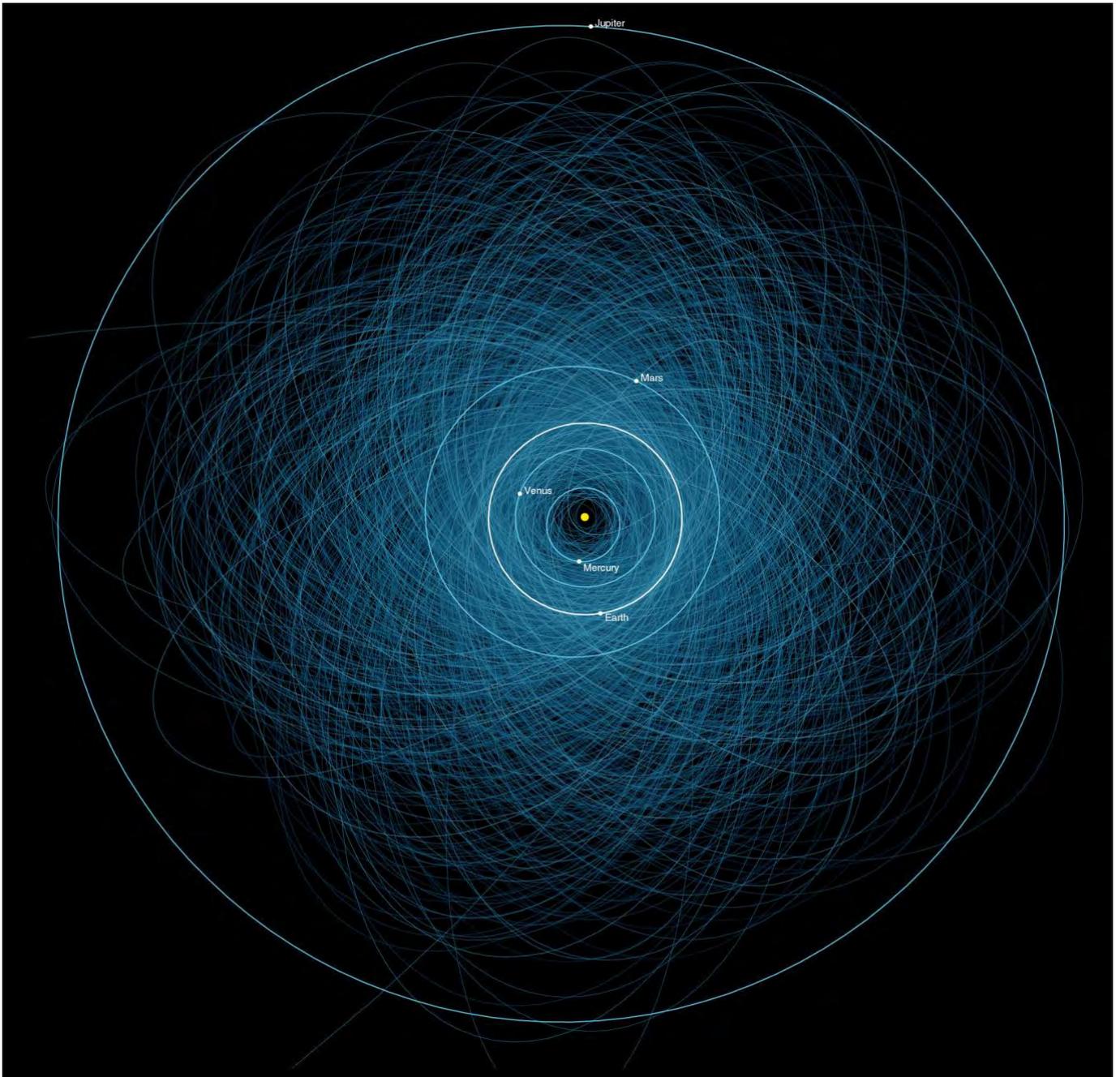


Points de Lagrange du système Terre-Lune

VIII ICONOGRAPHIE

Les risques de collision de la Terre avec un ou des astéroïdes

La Nasa surveille les astéroïdes comme du lait sur le feu. La preuve : les ingénieurs de l'Agence spatiale américaine viennent de dévoiler une carte qui montre tous les objets célestes repérés en 2013 qui pourraient être une menace pour la Terre. Et ils sont nombreux : environ 1 400. Les scientifiques les nomment PHA, comme "Potentially Hazardous Asteroids" (astéroïdes potentiellement dangereux). Ces corps rocheux se caractérisent par un diamètre supérieur à 140 mètres et par leur proximité avec notre planète. Proximité somme toute relative : chacun de ces astéroïdes peut passer à moins de 7,5 millions de kilomètres de nous, soit 20 fois la distance Terre/Lune.



Conclusion : même si cette carte est fortement anxiogène, pas de panique !

Selon la Nasa, ces gros cailloux ne représentent pas une menace pour notre planète bleue dans les 100 ans à venir. L'Agence spatiale souligne toutefois qu'il est extrêmement difficile de calculer les trajectoires de ces astéroïdes sur le long terme : les forces d'attraction des planètes du Système solaire peuvent en effet modifier leurs itinéraires. Par ailleurs, cette carte ne s'intéresse uniquement qu'aux gros astéroïdes. Or, les

petits météores peuvent être très destructeurs. En février dernier, une pluie de météorites qui s'était abattue sur la région de l'Oural, dans le centre de la Russie, avait fait près de 1 000 blessés. La taille initiale de cet objet céleste avait été estimée à 17 mètres de diamètre : c'est environ 8 fois plus petit que les astéroïdes répertoriés sur la carte.

Un astéroïde d'environ 300 mètres de diamètre est passé à 830 000 km à peine de la Terre, le 07/01/2002. Le corps céleste, baptisé 2001YB5, n'avait été détecté par les télescopes terrestres que 10 jours avant sa visite. S'il était entré en collision avec notre planète, à la vitesse de plus de 110 000 km/h, il aurait libéré une énergie suffisante pour rayer de la carte un pays de la taille de la France.

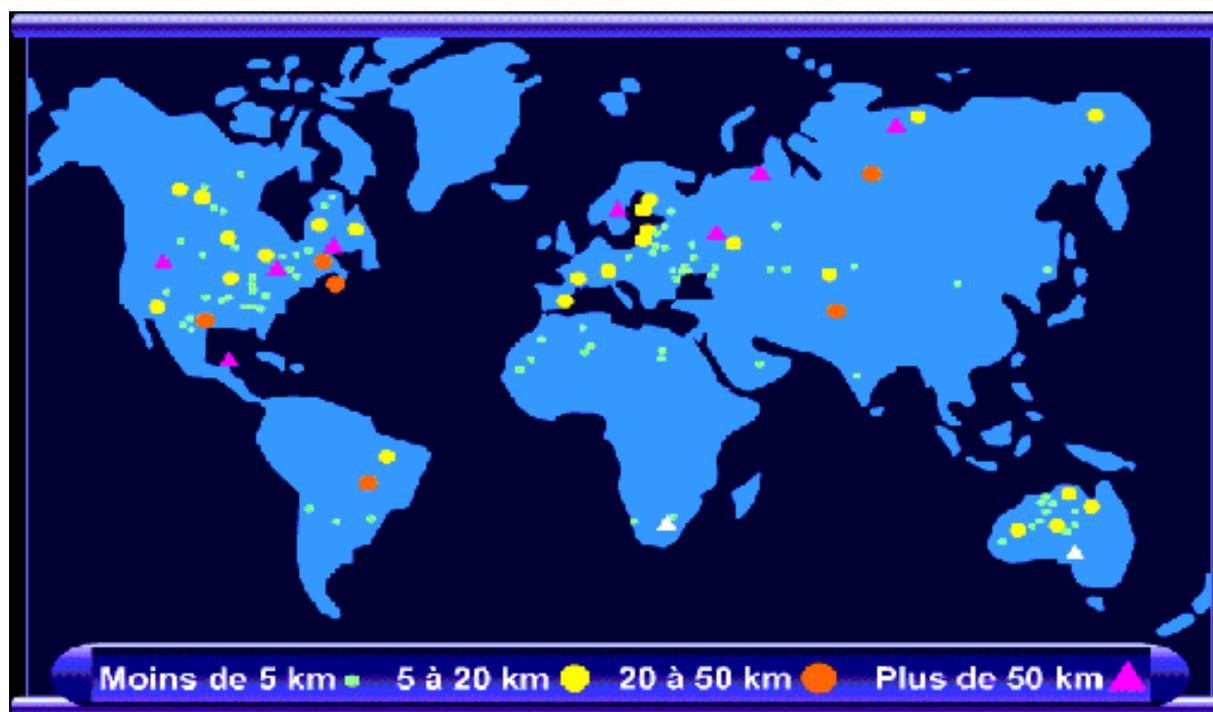
Si un astéroïde mesurant entre 1 et 2 km de diamètre entrait en collision avec notre planète, toute la Terre serait alors ravagée par des incendies et des raz de marée importants. L'explosion projeterait dans l'atmosphère un nuage de poussière qui couvrirait la planète d'un nuage sombre. La température moyenne chuterait. Des pluies acides tomberaient. Ces variations climatiques dureraient plusieurs siècles engendrant des famines interminables. Peu de sociétés parviendraient à surmonter une telle catastrophe.

Si l'astéroïde avait un diamètre de 10 km, il provoquerait un cataclysme planétaire. L'impact creuserait un cratère de 100 km de diamètre comme au large de la péninsule du Yucatan (Mexique) et libérerait une énergie de 1 milliard de mégatonnes. La masse de poussière qui couvrirait la planète d'un nuage sombre serait épaisse de plusieurs milliers de mètres cubes. La température chuterait de 15°C. Cela provoquerait alors une catastrophe climatique, un long hiver glacial capable de balayer l'espèce humaine, tout comme, croit-on, les dinosaures il y a 65 millions d'années.

Les probabilités d'une collision

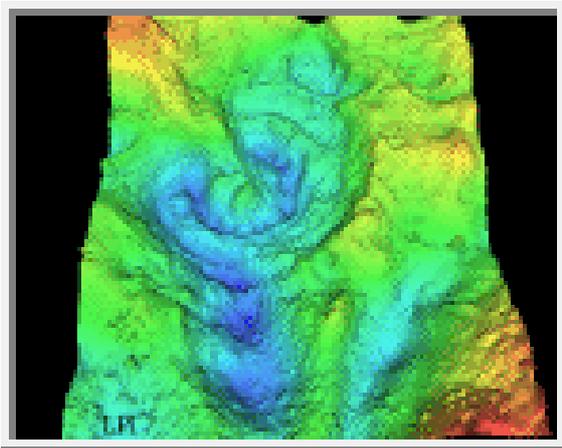
- Il a 200 météorites par an de 10 cm à 10 m qui brûlent en général dans l'atmosphère. Elles peuvent toutefois endommager des objets comme une voiture ou un toit. Les accidents mortels restent rarissimes.
- Une fois par siècle il y a un impact d'une météorite de 30 m comme en 1908 où une comète d'environ 60 mètres de diamètre a explosé au-dessus de la Sibérie.
- Une fois tous les 30 000 ans il y aurait un impact d'une météorite de 1 km ce qui provoquerait des pertes humaines égales à 100 millions de morts.
- Une fois tous les 100 millions d'années il y aurait un impact d'un corps de 10 km comme cela à peut-être été le cas lors de la disparition des dinosaures il y a 65 millions d'années.

Les cratères d'impact terrestres





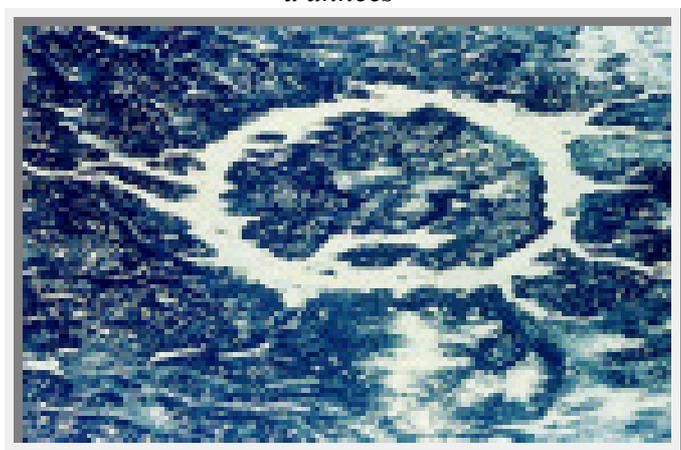
Le célèbre Météore Carbet d'Arizona (1 kilomètre de diamètre) est le résultat de l'impact d'une météorite d'à peine 15 mètres de diamètres il y a 49 000 ans



Le cratère Chicxulub, à la Péninsule Yucatan au Mexique d'un diamètre de 180 km est le résultat de l'impact d'un corps de 10 à 20 km qui a causé l'extinction des dinosaures il y a 64.98 millions d'années



Le Wolfe Creek, en Australie, qui a un diamètre de 0.875 kilomètres est le résultat de l'impact d'un corps il y a 300 000 ans



Le Manicouagan, situé au Québec qui a un diamètre de ~100 kilomètres est le résultat de l'impact d'un corps il y a 212 millions d'années

LES PLUS GRANDS CRATERES D'IMPACT TERRESTRES

Nom	Lieu	Diamètre (km)	Âge (millions d'années)	Coordonnées
Vredefort	Afrique du Sud	300	2 023	🌍 27° 00' S 27° 30' E
Sudbury	Ontario, Canada	250	1 850	🌍 46° 36' N 81° 11' O
Bedout	au large de la côte nord-ouest de l'Australie	200	250	?
Chicxulub	Yucatán, Mexique	170	65	🌍 21° 20' N 89° 30' O
Manicouagan	Québec, Canada	100	214	🌍 51° 23' N 68° 42' O
Maniitsoq	Groenland	100	3 000	🌍 65° 20' N 51° 33' O
Popigai	Sibérie, Russie	100	35.7	🌍 71° 39' N 111° 11' E
Acraman	Australie-Méridionale, Australie	90	590	🌍 32° 01' S 135° 27' E
Baie de Chesapeake	Virginie, États-Unis	90	35.5	🌍 37° 17' N 76° 01' O

Nom	Lieu	Diamètre (km)	Âge (millions d'années)	Coordonnées
Poutchej-Katounki	Nijni Novgorod, Russie	80	167	 56° 58' N 43° 43' E
Morokweng	Morokweng, Afrique du Sud	70	145	 26° 28' S 23° 32' E
Tookoonooka	Queensland, Australie	66	128	 27° 07' S 142° 50' E
Kara	Russie	65	70	 69° 06' N 64° 09' E
Beaverhead	Montana, États-Unis	60	600	 44° 36' N 113° 00' O
Charlevoix	Québec, Canada	54	342	 47° 32' N 70° 18' O
Kara-Kul	Pamir, Tadjikistan	52	5	 39° 01' N 73° 27' E
Siljan	Dalécarlie, Suède	52	361	 61° 02' N 14° 52' E
Montagnais	Nouvelle-Écosse, Canada	45	50	 42° 53' N 64° 13' O
Araguainha	Brésil central	40	244	 16° 47' S 52° 59' O
Mjølnir	Mer de Barents, Norvège	40	142	 73° 48' N 29° 40' E
Saint-Martin	Manitoba, Canada	40	220	 51° 47' N 98° 32' O
Woodleigh	Australie occidentale, Australie	40	364	 26° 03' S 114° 39' E
Carswell	Saskatchewan, Canada	39	115	 58° 27' N 109° 30' O
Manson	Iowa, États-Unis	35	73.8	 42° 35' N 94° 33' O
Keurusselkä	Keuruu / Mänttä, Finlande	30	1 800	 62° 08' N 24° 36' E
Shoemaker (ex Teague)	Australie occidentale, Australie	30	1 630	 25° 52' S 120° 53' E
Yarrabubba	Australie occidentale, Australie	30	2 000	 27° 10' S 118° 50' E
Îles Slate	Ontario, Canada	30	450	 48° 40' N 87° 00' O
Mistastin	Labrador, Canada	28	28	 55° 53' N 63° 18' O
l'Eau Claire Est	Québec, Canada	26	290	 56° 05' N 74° 07' O
Nördlingen-Ries	Allemagne	25	14.8	 48° 51' 00" N 10° 30' 00" E
Rochechouart-Chassenon	France	21	214	 45° 49.45' N 0° 46.9' E
Wanapitei	Ontario	7,5	37,2 ± 1,2	 46° 45' N 80° 45' O
Steinheim	Allemagne	3.8	15	 48° 41' N 10° 04' E
Gatun	Panama	2.7	20	 9° 05' 58.1" N 79° 47' 21.8" O
Lonar	Buldhana, Inde	1.83	0.052	 19° 58' N 76° 31' E
Meteor Crater	Arizona, États-Unis	1.2	0.049	 35° 02' N 111° 01' O

Meteor Crater

Meteor Crater est un cratère d'impact non loin du centre de l'État de l'Arizona à l'ouest des États-Unis d'Amérique. Il s'appelle aussi « cratère Barringer », en souvenir de l'ingénieur des mines Daniel Moreau Barringer, qui acheta le site en 1903. Le cratère en bol mesure entre 1 200 et 1 400 mètres de diamètre; sa profondeur est de 190 mètres. Il se serait formé il y a environ 50.000 ans, à la suite de l'impact d'une météorite d'environ 50 mètres de diamètre et d'une masse de 300.000 tonnes, composée de fer et de nickel.

Ce cratère est l'un des plus petits des cratères connus, mais il est très intéressant pour deux raisons :

- 1) Étant situé en zone désertique, la végétation ne l'a pas recouvert.
- 2) Il a peu subi l'effet de l'érosion terrestre en raison de son âge « récent » : 49.000 ans !



Vue aérienne de Meteor Crater



Vue panoramique terrestre de Meteor Crater

Le cratère s'est formé il y a environ 50 000 ans, au Pléistocène, alors que le climat du plateau du Colorado était plus frais et plus humide qu'aujourd'hui. À cette époque, la région était recouverte par une végétation de savane ouverte et peuplée de mammoths laineux, de paresseux terrestres géants et de camélidés. En revanche, les êtres humains ne peuplaient probablement pas encore la région. L'objet qui est à l'origine de la formation du cratère était une météorite ferreuse riche en fer et en nickel d'un diamètre d'environ 50 mètres. Sa vitesse au moment de sa collision avec la Terre était de plusieurs kilomètres par seconde.

À l'origine, les modélisations donnaient une vitesse de 20 km/s, mais les études les plus récentes avancent une vitesse plus faible, de 12,8 km/s. On estime que la météorite a perdu la moitié de sa masse initiale, qui était de l'ordre de 300.000 tonnes, au cours de sa traversée de l'atmosphère terrestre. Une partie de la roche constituant la météorite s'est en effet vaporisée au cours de cette traversée. La météorite est entrée en collision avec le sol suivant un angle de 80 degrés.

La collision a dégagé une énergie considérable équivalente à 2,5 mégatonnes de TNT ou encore à celle d'une explosion thermonucléaire environ 150 fois plus puissante que celle de la bombe d'Hiroshima. L'impact et l'explosion ont éjecté 175 millions de tonnes de roche du sol. Des blocs de roche calcaire pesant plus de 30 tonnes ont été projetés au-delà du cratère et des débris rocheux formés au moment de l'impact ont été retrouvés sur une étendue de 260 km². La chaleur et le souffle engendrés par la collision ont probablement détruit instantanément toute forme de vie dans un rayon de 4 kilomètres. Dans un rayon de 10 km, la chaleur dégagée par la boule de feu a provoqué de sévères brûlures sur tous les organismes vivants. Dans un rayon de 14 à 22 km, une onde de choc se déplaçant à la vitesse de 2.000 km/h a tout balayé sur son passage. Cependant l'impact ne projeta pas une quantité de poussière suffisante dans l'atmosphère pour pouvoir modifier notablement le climat de la Terre. La zone de la collision fut entièrement recolonisée par la faune et la flore en l'espace d'un siècle.

La météorite fut en grande partie vaporisée au moment de la collision. Des fragments de fer et nickel de la taille d'un grain de gravier à celle de gros blocs pesant jusqu'à 650 kilos ont été récoltés dans la zone de débris entourant le cratère. Des gouttelettes de fer et de nickel de la taille d'un grain de sable sont retombées dans et autour du cratère après la condensation de la vapeur métallique.



← *Le morceau le plus gros qui reste de l'impact*

Mr Barringer qui l'a acheté en 1903 en a fait un « business ». Il y a sur place de quoi se restaurer, se garer, une visite vous coûtera 18 \$.

Table des matières

I Généralités	1
Chronologie	4
Origines de la Terre	4
Origines de la Lune	4
II Histoire de la Terre	5
A) Périodes ou « éons »	5
1) L'éon Hadéen	5
2) L'éon Archéen	6
3) L'éon Protérozoïque	8
4) L'éon Phanérozoïque	10
B) Évolution de la vie	10
C) Futur	11
D) Fin	12
III Composition et structure de la Terre	12
A) Forme	12
B) Composition chimique	13
C) Structure interne	13
D) Chaleur	14
E) Plaques tectoniques et dérive des continents	15
1) La tectonique des plaques et la dérive des continents	15
2) La convection dans le manteau	17
3) Le complément au modèle du double tapis roulant	17
4) L'identification des principales plaques tectoniques	18
5) Les zones de divergence	19
6) La morphologie des dorsales océaniques	19
7) Les zones de convergence	20
8) Les zones de décrochement	20
9) Le moteur du déplacement	21
10) La dérive des continents	21
IV Géographie de la Terre	22
A) Surface de la Terre	22
B) Hydrosphère de la Terre	23
1) Hydrosphère terrestre	24
2) Mers et océans	24
3) Mers intérieures et lacs	25
4) Fleuves et rivières	25
C) L'atmosphère terrestre	25
1) Description	27
2) Composition chimique détaillée	27
3) Évolution du taux de CO ²	28
4) Structure de l'atmosphère	29
5) Caractéristiques de l'atmosphère	31
a) Pression et épaisseur	31
b) Densité et masse	31
c) Opacité	32
d) Diffusion des ondes	32
e) Absorption optique	32
f) Émission	33
g) Circulation	33
h) Phénomènes optiques	33
i) Météorologie et climat	34
j) Haute atmosphère	34
D) Le champ magnétique de la Terre	35
1) Origine	36
2) Description	36
3) Notion de pôle	37

4) Propriétés du champ magnétique	37
5) Applications	38
V Rotation et orbite	39
A) Rotation	39
B) Orbite	41
C) Inclinaison de l'axe et saisons	42
1) Paramètres de Milanković.....	44
2) Les paramètres de la Terre	44
3) L'excentricité de l'orbite terrestre	44
4) L'obliquité terrestre	44
5) La précession terrestre.....	45
6) La nutation	45
7) Les conséquences sur Terre.....	46
a) Les conséquences de l'excentricité terrestre	46
b) Les conséquences de l'obliquité terrestre.....	46
c) Les conséquences de la précession terrestre.....	46
d) Les conséquences de ces trois facteurs	47
VI Habitabilité	48
A) Habitabilité d'une planète.....	48
B) Systèmes planétaires appropriés	48
C) Classe spectrale	48
D) Zone habitable stable.....	49
E) Faible variation de luminosité.....	49
F) Métallicité élevée	50
G) Systèmes binaires.....	50
H) Caractéristiques planétaires	51
I) Masse.....	51
J) Orbite et rotation	52
K) Géochimie	53
L) Autres considérations	53
1) Habitabilité des systèmes autour des naines rouges.....	53
2) Les naines brunes	54
3) « Bons Jupiters »	55
4) Le voisinage galactique	55
M) Indice d'habitabilité planétaire.....	56
N) Les conditions de vie sur Terre.....	56
1) Biosphère.....	56
2) Ressources naturelles	57
3) Risques environnementaux.....	57
4) Géographie humaine	57
VII La Lune	59
A) Caractéristiques physiques	60
Mesure de la distance Terre-Lune à l'aide du réflecteur laser	60
B) Influence gravitationnelle sur la Terre - Forces de marée.....	61
C) Autres satellites	64
1) Un second satellite ?	64
2) Satellites artificiels.....	64
3) Quasi-satellites et autres objets du cortège entourant la Terre	64
a) Troyens	64
b) Autres satellites co-orbitaux.....	64
VIII Iconographie et addenda	67
Les risques de collision de la Terre avec un ou des astéroïdes / Cratères	67
IX Table des matières	73-74