

La Voie lactée
Le Système solaire
& l'évolution des espèces

Albert Bijaoui
Astronome émérite
Observatoire de la Côte d'Azur
BP 4229 NICE CEDEX 06304

Version 4 Juillet 2014

Introduction

Au cours de l'année 2012 les médias ont diffusé de nombreuses informations concernant la possibilité d'une apocalypse prévue par les Mayas. Cette prédiction était purement artificielle, basée sur une date contenant beaucoup de 0 dans un de leurs calendriers.

Ayant été sollicité pour une conférence, j'ai pensé que c'était aussi une bonne opportunité pour faire le point sur ce que l'on savait actuellement sur les extinctions massives des espèces, phénomène qui intrigue depuis plus de deux siècles les savants.

Je ne suis ni paléontologue, ni géologue, ni géophysicien, ni planétologue, ni spécialiste d'une des nombreuses thématiques abordées, j'ai examiné ce domaine comme un journaliste scientifique, enquêtant sur un sujet à large audience.

L'histoire de la vie sur la Terre a été marquée par plusieurs phases d'extinction massive. Leur nombre (de 3 à 18) dépend du seuil considéré d'espèces décimées. Le fait que ce nombre soit discutable montre la difficulté de différencier ce phénomène du reste de l'évolution. Le plus souvent le nombre de cinq extinctions est mis en avant dans la littérature, avec le qualificatif les cinq majeures.

L'extinction K-T a été la plus étudiée et médiatisée, car elle est associée à la disparition des dinosaures. Dès 1980 Luiz et Walter Alvarez ont proposé un scénario basé sur la chute d'un astéroïde. Ce scénario reste aujourd'hui l'hypothèse la plus sérieuse sur cette catastrophe. Pour l'extinction la plus importante, celle du Permien-Trias, le scénario météoritique est aussi très crédible, parallèlement à un volcanisme intense. Pour les autres catastrophes, le débat reste très ouvert. Le bombardement accidentel de la Terre par des comètes ou des astéroïdes est souvent mis en avant.

La prise de conscience des risques entraînés pour la survie de l'humanité a conduit le gouvernement américain à des investissements considérables pour la détection de tous les objets potentiellement dangereux. Des géocroiseurs ont été identifiés, avec des risques d'impact importants. Fort heureusement, ceux-ci restent quasi nuls à l'échelle du siècle.

Une périodicité autour de 27 millions d'années (Ma) dans les extinctions a été mise en évidence en 1982. Cette observation a conduit, dans un premier temps, à faire l'hypothèse d'un compagnon obscur du Soleil, Némésis, venant régulièrement perturber le nuage de Oort, réservoir des comètes. Cette hypothèse a été vite falsifiée.

Des analyses ultérieures ont non seulement confirmé cette période mais aussi mis en évidence deux périodes autour de 65 et 140 Ma. Cette périodicité pourrait être alors due aux traversées du Soleil dans les bras spiraux de notre galaxie. Cet environnement a été aussi envisagé pour l'extinction entre l'Ordovicien et le Silurien. Celle-ci aurait pu être provoquée par une explosion d'une étoile proche ayant entraîné un sursaut gamma. Le rôle des rayons cosmiques sur le climat a conduit à une thèse associant l'évolution des espèces à l'environnement galactique.

La mission Gaia de l'Agence Spatiale Européenne doit permettre d'effectuer une cartographie précise de la Galaxie avec la détermination des positions de précision inégalée de plus d'un milliard d'étoiles. Leur mouvement et leur distance sera également connus avec une grande précision. Grâce aux données acquises, les astronomes pourront améliorer très sensiblement leur modèle de constitution, de formation et d'évolution de notre Galaxie, la Voie lactée. Ceci apportera des réponses fondamentales au scénario d'origine des extinctions massives basé sur la migration du Soleil dans la Galaxie.

Aujourd'hui nous disposons grâce à Internet d'un très large accès aux informations les plus pertinentes sur n'importe quelle question. Il faut faire bien sûr le tri, mais il n'est presque plus nécessaire, comme autrefois, de passer son temps dans une bibliothèque pour analyser la littérature.

Je donne une mention spéciale au site de Wikipédia. Cette encyclopédie en ligne, construite par les utilisateurs permet d'explorer un très grand nombre de sujets rapidement grâce au mode hypertexte. J'ai inséré quelques pages, presque sans modification, car il me semblait très artificiel de les modifier, pour respecter les droits d'auteur. Il ne s'agit pas de plagiat, la construction de ce mémoire est original, j'ai eu accès à plusieurs centaines de documents. S'il m'est arrivé parfois de faire quelques « copie-collé » c'est essentiellement pour donner au lecteur l'information pertinente à laquelle il peut accéder librement. S'il advenait que cet ouvrage soit publié, il est bien évident que je donnerai une attention toute particulièrement à remodeler mon texte.

Chapitre 1 : la Genèse version 2014

1. Du Big-Bang à la formation de la Terre

La Création

Il y a un siècle, une théorie mathématique de la gravitation développée par Albert Einstein a amené un grand bouleversement dans la conception que l'Homme avait de la cosmologie, science de l'Univers considéré comme un tout¹. Il est fascinant de voir que quelques équations dérivées de principes de physique ont conduit à une perception tout à fait nouvelle de la formation et de l'évolution de l'Univers. La théorie du Big-Bang proposée en 1948² est à la fois l'aboutissement de ce travail théorique après confrontation avec les observations astronomiques, mais aussi le point de départ de la construction d'une nouvelle vision de l'Univers, sans cesse abondée par de nouveaux éléments théoriques et par de nouvelles données, dans des domaines de plus en plus étendus.

Compte-tenu des données d'observation actuelles, le modèle cosmologique le plus pertinent conduit à la création de l'Univers il y a environ 13,8 milliards d'années³ (Ga). Pour fixer les idées, nous allons adopter, parallèlement à l'échelle temporelle ordinaire, une échelle de temps pour laquelle cette période de 13,8 Ga correspondra à 7 jours cosmiques. Ceci permettra au lecteur de faire une comparaison entre la Genèse version biblique avec celle déduite de toutes les connaissances scientifiques actuelles.

L'Univers primordial

Genèse (Wikipédia)⁴

Au commencement, Dieu créa les cieux et la terre.

La terre était informe et vide ; il y avait des ténèbres à la surface de l'abîme, et l'esprit de Dieu se mouvait au-dessus des eaux.

Dieu dit : Que la lumière soit ! Et la lumière fut. Dieu vit que la lumière était bonne ; et Dieu sépara la lumière d'avec les ténèbres. Dieu appela la lumière jour, et il appela les ténèbres nuit. Ainsi, il y eut un soir, et il y eut un matin : ce fut le premier jour.

La vision moderne de la Genèse se situe dans le cadre du modèle du Big-Bang, plus précisément dans le cadre du modèle dit Lambda-CDM⁵. Sur la Figure 1 l'histoire de l'Univers du Big-Bang jusqu'à nos jours est schématisée⁶.

¹ Albert Einstein. Cosmological considerations in the general theory of relativity. Preuss.Akad.Wiss.Berlin (Math.Phys.) 1917, 142-152 (1917)

² Ralph A. Alpher, Hans Bethe & George Gamow, *The origin of chemical elements*, *Physical Review*, **73**, 803-804 (1948). Cet article est couramment appelé $\alpha\beta\gamma$.

³ Collaboration Planck: Planck 2013: I. Overview on the products and the scientific results. Submitted to Astronomy and Astrophysics, mars 2013, arXiv: 1303.5062v1.pdf

⁴ http://fr.wikisource.org/wiki/Gen%C3%A8se_1

⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_%CE%9BCDM

⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Chronologie_de_l%27histoire_de_l%27univers

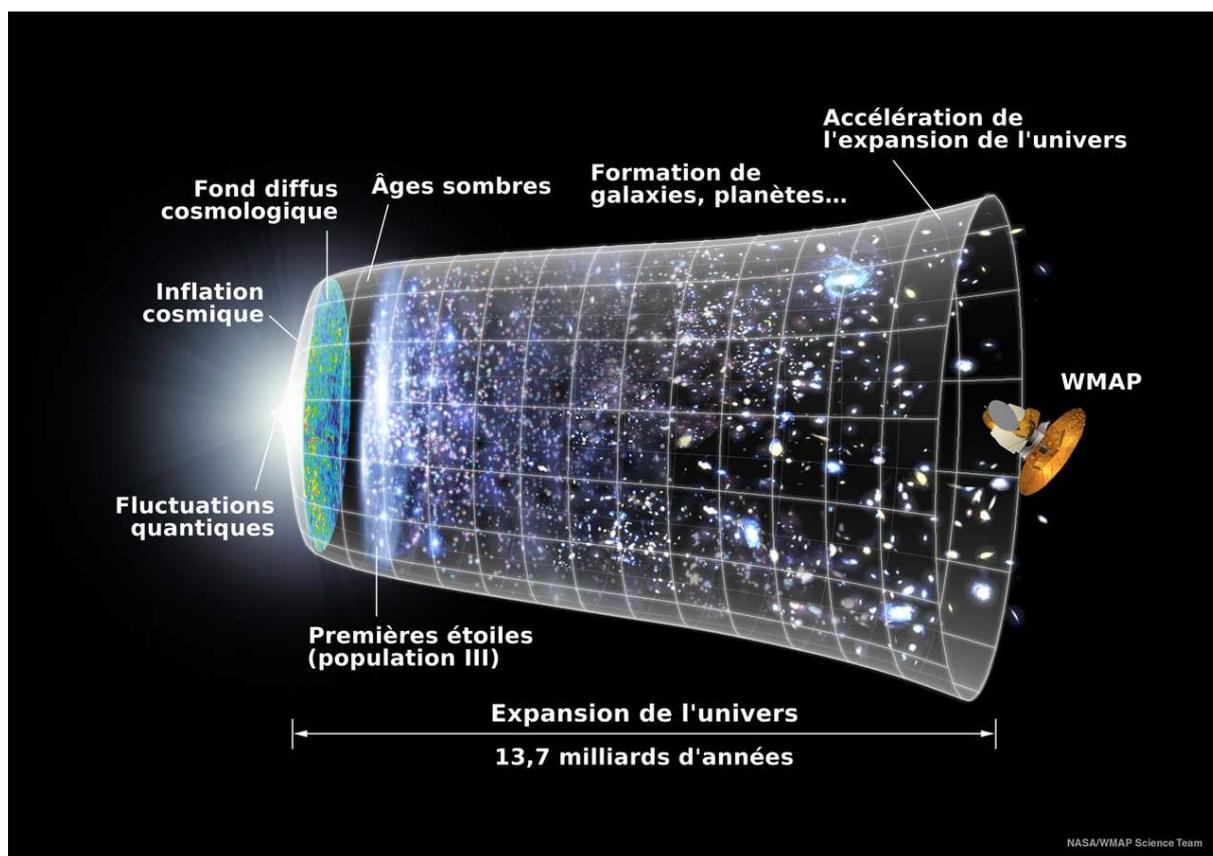


Figure 1. Représentation schématique du modèle du Big-Bang

Avec l'échelle de temps d'une genèse en 7 jours, nous sommes au premier jour et à la première seconde. Dans le modèle du Big-Bang, l'Univers est un milieu extrêmement dense, chaud et totalement opaque^{7 8}.

Pour autant qu'on puisse remonter le temps, il arrive une époque à 10^{-43} s, l'*ère de Planck*, pour laquelle la température est tellement grande (de l'ordre de 10^{32} degrés Kelvin) qu'aucune description n'est valide avec nos connaissances actuelles de la Physique.

Pour expliquer l'homogénéité de l'Univers, Alan Guth a introduit le concept d'inflation⁹. À l'époque 10^{-37} s, l'Univers se dilate à une vitesse considérable, avec une échelle croissant de manière exponentielle. La température aurait diminué de 10^{32} K à 10^{27} K. Cette phase aurait duré pendant les deux ères suivant celle de Planck.

Avec le refroidissement de l'Univers, c'est l'*ère de la Grande Unification*. La force de gravitation commence à se séparer des autres forces, l'électromagnétisme et les forces nucléaires. Cette ère suit celle de Planck et se termine 10^{-36} s après de Big-Bang.

Entre 10^{-36} s et 10^{-12} s, c'est l'*ère électrofaible*. La force nucléaire forte se sépare de la force électrofaible (unification des forces électromagnétique et de l'interaction faible). À la fin de cette période des particules exotiques, comme les bosons W, Z et de Higgs, auraient pu être créés.

⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang

⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Chronologie_de_l%27histoire_de_l%27univers

⁹ Guth, A.H. (1998). *The Inflationary Universe: Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. Vintage Books. ISBN 978-0-09-995950-2.

L'ère des quarks¹⁰ se situe entre 10^{-12} et 10^{-6} s après le Big-Bang. On pense que c'est au début de cette ère que les particules acquièrent leur masse par le mécanisme de Higgs. Les quatre forces fondamentales sont séparées mais la densité d'énergie est trop grande pour permettre la liaison des quarks pour former les hadrons.

L'ère des hadrons¹¹ suit entre 10^{-6} et 1 s après le Big-Bang. Le refroidissement de l'Univers permet la formation des hadrons, parmi ceux-ci les protons et les neutrons. L'Univers serait devenu transparent pour les neutrinos à la fin de cette époque, la rendant observable via la détection de ces particules.

L'ère des leptons se déroule ensuite, entre 1 et 10 s après le Big-Bang. La majorité des hadrons se serait annihilée avec leur antiparticule. L'Univers est dominé par les leptons. Mais en fin d'ère, la quasi-majorité des leptons est aussi annihilée.

La première lumière

Entre 10 s et 380 000 années après le Big-Bang l'Univers est dominée par les photons. Cette période est appelée ère des photons. Elle clôt la phase de l'Univers primordial. Les protons et les neutrons se combinent pour former les premiers noyaux atomiques. Cette nucléosynthèse dure entre les 3 et 20 premières minutes. L'énergie de la matière équilibre celle des rayonnements vers 70 000 ans. C'est la recombinaison des électrons avec les ions atomiques vers 380 000 années qui a rendu l'Univers transparent. Le rayonnement du fond diffus cosmologique constitue ainsi l'image de l'Univers à cette époque¹² ¹³. Nous sommes à seulement 1,7 secondes dans l'échelle d'une genèse en 7 jours.

En 1965 Penzias & Wilson découvrent un fond cosmique dans toutes les directions dans le domaine microonde¹⁴. Ce fond a été immédiatement identifié comme la lumière émise à cette époque¹⁵. Cette lumière est pratiquement uniforme sur la voute céleste. Il a fallu attendre 1992 pour la première identification des fluctuations primordiales par G. Smoot et ses collaborateurs grâce à la mission COBE¹⁶. Sur la Figure 2 nous avons porté l'image de la carte

¹⁰ Dans le modèle standard des particules élémentaires celles-ci sont réparties entre fermions et bosons. Les fermions comprennent les quarks et les leptons. La famille des leptons contient par exemple les électrons, et d'une manière générale tous les fermions qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte. Les quarks sont les composants élémentaires dont l'union conduit, entre autres, aux nucléons (protons, neutrons). C'est justement l'interaction forte qui relie les nucléons dans le noyau atomique. Par contre, l'interaction faible permet de relier l'électron au proton pour former un neutron. Les bosons sont des particules qui servent de messenger dans les différentes interactions. Le photon est le vecteur de l'interaction électromagnétique, l'interaction forte est assurée par huit gluons et l'interaction faible par les bosons Z^0 , W^- et W^+ . Toutes ces particules ont été détectées. Par contre, le graviton, particule associée à la gravitation, reste une particule hypothétique (Wikipédia).

¹¹ Les hadrons sont les particules régies par l'interaction forte. Ils sont formés de quarks et anti-quarks, assemblés par des gluons. Parmi eux, les baryons sont formés de trois quarks. Les protons et les neutrons sont des baryons. Les mésons forment une autre sous-famille des hadrons. Ils sont constitués de quarks et d'anti-quarks (Wikipédia).

¹² Gawiser, E.; Silk, J. (2000). "The cosmic microwave background radiation". *Physics Reports* 333–334: 245. arXiv:astro-ph/0002044

¹³ http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background_radiation

¹⁴ Penzias, A.A.; Wilson, R.W. (1965). "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s". *Astrophysical Journal* 142: 419–421

¹⁵ R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll and D. T. Wilkinson, "Cosmic Black-Body Radiation", *Astrophys. J.* **142**, 414 (1965)

¹⁶ D. J. Fixsen *et al.*, *The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE/FIRAS Data Set*, *Astrophysical Journal*, **473**, 576-587 (1996), astro-ph/9605054

du fond micro-onde obtenue à partir des données du satellite Planck et publiée en mars 2013¹⁷.

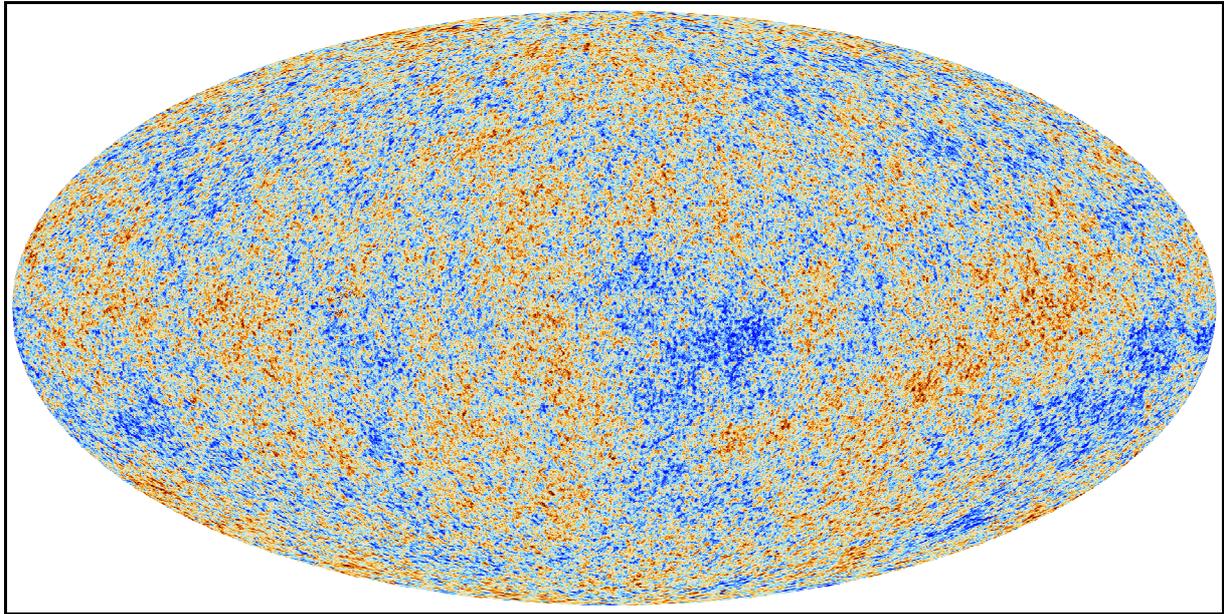


Figure 2. Carte du fond cosmologique micro-onde obtenu à partir des données de la mission Planck.

La formation de la Galaxie

Genèse (Wikipédia)

Dieu dit : Qu'il y ait une étendue entre les eaux, et qu'elle sépare les eaux d'avec les eaux. Et Dieu fit l'étendue, et il sépara les eaux qui sont au-dessous de l'étendue d'avec les eaux qui sont au-dessus de l'étendue. Et cela fut ainsi. Dieu appela l'étendue ciel. Ainsi, il y eut un soir, et il y eut un matin : ce fut le second jour.

Dieu dit : Que les eaux qui sont au-dessous du ciel se rassemblent en un seul lieu, et que le sec paraisse. Et cela fut ainsi. Dieu appela le sec terre, et il appela l'amas des eaux mers. Dieu vit que cela était bon. Puis Dieu dit : Que la terre produise de la verdure, de l'herbe portant de la semence, des arbres fruitiers donnant du fruit selon leur espèce et ayant en eux leur semence sur la terre. Et cela fut ainsi. La terre produisit de la verdure, de l'herbe portant de la semence selon son espèce, et des arbres donnant du fruit et ayant en eux leur semence selon leur espèce. Dieu vit que cela était bon. Ainsi, il y eut un soir, et il y eut un matin : ce fut le troisième jour.

Après le découplage entre la matière et le rayonnement, les fluctuations de densité s'amplifient sous l'effet de la gravitation¹⁸. Les petites structures s'agrègent progressivement, formant les galaxies, les amas de galaxies, les superamas et les grandes structures filamenteuses de l'Univers. Les étoiles et les galaxies se forment par la condensation de très grands nuages gazeux, des centaines de millions d'années après le Big-Bang.

¹⁷ http://smc.cnes.fr/PLANCK/Fr/GP_actualites.htm

¹⁸ P. J. E. Peebles, *The Large-Scale Structure of the Universe*, Princeton University Press, 1980

Le scénario de la formation et de l'évolution de notre galaxie reste en grande partie à préciser. Pour cela la mission de l'agence spatiale européenne Gaia devrait apporter des nombreuses informations¹⁹.

Le halo galactique se serait formé il y a 13,2 Ga (le 1^{er} jour à 7h18 dans l'échelle de 7 jours), il est peuplé d'une génération d'étoiles appelée Population II. Les spécialistes ont postulé qu'une première génération, dite Population III aurait été créée initialement, mais elle aurait très vite disparu, laissant pour traces des éléments chimiques qui n'auraient pas pu être formés par le Big-Bang. L'âge indiqué du halo galactique provient de l'analyse spectrale d'une étoile du halo, HE 1523-0901²⁰. Ce serait la plus âgée des étoiles dont l'âge a été déterminé. ***

Le disque galactique contenant la majorité des étoiles aurait été formé il y a environ 8,8 Ga²¹, soit le 3^{ème} jour vers 12h52 dans l'échelle d'une semaine. C'est dans ce disque que se forme la population I, génération d'étoiles à laquelle le Soleil appartient. Mais notre étoile apparaîtra un peu plus tard.

La formation du Soleil

Genèse (Wikipédia)

Dieu dit : Qu'il y ait des luminaires dans l'étendue du ciel, pour séparer le jour d'avec la nuit ; que ce soient des signes pour marquer les époques, les jours et les années ; et qu'ils servent de luminaires dans l'étendue du ciel, pour éclairer la terre. Et cela fut ainsi. Dieu fit les deux grands luminaires, le plus grand luminaire pour présider au jour, et le plus petit luminaire pour présider à la nuit ; il fit aussi les étoiles. Dieu les plaça dans l'étendue du ciel, pour éclairer la terre, pour présider au jour et à la nuit, et pour séparer la lumière d'avec les ténèbres. Dieu vit que cela était bon. Ainsi, il y eut un soir, et il y eut un matin : ce fut le quatrième jour.

Dieu dit : Que les eaux produisent en abondance des animaux vivants, et que des oiseaux volent sur la terre vers l'étendue du ciel. Dieu créa les grands poissons et tous les animaux vivants qui se meuvent, et que les eaux produisirent en abondance selon leur espèce ; il créa aussi tout oiseau ailé selon son espèce. Dieu vit que cela était bon. Dieu les bénit, en disant : Soyez féconds, multipliez, et remplissez les eaux des mers ; et que les oiseaux multiplient sur la terre. Ainsi, il y eut un soir, et il y eut un matin : ce fut le cinquième jour.

On ne dispose pas de données précises sur la manière dont s'est formée le Soleil. Aujourd'hui, grâce à l'étude des météorites il est admis qu'il est né il y a environ 4,6 milliards d'années (Ga) dans un environnement riche, similaire à la nébuleuse d'Orion^{22 23}. Cela correspond au 5^{ème} jour à 16h00 dans une genèse en 7 jours. Le milieu était formé des éléments formés lors du Big-Bang – hydrogène, hélium et lithium – enrichis par des éléments plus lourds issus de

¹⁹ http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia_overview

²⁰ A. Frebel et al., *Discovery of HE 1523-0901 a strongly r-process-enhanced metal-poor with detected Uranium*, The Astrophysical Journal, 660, L117, 2007.

²¹ E.F. Del Peloso. *The age of the Galactic thin disk from Th/Eu nucleocosmochronology*. Astronomy & Astrophysics, 440, 1153, 2005.

²² http://fr.wikipedia.org/wiki/Formation_et_%C3%A9volution_du_Syst%C3%A8me_solaire

²³ J. Jeff Hester, Steven J. Desch, Kevin R. Healy et Laurie A. Leshin, « The Cradle of the Solar System », *Science*, vol. 304, n° 5674, 2004, p. 1116–1117

la nucléosynthèse dans des étoiles de précédentes générations²⁴. Ces éléments ont été essentiels pour l'émergence de la vie sur Terre. Comme l'a écrit Hubert Reeves, nous sommes ainsi de la *poussière d'étoiles*²⁵.

La nébuleuse pré-solaire, d'une taille comprise entre 7000 et 20000 UA²⁶ s'est rapidement effondrée pour former une étoile et son disque protoplanétaire²⁷. Sur la Figure 3, on a représenté les différentes phases de la formation du proto-Soleil.

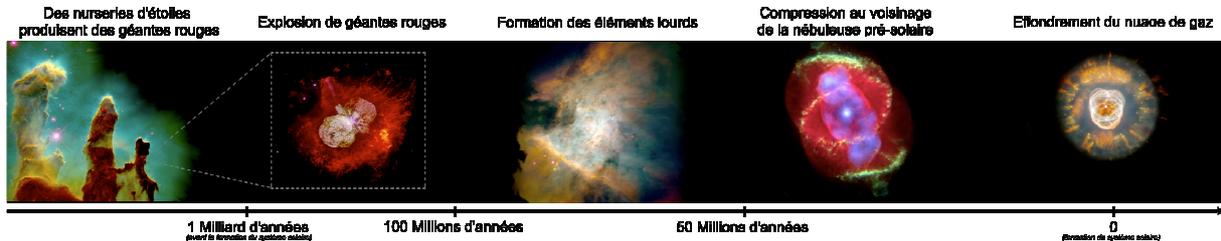


Figure 3. De la nébuleuse primitive à la formation de la Terre.

La formation de la Terre

Les planètes se forment progressivement. La Terre aurait été formée il y a 4,55 Ga, soit 50 Ma après le Soleil. Cela correspond au 5^{ème} jour à 16:36:30 dans la chronologie à 7 jours. La jeune Terre aurait été percutée par un autre objet, Theia, de la taille de Mars, ce qui a conduit à la formation de la Lune^{28 29}. Sur la Figure 4, nous avons représenté les étapes de la formation du proto-Soleil jusqu'à la Formation du couple Terre-Lune. Les deux frises sont des compositions à partir d'images de la NASA et elles figurent sur la page *Wikipédia* sur la Formation et l'évolution du Système solaire.

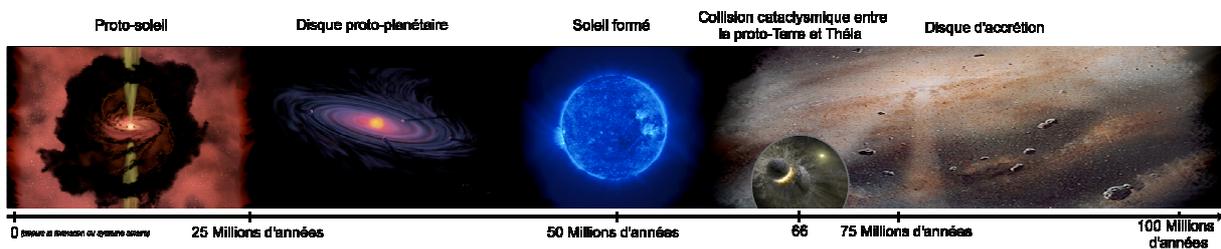


Figure 4. De la formation du proto-Soleil jusqu'à la formation du couple Terre-Lune.

2. La vie terrestre

Avant de poursuivre sur l'Histoire de la Terre, il est nécessaire de préciser ce qu'est la vie, comment elle est apparue et comment on classe les organismes vivants.

²⁴ Martin Bizzarro, David Ulfbeck, Kristine Thrane, James N. Connelly et Bradley S. Meyer, « Evidence for a Late Supernova Injection of ⁶⁰Fe into the Protoplanetary Disk », *Science*, vol. 316, n° 5828, 2007, p. 1178–1181

²⁵ Hubert Reeves, *Poussières d'étoiles*, Le Seuil, Paris, 1984

²⁶ UA : unité astronomique, distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 149 597 870,700 km

²⁷ A. P. Boss, R. H. Durisen (2005). "Chondrule-forming Shock Fronts in the Solar Nebula: A Possible Unified Scenario for Planet and Chondrite Formation". *The Astrophysical Journal* **621** (2): L137–L140. arXiv:astro-ph/0501592

²⁸ Canup, R. M. 2008. Lunar forming collisions with pre-impact rotation. *Icarus*, 196, 518-538.

²⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Hypoth%C3%A8se_de_l'impact_g%C3%A9ant

Qu'est-ce que la Vie?

Il est bien difficile d'expliciter ce qu'est précisément la vie, sous sa forme la plus générale. Sur la page *Wikipédia* consacrée à la vie, la définition qui en est donnée est plutôt complexe³⁰ : "*La vie est un phénomène caractérisant l'état dynamique ou latent d'unités complexes auto-organisées et homéostatiques de la matière (organismes vivants), possédant éventuellement une capacité de duplication et d'évolution*". Cette phrase soulève plusieurs interrogations et semble occulter ce qui nous semble trivial.

En premier lieu, il nous paraît évident que la matière vivante n'est pas inerte, comme l'est une pierre ou de l'eau dans un verre. Mais l'eau d'une rivière n'est pas inerte et il n'y a aucune ambiguïté sur le fait qu'elle n'est pas vivante. Une deuxième propriété triviale d'un organisme vivant réside dans le fait qu'il s'inscrit dans une durée limitée : il naît, il évolue et il meurt. Entre la naissance et la mort, il peut subir de nombreuses mutations, tout en étant considéré comme étant le même organisme. C'est le cas de l'homme, mais d'une manière plus spectaculaire c'est aussi celui des papillons, qui apparaissent sous des aspects extrêmement différents au cours de leur courte existence. Une troisième propriété des organismes vivants consiste dans leur capacité de reproduction. Un être peut s'auto-reproduire ou se reproduire avec d'autres êtres similaires.

*"Dans L'aventure du vivant, le biologiste Joël de Rosnay énumère trois propriétés fondamentales : l'autoconservation (qui est la capacité des organismes à se maintenir en vie par l'assimilation, la nutrition, les réactions énergétiques de fermentation et de respiration), l'autoreproduction (leur possibilité de propager la vie) et l'auto-régulation (les fonctions de coordination, de synchronisation et de contrôle des réactions d'ensemble)."*³⁰

Dans le même article de *Wikipédia* on peut lire aussi : "*Les organismes vivants comportent au moins une cellule ; c'est-à-dire une membrane fermée séparant du milieu extérieur un milieu intérieur, lequel contient le métabolisme et éventuellement le matériel génétique.*"³⁰ Le métabolisme constitue l'ensemble des réactions physico-chimiques qui permet à un être vivant de la maintenir en vie, de se reproduire, de se développer et de répondre aux stimulus de son environnement³¹. C'est en fait tout ce qui fait l'être vivant.

La frontière entre le vivant et le non-vivant apparaît aujourd'hui de plus en plus floue. Pour plusieurs biologistes la question qui se poserait aujourd'hui est surtout celle de savoir comment l'évolution darwinienne a commencé^{32 33}, cette question restant très ouverte.

L'origine de la Vie

L'origine de la vie, appelée aussi *abiogénèse*, reste très incertaine³⁴. On considère qu'elle a dû s'effectuer par étapes. Dans des travaux pionniers, Alexandre Oparine a postulé en 1924 que des molécules organiques simples ont été fabriquées très tôt dans le passé de la Terre³⁵. Le généticien anglais John Haldane a développé indépendamment des théories similaires³⁶.

³⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Vie>

³¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tabolisme>

³² http://fr.wikipedia.org/wiki/Origine_de_la_vie

³³ Tessera M. *Is A n+1 Definition of Life Useful?*, *J. Biomol. Struct. Dyn.* 2012;**29**(4):635-636

³⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Origine_de_la_vie

³⁵ Oparine, A.I. *L'origine de la vie*, éditions de Moscou, 1924.

³⁶ J. Haldane. *The Causes of Evolution* (1932)

Ultérieurement, en 1953 Stanley Miller et Harold Urey ont vérifié cette hypothèse sous forme expérimentale³⁷. Mais il existe toujours une grande difficulté conceptuelle et expérimentale pour passer des molécules ainsi formées à une matière vivante. Deux voies différentes ont été proposées, l'une basée sur les gènes et l'autre sur le métabolisme.

Le monde à l'ARN

Une des thèses les plus avancées est celle du *monde à l'ARN*³⁸. Toutes les cellules vivantes contiennent une molécule d'*acide désoxyribo nucléique* (ADN)³⁹. Cette molécule renferme les informations nécessaires au développement et au fonctionnement de l'organisme. Elle contient l'information génétique. Elle forme une double hélice avec deux brins complémentaires. Chaque brin est constitué de nucléotides. Seuls quatre nucléotides sont présents, l'*Adénine* la *Thymine*, la *Guanine* et la *Cytosine*. L'*acide ribonucléique*, ARN, se trouve aussi dans presque tous les organismes vivants. Il diffère de l'ADN par l'absence de la thymine, remplacée par l'*Uracile*. Il n'est constitué le plus souvent que d'un seul brin. L'ARN a plusieurs fonctions cellulaires.

Dans le *monde à l'ARN* développé par Walter Gilbert en 1986⁴⁰ il est supposé que l'ARN serait le précurseur de toutes les molécules biologiques, comme l'ADN et les protéines. Cette théorie est étayée par le fait que d'une part l'ARN permet de transmettre une information génétique et que, d'autre part, il pourrait assurer des tâches métaboliques.

L'argile, qui se trouve en quantité abondante sur Terre, est constituée d'un empilement de couches fines. Entre les différentes couches de l'argile peuvent se glisser certaines petites molécules organiques, ce qui permet une adsorption importante. Le chimiste anglais Graham Cairns-Smith a développé l'hypothèse selon laquelle cette catalyse a pu permettre la polymérisation des acides aminés et/ou des acides nucléiques⁴¹.

L'américain Thomas Cech, prix Nobel de Chimie 1989, indiqua ensuite que l'ARN a pu être la première molécule vivante du fait de ces propriétés catalytiques et auto-catalytiques⁴². Le passage des matériels génétiques à des véritables organismes vivants, capables de réplication et ayant un métabolisme, reste l'une des questions fondamentales de la science du 21^e siècle.

La panspermie

La possibilité d'une origine extra-terrestre du matériel biologique, voire de la vie elle-même, a souvent été évoquée. Des molécules organiques ont été découvertes dans des météorites⁴³. Ceci a conforté l'hypothèse de la panspermie selon laquelle la vie elle-même serait d'origine extra-terrestre, une idée très ancienne, reprise en 1981 par Fred Hoyle et Chandra

³⁷ Stanley L. Miller, « *A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions* », Science, vol. 117, n° 3046, 1953, p. 528-529

³⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Hypoth%C3%A8se_du_monde_%C3%A0_ARN

³⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/ADN>

⁴⁰ Gilbert, Walter (February 1986). "The RNA World". *Nature* **319** (6055): 618

⁴¹ G. Cairns-Smith. *Seven clues to the origin of life* (1985). Traduction française : *L'énigme de la vie* (1990)

⁴² http://fr.wikipedia.org/wiki/Origine_de_la_vie

⁴³ P. Ehrenfreund, S.B. Charnley (2000) "Organic molecules in the ISM, comets and meteorites": A voyage from dark clouds to the early Earth" *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 38, 427.

Wickramasinghe⁴⁴. Ces auteurs ont aussi proposés que des virus aient pu avoir une origine extra-terrestre⁴⁵. Cette hypothèse est en général rejetée par les spécialistes⁴⁶

3. Les arbres de la vie

Les premiers organismes vivants

Les plus anciens fossiles actuellement connus seraient ceux de *cyanobactéries* trouvées sur des rochers australiens datant de 3,5 Ga⁴⁷. Les Cyanobactéries forment un embranchement des bactéries appelées autrefois algues bleu-vert⁴⁸. Elles réalisent la photosynthèse, en fixant le gaz carbonique, libérant son oxygène. Organisées en colonies, elles auraient formé, grâce à leur capacité de produire du calcaire, les *stromatolithes*⁴⁹ (ou stromatolites), roches calcaires formées sur le littoral marin. De telles structures sont toujours en voie de constitution sur notre planète.

Les Cyanobactéries sont des *procaryotes*⁵⁰, c'est à dire des êtres vivants unicellulaires sans noyau. Les procaryotes regroupent les *bactéries* et les *archées*. Ces dernières sont similaires aux bactéries. Il a fallu de nombreux travaux sur leur génétique, leur biologie et leur biologie moléculaire pour montrer qu'il s'agissait d'un règne vivant à part⁵¹. Les archéens sont souvent identifiés dans des conditions de vie extrêmes du point de vue physico-chimiques. La question de savoir si le premier être vivant était une bactérie ou une archée reste sans réponse certaine.

La classification linnéenne

Pour toute civilisation, aussi primitive qu'elle soit, il est indispensable de pouvoir nommer les organismes vivants dans son environnement. La classification du vivant a été ainsi l'une de leurs activités scientifiques primordiales.

La classification traditionnelle est issue de celle de Linné⁵². Les êtres vivants sont d'abord classés en règnes. Aujourd'hui six règnes ont été identifiés : animal, plante, champignon, protiste, bactérie, archée. Les protistes forment un règne hétérogène comprenant tous les eucaryotes autres que les animaux, les champignons et les plantes⁵³. Les Eucaryotes forment un domaine biologique comprenant tous les organismes unicellulaire ou pluricellulaire qui se caractérisent par la présence d'un noyau et de mitochondries dans leurs cellules⁵⁴. Chaque règne est ensuite subdivisé en embranchements, puis chaque embranchement en classes,

⁴⁴ Hoyle, F. and Wickramasinghe, N.C., 1981. *Evolution from Space* (Simon & Schuster Inc., NY, 1981 and J.M. Dent and Son, Lond, 1981)

⁴⁵ Fred Hoyle, Chandra Wickramasinghe and John Watson (1986). *Viruses from Space and Related Matters*. University College Cardiff Press..

⁴⁶ Joseph Patrick Byrne (2008). *Encyclopedia of Pestilence, Pandemics, and Plagues (entry on Panspermia)*.

⁴⁷ <http://www.ucmp.berkeley.edu/bacteria/cyanofr.html>

⁴⁸ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cyanobacteria>

⁴⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Stromatolithe>

⁵⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Procaryote>

⁵¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Archaea>

⁵² http://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_scientifique_des_esp%C3%A8ces

⁵³ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Protista>

⁵⁴ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Eucaryotes>

chaque classe en ordres, chaque ordre en familles, chaque famille en genres et finalement chaque genre en espèces (Cf. Figure 5⁵⁵). Des subdivisions intermédiaires ont été introduites pour raffiner la description. Pour établir la classification les spécialistes utilisent des caractéristiques de l'être étudié appelés caractères taxinomiques. Les taxons correspondent aux groupes d'êtres ayant les mêmes caractères taxinomiques. Ainsi, les classifications linnéennes sont dites aussi taxinomiques.

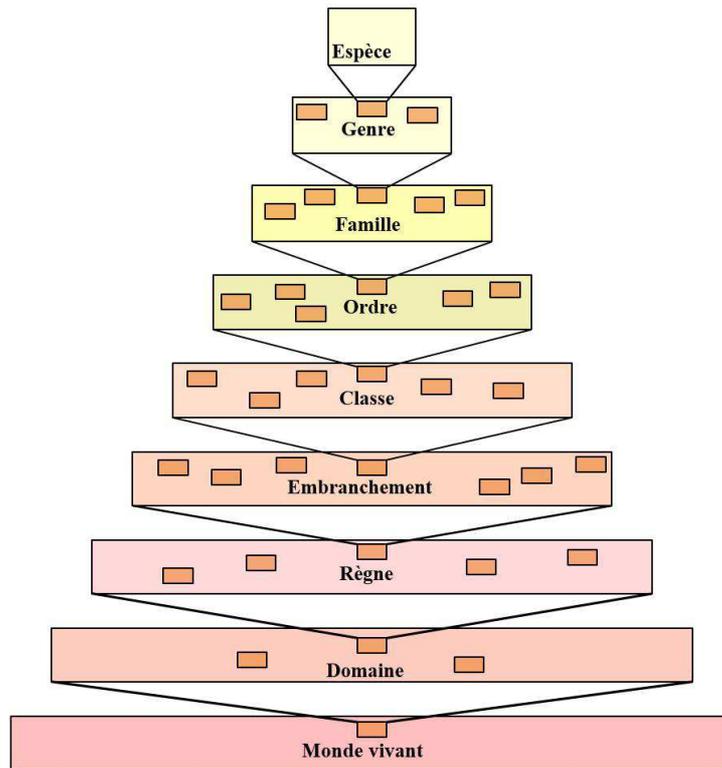


Figure 5. Arbre du vivant dans une classification linnéenne.

Dans ce système l'homme est classé de la manière suivante³⁴:

(vivant) → règne animal → embranchement des vertébrés → classe des mammifères → ordre des primates → famille des hominidés → genre *Homo* → espèce *Homo sapiens*

De nombreux algorithmes ont été proposés pour la construction des arbres à partir des caractères observés. La validité de la construction dépend d'abord des caractères pris en compte. Ceux-ci peuvent être d'ordre biologique, phénotype⁵⁶ ou physiologique.

À l'expérience, cette approche de la partition du vivant s'est révélée fragile, en particulier parce qu'elle ne tient pas compte de l'aspect évolutif des espèces. En fait elle peut être comparée à une photographie de l'organisation du vivant, alors que pour décrire l'ensemble des êtres depuis la création de la Terre on a besoin d'une vision dynamique, tenant compte des créations et des mutations.

⁵⁵ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Taxonomic_hierarchy.svg

⁵⁶ *Le phénotype est l'ensemble des caractères observables d'un individu. Très souvent, l'usage de ce terme est plus restrictif : le phénotype est alors considéré au niveau d'un seul caractère, à l'échelle cellulaire ou encore moléculaire. L'ensemble des phénotypes observables chez un individu donné est parfois appelé le phénoème (Wikipédia).*

La classification phylogénétique

La *classification phylogénétique* a été construite dans la seconde partie du 20^e siècle pour répondre à ce besoin⁵⁷. Il ne s'agit plus de classer par les caractères présents, mais d'indiquer les groupes ayant des liens sur le plan de l'évolution. Au lieu de définir un arbre de la vie avec des taxons, cette classification établit des *clades*. Un clade est un groupe formé par un ancêtre et tous ses descendants. La *cladistique*, science initiée par Will Hennig, conduit à la formation des clades, en tenant compte de l'information disponible sur chaque organisme⁵⁸. Cette construction dépend de la connaissance acquise sur leur génétique. Des méthodes mathématiques ont été construites pour optimiser la construction de l'arbre phylogénétique, en tenant compte de l'information disponible.

Aujourd'hui la classification phylogénétique remplace progressivement la classification linnéenne. Elle est évidemment devenue un outil indispensable pour les paléontologues. Il est impossible de parler de l'histoire de la vie terrestre avec une approche basée sur la classification des êtres actuellement vivants. Les organismes disparus sont dans des clades ayant, ou non, des descendants pouvant être des taxons complètement différents dans le système linnéen.

La classification phylogénétique a conduit ainsi à des surprises. Par exemple, les plus proches parents des crocodiles sont les oiseaux, qui eux-mêmes sont des dinosaures dans cette classification. Les reptiles, les poissons, ne forment pas des clades. Cette dénomination, reptile ou poisson, n'a qu'un sens *paraphylétique*, c'est à dire qu'il ne regroupe pas tous les descendants d'une même souche⁵⁹.

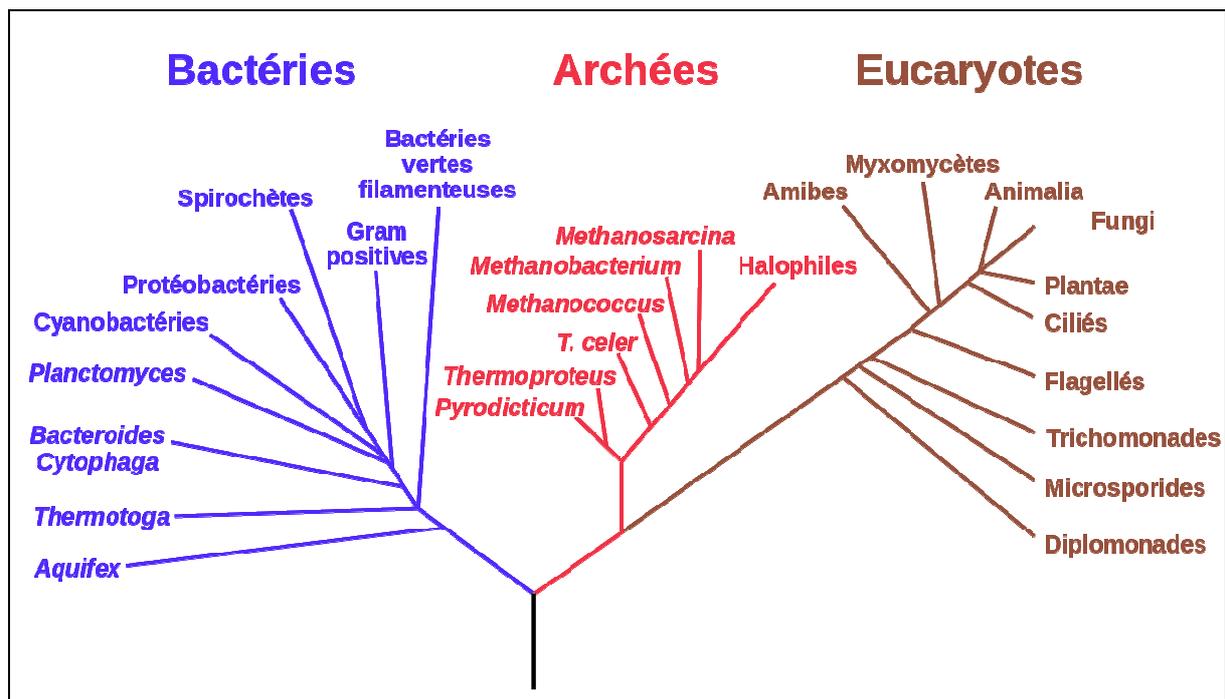


Figure 6. Arbre phylogénétique montrant la séparation entre les bactéries, les archées et les eucaryotes.

⁵⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_phylog%C3%A9n%C3%A9tique

⁵⁸ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cladistique>

⁵⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Paraphylie>

La cladistique a conduit à la construction d'arbres de vie. On ne retrouve pas la division de la classification linnéenne. Sur la Figure 6 l'arbre de vie séparant les procaryotes (bactéries et archées) et les eucaryotes, construit par Woese et al.⁶⁰, a été porté⁶¹. La classification phylogénétique du vivant d'après H. Le Guyader et al.⁶² est indiquée sur la Figure 7⁶³.

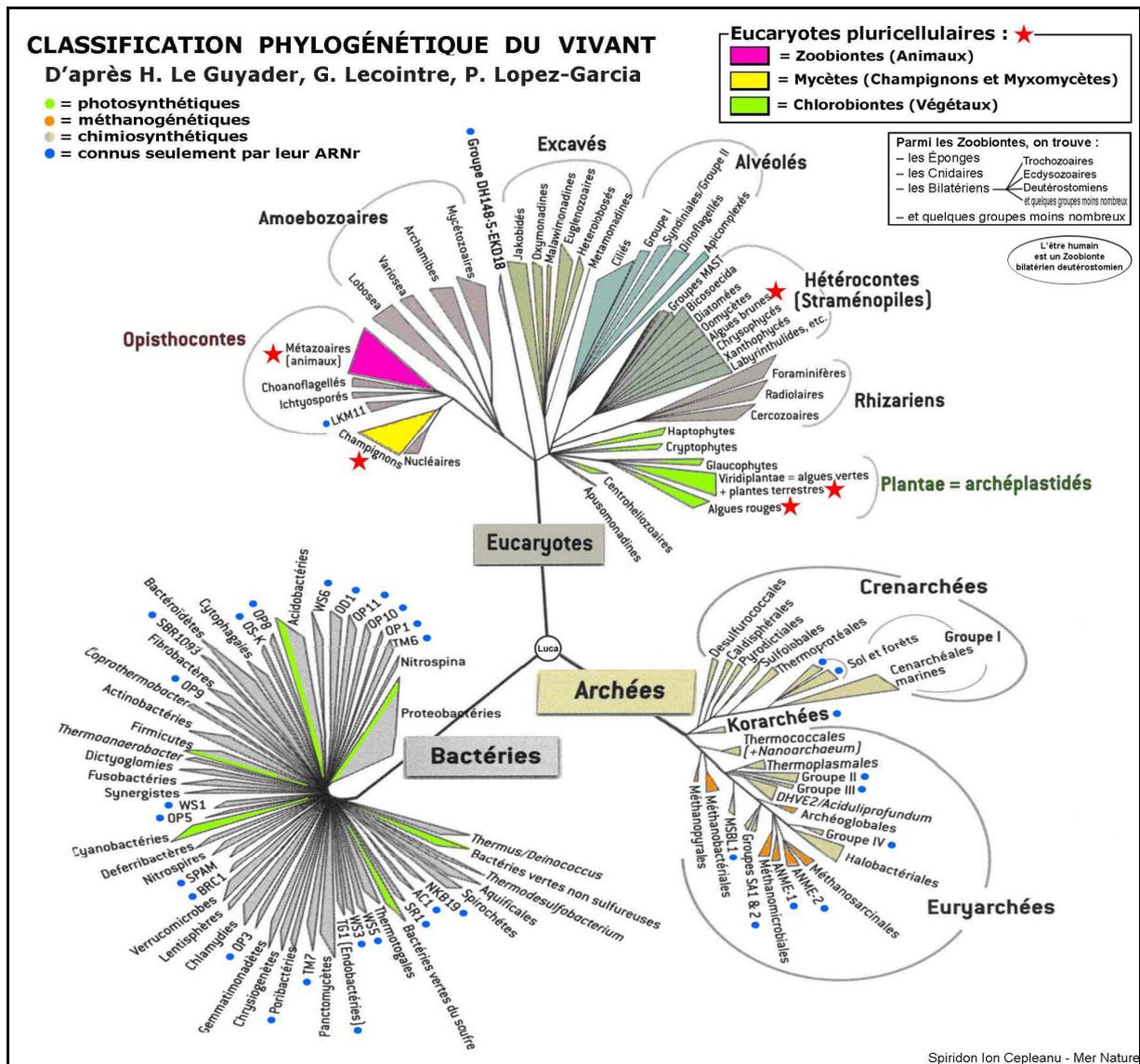


Figure 7. Classification phylogénétique du vivant.

Dans l'article de Wikipédia sur la classification phylogénétique⁶⁴ l'Homme est classé de la manière suivante:

⁶⁰ Carl R. Woese, Otto Kandler & Mark L. Wheelis, "Towards a natural system of organisms : Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol.87, No.12, June 1, 1990, p. 4576-4579.

⁶¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_phylog%C3%A9n%C3%A9tique

⁶² Lecointre Guillaume et Le Guyader Hervé, *Classification phylogénétique du vivant*, page 13, 2^e édition, 2002, Belin, Paris,

⁶³ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phylogenetics-french.jpg>

⁶⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_phylog%C3%A9n%C3%A9tique

- **Espèce** *Homo sapiens*
- **Genre** *Homo* : inclut les espèces fossiles comme *Homo neanderthalensis* ou *Homo erectus* et ne représente plus, d'encore vivant aujourd'hui, que la seule espèce *Homo sapiens*.
- Hominines : les genres *Australopithecus* et *Homo*: 1 espèce vivante
- Homininiens : les deux espèces de chimpanzés et les hominines: 3 espèces
- Homininés : gorille et Homininés (sous-famille *Homininae* dans la classification classique): 5 espèces
- Hominidés : on ajoute l'orang-outan: 7 espèces
- Hominoïdés : on ajoute les gibbons: 23 espèces (source NCBI)
- Catarrhiniens : les singes de l'ancien monde
- Simiiformes : singes
- Haplorrhiniens : singes et tarsiers
- Primates : la plus grande partie de l'ancien ordre *Primates* dans la classification classique
- Euarchontes : s'ajoutent les Scandentiens (toupayes) et Dermoptères
- Euarchontoglires : s'ajoutent les Glires (lapins et rongeurs)
- Boréoeuthériens : s'ajoutent les Laurasiathériens (insectivores, carnivores et ongulés)
- Euthériens : s'ajoutent les Xénarthres et les Afrothériens pour compléter les mammifères placentaires
- Thériens : s'ajoutent les marsupiaux
- Mammifères : l'ancienne classe du même nom, les précédents plus les monotrèmes (ornithorynques et échidnés)
- Amniotes : s'ajoutent les anciennes classes des reptiles et des oiseaux
- Tétrapodes : s'ajoutent en gros les amphibiens
- Sarcoptérygiens : s'ajoutent dipneustes puis coelacanthes
- Ostéichthyens : s'ajoutent les actinoptérygiens (la majeure partie des « poissons osseux »)
- Gnathostomes : s'ajoutent les chondrichthyens (requins et raies)
- Vertébrés : puis les lamproies
- Crâniates : s'ajoutent les myxines
- Chordata : s'ajoutent amphioxus et ascidies
- Deutérostomiens : s'ajoutent les échinodermes (étoiles de mer, oursins...) et hémichordés
- Bilatériens : animaux symétriques : s'ajoutent aux précédents, entre autres, les protostomiens qui incluent, entre beaucoup d'autres, différents groupes de vers, les arthropodes (insectes), les mollusques (escargots)
- Eumétazoaires : animaux organisés, s'ajoutent aux précédents les cnidaires par exemple
- Métazoaires : l'ancien règne animal, s'ajoutent aux précédents différents groupes d'éponges
- Opisthocoentes : s'ajoutent les champignons
- Eucaryotes : Le domaine *Eukaryota* de la classification classique, êtres vivants à cellules à noyau ; s'ajoutent aux précédents listés ci-avant la lignée verte (algues vertes, algues rouges, plantes à fleurs), la lignée brune (algues brunes...) et toute une collection de groupements d'espèces unicellulaires

La différence entre la classification linnéenne et la classification phylogénétique est frappante. Cette dernière introduit un beaucoup plus grand nombre de niveaux, correspondant à l'apparition d'une descendance nouvelle. Cette approche donne aussi le sentiment qu'en remontant le temps, on regroupe progressivement tous les êtres vivants jusqu'à un ancêtre unique. Ceci n'est pas prouvé. Il n'est pas exclu que la vie ait pu éclore en différents lieux, de manière indépendante, et que chaque espèce primitive ait conduit à sa propre descendance, avec le plus souvent des branches mortes. Néanmoins, l'hypothèse courante consiste dans le fait que tous les organismes vivants seraient issus d'un seul être, le dernier ancêtre commun, également appelé LUCA pour *Last Universal Common Ancestor*⁶⁵. Ce serait le clade racine de la classification phylogénétique. Les eucaryotes, les archées et les bactéries descendraient de cet ancêtre, sans qu'on ne sache vraiment comment s'est réalisée l'arborescence entre ces trois règnes et à quelle époque.

⁶⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Dernier_anc%C3%AAtre_commun_universel

4. Les quatre éons

Les spécialistes de notre planète ont divisé son histoire en quatre périodes appelées éons.

Genèse (Wikipédia)

Dieu dit : Que la terre produise des animaux vivants selon leur espèce, du bétail, des reptiles et des animaux terrestres, selon leur espèce. Et cela fut ainsi. Dieu fit les animaux de la terre selon leur espèce, le bétail selon son espèce, et tous les reptiles de la terre selon leur espèce. Dieu vit que cela était bon. Puis Dieu dit : Faisons l'homme à notre image, selon notre ressemblance, et qu'il domine sur les poissons de la mer, sur les oiseaux du ciel et sur tous les reptiles qui rampent sur la terre. Dieu créa l'homme à son image, il le créa à l'image de Dieu, il créa l'homme et la femme. Dieu les bénit, et Dieu leur dit : Soyez féconds, multipliez, remplissez la terre, et l'assujettissez ; et dominez sur les poissons de la mer, sur les oiseaux du ciel, et sur tout animal qui se meut sur la terre. Et Dieu dit : Voici, je vous donne toute herbe portant de la semence et qui est à la surface de toute la terre, et tout arbre ayant en lui du fruit d'arbre et portant de la semence : ce sera votre nourriture. Et à tout animal de la terre, à tout oiseau du ciel, et à tout ce qui se meut sur la terre, ayant en soi un souffle de vie, je donne toute herbe verte pour nourriture. Et cela fut ainsi. Dieu vit tout ce qu'il avait fait ; et voici, cela était très bon. Ainsi, il y eut un soir, et il y eut un matin : ce fut le sixième jour.

Ainsi furent achevés les cieux et la terre, et toute leur armée. Dieu acheva au septième jour son œuvre, qu'il avait faite; et il se reposa au septième jour de toute son œuvre, qu'il avait faite. Dieu bénit le septième jour, et il le sanctifia, parce qu'en ce jour il se reposa de toute son œuvre qu'il avait créée en la faisant.

L'éon Hadéen

Il part de la formation de la Terre, il y a environ 4,55 Ga ; il s'arrête à l'apparition de la vie, il y a 3,8 Ga^{66 67}. Dans une chronologie à 7 jours, cet éon s'étend du 5^{ème} jour 16h36 jusqu'au 6^{ème} jour 1h44. L'Hadès désignait l'enfer chez les anciens Grecs. Il est vrai que la surface de la Terre n'avait rien d'hospitalier et son atmosphère était irrespirable. Progressivement les continents vont se former dans ce magma brûlant. Les plus vieilles pierres terrestres dateraient d'environ 200 Ma après l'effondrement de la nébuleuse pré-solaire (époque 0), 150 Ma après la formation du Soleil. La Terre constitue alors une croûte de roche basaltique. Des géologues ont pu en identifier sur quelques sites, au Groenland, au Canada et en Australie. À 300 Ma les océans apparaissent⁶⁸. Dans la chronologie à 7 jours, cela correspond au 5^{ème} jour 19h39. Une partie de l'eau aurait pu provenir de la chute de comètes^{69 70}.

En vertu des lois de la dynamique céleste, les planètes géantes migrent plus loin dans le Système solaire moins d'un million d'années après la formation de la Terre. Cette phase est appelée *le Grand Tack* (le grand virage)⁷¹. Des résonances orbitales⁷² entre Jupiter et Saturne

⁶⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_Terre

⁶⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Had%C3%A9en>

⁶⁸ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Had%C3%A9en>

⁶⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Origine_de_l'eau_sur_la_Terre

⁷⁰ http://www.lesia.obspm.fr/perso/jacques-crovisier/promenade/pro_comete_origine.html

⁷¹ K.J. Walsh et al., *A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration*, Nature, 475, 206-209, 2011.

conduisent entre les temps 500 et 650 Ma à un *Grand Bombardement Tardif*^{73 74}. Soit du 5^{ème} jour à 22h10 au 6^{ème} jour à 00h11 avec une échelle de 7 jours.

C'est 800 Ma après la formation du Soleil que seraient apparus les premières traces de vie sur Terre⁷⁵.

L'éon Archéen

Il se situe entre la naissance de la vie vers -3,8 Ga et -2,5 Ga⁷⁶, soit le 6^{ème} jour de 1h44 à 17h34, dans la chronologie à 7 jours. Le terme signifie origine.

Un supercontinent, le *Vaalbara* s'est formé vers -3,6 Ga. Vers -2,5 Ga, il donne naissance au continent *Ur*.

L'éon est divisé en quatre ères. À l'Éoarchéen (-3,8 à -3,6 Ga) on suppose que les procaryotes seraient apparus. La forme de vie la plus ancienne identifiée (une cynobactérie de 3,48 Ga) remonterait au Paléoarchéen (-3,6 à -3,2 Ga). Au Mésoarchéen (-3,2 à -2,8 Ga) l'existence de stromatolithes est avérée. Comme nous l'avons indiqué, ces roches sont la trace sédimentaire des premières de vie en colonies fixées (Figure 8). Le Néoarchéen (-2,8 à -2,5 Ga) forme la quatrième ère de cet éon.



Figure 8. Exemple de stromatolithe. Cette roche photographiée dans le Montana daterait d'un milliard d'années.

L'éon Protérozoïque

Il précède le Cambrien⁷⁷. Il s'étend de -2,5 Ga à -542 Ma. Dans la chronologie à 7 jours, il commence le 6^{ème} jour à 17h34 et finit le 7^{ème} jour à 17h25. Il est divisé en trois ères: le

⁷² Une résonance orbitale est un effet dynamique lié au fait que deux planètes effectuent leur rotation autour du Soleil dans avec des périodes en rapport fractionnaire. Pour le Grand Bombardement Tardif, Jupiter devait avoir une période moitié de celle de Saturne.

⁷³ http://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_Nice

⁷⁴ R. Gomes, H. F. Levison, K. Tsiganis, A. Morbidelli, « Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets », *Nature*, vol. 435, 2005, p. 466

⁷⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_Terre

⁷⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Arch%C3%A9en>

⁷⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%A9rozo%C3%AFque>

Paléoprotérozoïque (-2,5 Ga à -1,6 Ga), le Mésoprotérozoïque (-1,6 Ga à -1 Ga) et le Néoprotérozoïque (-1 Ga à -542 Ma).

Le supercontinent *Ur*⁷⁸ apparu vers -2,5 Ga aurait donné naissance vers -1,1 Ga au supercontinent *Rodinia*⁷⁹, entouré de l'océan *Mirovia*⁸⁰. Un événement géophysique majeur conduit à sa rupture vers -750 Ma. Au cours du Néoprotérozoïque, entre -600 et -540 Ma, les terres émergées forment un supercontinent, la *Pannotia*⁸¹.

Au cours de cette période, vers -2,4 Ga, l'oxygène, produit dans les océans par les cyanobactéries⁸² n'est plus absorbée par le fer marin. Il est rejeté dans l'atmosphère. C'est la *Grande Oxydation*⁸³. Les organismes terrestres anaérobies sont décimés.

Entre -2,4 Ga et -2,1 Ga se situe la *glaciation huronienne*⁸⁴. Celle-ci peut dériver directement de la Grande Oxydation, l'oxygène ayant réagi avec le méthane, réduisant ainsi fortement l'effet de serre. Mais cette réduction de l'effet de serre peut être aussi due à une accalmie du volcanisme durant 250 Ma. Cet épisode glaciaire fut l'un des plus intenses et des plus longs de l'histoire de la Terre.

Les géologues ont déduit de l'existence de sédiments apparemment glaciaires qu'il y a plus de 650 Ma la Terre avait pu être une *boule de neige*⁸⁵, pendant une période de plusieurs millions d'années. Même si cette thèse est controversée, il est certain qu'à cette période a eu lieu un événement majeur aux conséquences écologiques importantes. On a proposé que les glaciations n'aient été que la conséquence des crises écologiques, la diminution du carbone atmosphérique conduisant à réduire l'effet de serre, et donc à un refroidissement. On a aussi émis l'idée que ce refroidissement pouvait être la conséquence d'un impact de météorite. Cette hypothèse est étayée par la présence d'iridium⁸⁶ dans les couches géologiques associées à cette époque.

Au cours de cet éon, des eucaryotes apparaissent. C'est le cas des *acritarches*⁸⁷ formant un phytoplancton. Les cyanobactéries continuent à se développer, formant des stromatolithes par sédimentation.

Dans les pierres sédimentaires de la fin de cette période, on trouve des fossiles de *Dickinsonia*⁸⁸ (Figure 9), un être vivant pluricellulaire classé parfois dans la catégorie des lichens. Sa taille pouvait atteindre une dizaine de centimètres.

⁷⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Ur_%28continent%29

⁷⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Rodinia>

⁸⁰ <http://en.wikipedia.org/wiki/Mirovia>

⁸¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pannotia>

⁸² Elles forment un embranchement des bactéries, autrement appelé "algues bleu-vert". Elles réalisent la photosynthèse (Wikipédia).

⁸³ http://fr.wikipedia.org/wiki/Grande_Oxydation

⁸⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Huronian_glaciation

⁸⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_boule_de_neige

⁸⁶ Comme nous le verrons plus tard, l'iridium est un élément extrêmement rare dans la croûte terrestre, en raison de son affinité avec le fer. L'iridium primordial aurait migré pour former avec les autres métaux sidérophiles le noyau métallique. Les couches contenant de l'iridium sont le plus souvent associées à des météorites.

⁸⁷ Les acritarches sont des microfossiles à paroi organique auxquels il n'est pas possible d'attribuer une affinité biologique avec certitude (Wikipédia).

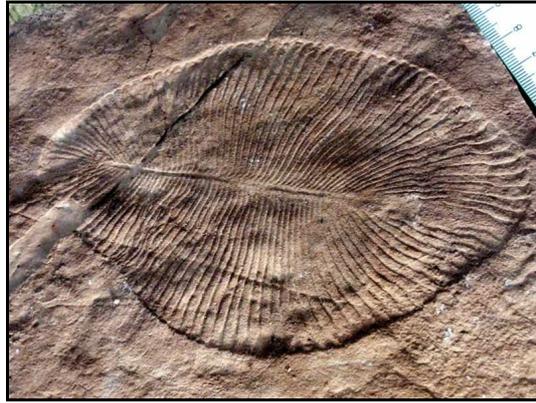


Figure 9. Exemple de fossile d'un Dickinsonia.

L'éon Phanérozoïque

Il couvre les dernières 542 Ma⁸⁹. Son nom signifie animal visible en grec ancien. C'est la période qui a vu le développement de la vie animale. La frontière avec l'éon précédent est marquée par l'apparition de la première classe d'arthropodes marins, les *trilobites*⁹⁰. Cet éon est lui-même divisé en trois ères: le Paléozoïque, le Mésozoïque et le Cénozoïque.

5. L'ère Paléozoïque

Cette ère, ancienne vie en grec ancien, s'étend de -542 à -252 Ma⁹¹. C'est-à-dire le 7^{ème} jour 17h25 à 20h59 dans une genèse à 7 jours. Elle était autrefois appelée ère primaire.

Elle est marquée par l'apparition d'animaux à coquilles dures et elle s'achève par une extinction massive. Une grande partie des terres émergées forme, entre -600 Ma et -160 Ma, le *Gondwana*⁹². Progressivement au Carbonifère et au Dévonien les terres émergées se rassemblent pour former le supercontinent *Pangée*⁹³, entouré du super océan le *Panthalassa*.

Cette ère s'achève par une catastrophe majeure, avec la plus grande extinction d'espèces et la fragmentation de la Pangée. Le Paléozoïque est divisé en six périodes.

Le Cambrien

Il s'étend de -542 à -485 Ma⁹⁴. Dans la chronologie en 7 jours, cela correspond au 7^{ème} jour de 17h25 à 18h06.

Cette époque est caractérisée par une brusque multiplication de la vie avec l'apparition des animaux à parties dures. Cette *explosion cambrienne* reste très mal expliquée. En -540 Ma apparaissent les *foraminifères*, protozoaires à coque dure. À la même époque, les *chordés* font leur apparition, avec le *Pikaia gracilens*⁹⁵. Son aspect est semblable aux poissons, mais avec

⁸⁸ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DickinsoniaCostata.jpg>

⁸⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Phan%C3%A9rozo%C3%AFque>

⁹⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Trilobita>

⁹¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A9ozo%C3%AFque>

⁹² <http://fr.wikipedia.org/wiki/Gondwana>

⁹³ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pang%C3%A9e>

⁹⁴ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cambrien>

⁹⁵ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pikaia>

une organisation plus rudimentaire. Au lieu d'une arête, la structure est soutenue par une structure mésodermique dorsale cylindrique, appelée *notochorde*⁹⁶.

L'embranchement des arthropodes se développe. Parmi eux, les *trilobites*⁹⁷ vont jouer un rôle dominant. Puis apparaissent les poissons (lamproies) (-530 Ma), les bivalves (-530 Ma), les chélicérates⁹⁸ (-520 Ma), les démosponges⁹⁹ (-520 Ma), les gastéropodes (-510 Ma) et les céphalopodes (-505 Ma).

Sur la Figure 10 nous avons porté une vue d'artiste d'un paysage marin du Cambrien¹⁰⁰.



Figure 10. Vue d'artiste d'un fond marin du Cambrien.

L'Ordovicien

Il s'étend de -485 à -443 Ma¹⁰¹, soit dans la chronologie en 7 jours, le 7^{ème} jour de 18h06 à 18h37. Cette époque finit par des phases d'extinction massive d'espèces. Les couches géologiques correspondantes contiennent de vastes réservoirs de pétrole et de gaz naturel.

⁹⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cephalochordata>

⁹⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Trilobita>

⁹⁸ Sous-embranchement des arthropodes, comprenant les arachnides et les mérostomes (Wikipédia).

⁹⁹ Organismes métazoaires appartenant aux spongiaires formant une classe spécifique (Wikipédia).

¹⁰⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cambrien>

¹⁰¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ordovicien>

L'Ordovicien est caractérisé par un refroidissement important, probablement dû à une baisse du taux de gaz carbonique en raison de l'explosion de la biomasse. Ceci aurait pu être la cause d'une glaciation vers -460 Ma.

La diversité biologique s'accroît. Progressivement les trilobites sont remplacés sur les plateaux continentaux par d'autres espèces de la classe des céphalopodes ou des *crinoïdes*¹⁰². Des *ectoproctes*¹⁰³ constituent les premiers récifs coralliens. Dans les fossiles de cette époque on a aussi identifié une classe quasiment disparue, les *graptolites*¹⁰⁴. La flore est essentiellement constituée d'algues vertes.

Sur la Figure 11 la vision d'artiste d'un paysage sous-marin de l'Ordovicien a été reportée.



Figure 11. Vue d'artiste d'un paysage marin de l'Ordovicien.

Le Silurien

Il s'étend de -443,4 à -419,2 Ma¹⁰⁵, soit le 7^{ème} jour 18h37 à 18h44 dans la chronologie à 7 jours.

Les poissons se diversifient, avec des écailles mobiles, avec des squelettes osseux ou avec des mâchoires. Ils ont à se défendre face à des scorpions de mer de plusieurs mètres de long. Les graptolites sont toujours présents. Il semble que des algues (vers -440 Ma) et des plantes vasculaires (-420 Ma) sortent de l'eau pour envahir les marges continentales. Les arachnides et les myriapodes se développent aussi sur terre.

Sur la Figure 12 nous avons porté une vision d'artiste d'un paysage sous-marin du Silurien¹⁰⁶.

¹⁰² Classe d'animaux appartenant à l'embranchement des échinodermes (Wikipédia)

¹⁰³ Ce sont des animaux coloniaux appelés aussi *bryozoires*. Ils contribuent à la construction des massifs coralliens (Wikipédia).

¹⁰⁴ Animaux vivants en colonies ayant constitués des fossiles un peu partout sur la Terre (Wikipédia).

¹⁰⁵ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Silurien>

¹⁰⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Silurien>



Figure 12. Vue d'artiste d'un paysage sous-marin du Silurien.

Le Dévonien

L'installation des plantes et des animaux sur les terres émergées s'intensifie au *Dévonien* (-419,2 à -358,9 Ma)¹⁰⁷. Dans la genèse en 7 jours, cette époque se situe le 7^{ème} jour de 18h44 à 19h38.



Figure 13. Vue d'artiste d'un paysage sous-marin du Dévonien.

Dans les océans règnent des monstres marins, comme des *placodermes*¹⁰⁸ ou des requins. Les poissons à arêtes lobées vont évoluer vers les premiers *tétrapodes*, vertébrés ayant deux paires de membres et la respiration pulmonaire¹⁰⁹. Des *chondrichthiens*¹¹⁰ et des *actinistiens*

¹⁰⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9vonien>

¹⁰⁸ Les placodermes sont des poissons parmi les premiers à posséder une mâchoire. Apparus au Silurien, ils ont disparus au Dévonien (Wikipédia).

¹⁰⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9trapode>

¹¹⁰ Poissons à squelette cartilagineux et à écailles *placoïdes*, comme le requin ou la raie (Wikipédia).

(*cœlacanthes*)¹¹¹ peuplent aussi les mers. Les *ammonites*¹¹² apparaissent, faisant concurrence aux trilobites. Sur la Figure 13 nous avons reporté une vue d'artiste d'un paysage sous-marin du Dévonien¹¹³.

À terre, les invertébrés se développent, avec des arthropodes, des hexapodes et des *ptérygotes*¹¹⁴. La flore se diversifie avec l'apparition de *progymnospermes*¹¹⁵. Parmi ceux-ci des *archaeopteris* forment les premières forêts. Des végétaux vasculaires comme les *sphénophytes* (prêles) se développent. Sur la Figure 14 nous avons porté une vue d'artiste du Dévonien¹¹⁶.



Figure 14. Vue d'artiste d'une scène du Dévonien

Le carbonifère

C'est la période allant de -358,4 à -298,9 Ma¹¹⁷, c'est-à-dire le 7^{ème} jour de 19h39 à 20h21mn30, sur une échelle à 7 jours.

¹¹¹ Poissons à nageoires charnues raccordées au corps par des appendices raidis par un os (Wikipédia).

¹¹² Mollusque céphalopode apparu au Dévonien et disparu à la fin du Crétacé (Wikipédia).

¹¹³ <http://www.fossiliraptor.be/lacrisebiologiquedufrasnien.htm>

¹¹⁴ Sous-classe des insectes ailés (Wikipédia).

¹¹⁵ Groupe de plantes fossiles rappelant les gymnospermes mais se reproduisant avec des spores comme les angiospermes. Ce groupe a disparu au Carbonifère (Wikipédia).

¹¹⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9vonien>

¹¹⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Carbonif%C3%A8re>

Le carbonifère tient son nom du charbon formé dans les couches géologiques correspondantes. C'est l'époque des grands arbres, avec des arbres à écorce, en particulier à écorce ligneuse. L'absence de décomposition de la lignine semble avoir été due à l'inexistence de bactéries capables de la digérer. *A contrario*, l'arrêt de la formation de charbon vers -290 Ma a pu être dû à l'apparition de nouvelles espèces de champignon grâce à des enzymes.

Les grands fonds sont habités vers -330 Ma par des *myxinoïdés*¹¹⁸. À cette date les tétrapodes se développent sur terre. Une révolution biologique advient vers -315 Ma avec l'apparition de l'œuf amniotique. Vers -300 Ma, les coléoptères se développent.

Vers -350 Ma les *filicophytes* (fougères) apparaissent. Puis vers -320 Ma il y a une explosion dans le développement des plantes à graines. Enfin, vers -310 Ma apparaissent les *pinophytes* (conifères). Le développement des grandes forêts, conduisant à du bois ne se décomposant pas, entraîne un piégeage d'une proportion importante du carbone, et par conséquent une forte augmentation du taux d'oxygène dans l'atmosphère. Ce taux élevé d'oxygène (entre 15 et 25%) serait l'une des causes du gigantisme de certains insectes et d'amphibiens. La Figure 15 correspond à la vue d'artiste d'un paysage du Carbonifère¹¹⁹.

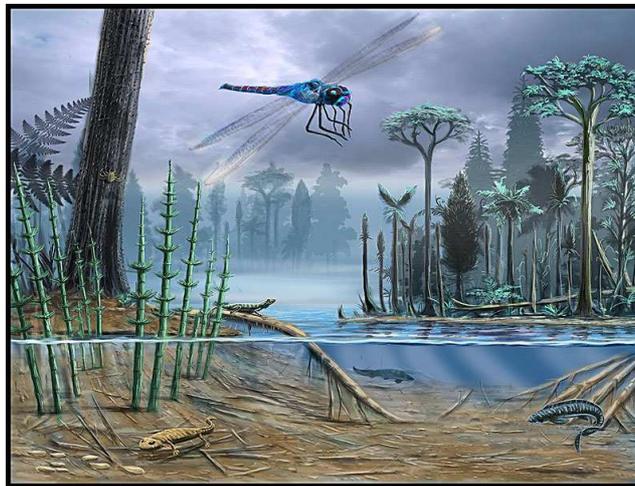


Figure 15. Vue d'artiste d'un paysage du Carbonifère.

Le Permien

Il s'étend de -298,9 à -252,2 Ma¹²⁰ c'est-à-dire le 7^{ème} jour de 20h21mn30 à 20h59, sur une échelle à 7 jours.

Il est caractérisé par l'agglomération de la quasi-totalité des terres émergées sous forme de supercontinent Pangée. L'Océan *Panthalassa* l'entoure en grande partie, avec *Théthys*.

C'est au cours du Permien qu'apparaissent les premiers animaux bipèdes (*Aphelosaurus*¹²¹, *Eudibamus*¹²²) et volants (*Coelurosaurus*¹²³). Les *pélycosaures* sont des reptiles mammaliens, apparentés aux ancêtres des mammifères¹²⁴.

¹¹⁸ Appelés aussi myxines. Genre de chordé possédant un crâne et dépourvu de colonne vertébrale, vivant dans les grands fonds marins. Appelés aussi cochons des profondeurs car ils se nourrissent des animaux morts (Wikipédia).

¹¹⁹ <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/svt/serveur/geoltheque/pages/decazeville/interp1.htm>

¹²⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Permien>

¹²¹ Reptile primitif du Permien (paleodico.wifeo.com).

Alors que les trilobites disparaissent progressivement, la vie marine est riche en mollusques, échinodermes et brachiopodes. Les terrains permien contiennent des fossiles de foraminifères benthiques¹²⁵, des ammonites et des mâchoires de conodontes¹²⁶.

De nouvelles espèces végétales apparaissent, en particulier des *gymnospermes*¹²⁷ et des fougères. Les terres se couvrent aussi de grandes forêts de conifères.

Sur la Figure 16 la vue d'artiste d'un paysage Permien¹²⁸ a été reportée. En premier plan apparaissent des lystrosaures. Ces animaux faisaient partie de l'ordre des Thérapside, ordre appelé aussi reptiles mammaliens¹²⁹.

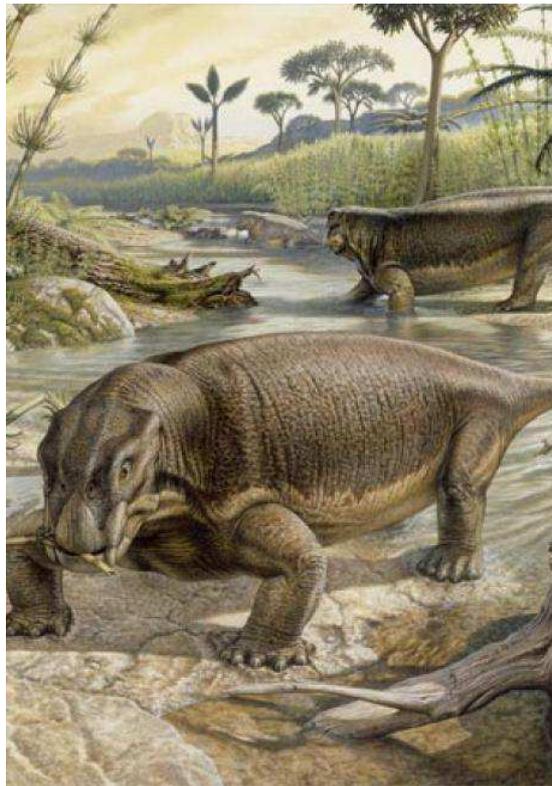


Figure 16. Vue d'artiste d'un paysage Permien.

¹²² Genre éteint de *parareptile* bipède (Wikipédia, version anglaise).

¹²³ Clade des dinosaures théropodes étroitement liés aux oiseaux (Wikipédia).

¹²⁴ Cf article *Pélycosauria* de Wikipédia.

¹²⁵ Le benthos est l'ensemble des organismes aquatiques vivant à proximité du fonds des eaux, maritimes ou continentales (Wikipédia).

¹²⁶ Formes denticulées ayant disparues au Trias (Wikipédia). Elles auraient ressemblé à des anguilles, en plus petites.

¹²⁷ Les *Gymnospermes* sont des plantes faisant partie d'un sous-embranchement des *Spermaphytes* (plantes à graines) qui inclut les plantes dont l'ovule est à nu (non enclos dans un ovaire à la différence des *Angiospermes*) et est porté par des pièces foliaires groupées sur un rameau fertile (cône). Ce clade comprend par exemple les cycas, les ginkgo et les conifères (Wikipédia).

¹²⁸ http://www.maxisciences.com/permien/le-permien-en-images_art230.html

¹²⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Lystrosaurus>

Le Permien, et plus généralement l'ère Paléozoïque, se termine par la plus grande extinction d'espèces connue. 96% des espèces marines et 75% des espèces terrestres disparaissent brutalement.

6. L'ère Mésozoïque

Cette ère était auparavant appelée ère secondaire¹³⁰. Elle s'étend de -252,2 à -66,0 Ma. Dans la chronologie à 7 jours, elle commence le 7^{ème} jour 20h59 pour terminer à 23h12 du même jour.

C'est la période au cours de laquelle apparaissent et se développent les dinosaures et les mammifères. La Pangée se fragmente en deux continents, le *Laurasia* et le *Gondwana*. Le *Laurasia* se divise ensuite entre ce qui sera l'Amérique du Nord et l'Eurasie, alors que le *Gondwana* se partage entre l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Australie et l'Antarctique.

Le taux élevé de dioxyde de carbone conduit à une végétation moins luxuriante qu'au Permien. Les cryptogames¹³¹ réduisent de taille. Les conifères couvrent les continents de grandes forêts, avec les *cycadées*¹³². À la fin de cette ère, les *monocotylédones*¹³³ et les *dicotylédones angiospermes*¹³⁴ apparaissent.

Sur ces étendues continentales, les insectes se développent et deviennent très abondants au Jurassique.

Cette ère est celle des dinosaures, sur les terres continentales. Elle voit aussi apparaître les oiseaux (*archéoptéryx*) et les mammifères, des *protothériens*¹³⁵, avec une poche marsupiale.

Les ammonites, famille de céphalopodes, sont caractéristiques des milieux marins de cette ère. Ils cohabitent avec des grands reptiles marins comme l'*ichthyosaure*, le *nithosaure* ou le *plésiosaure*. Les poissons de la famille des *téléostéens*¹³⁶ apparaissent au Trias. Les parois des fonds marins sont recouvertes de spongiaires, de polypes et de crinoïdes. Des *bélemnites*¹³⁷ y abondent.

Le Trias

Il occupe la période entre -252,2 à -201,1 Ma¹³⁸. Sur une échelle à 7 jours, cela correspond au 7^{ème} jour de 20h59 à 21h35.

¹³⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9sozo%C3%AFque>

¹³¹ Végétal ayant ses organes reproducteurs cachés (par opposition à phanérogame). Cela comprend par exemple les algues; les lichens, les mousses et les fougères (Wikipédia).

¹³² Appelées aussi cycadales. Elles forment un ordre de gymnospermes comprenant par exemple les *Zamia* et les cycas (Wikipédia).

¹³³ Les cotylédons sont les feuilles constitutives de la graine. Les monocotylédones sont des angiospermes (plantes à fleur) avec un seul cotylédon. C'est le cas, par exemple, des orchidées et des palmiers. Les dicotylédones (haricot, marronnier, chanvre) ont deux cotylédons. Les conifères peuvent avoir de dix à douze cotylédons (Wikipédia).

¹³⁴ La division des *Magnoliophyta* (ou Angiospermes) regroupe les plantes à fleurs, et donc les végétaux qui portent des fruits (Wikipédia).

¹³⁵ Groupe de mammifères présentant des caractères les rapprochant des reptiles (Wikipédia).

¹³⁶ Poissons à nageoires rayonnées. Ils représentent 99,8 % des espèces de poissons actuels (Wikipédia).

¹³⁷ Genre de céphalopodes ayant vécu entre le Jurassique et le Crétacé (Wikipédia).

¹³⁸ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Trias>

Cette époque débute et se termine par deux extinctions massives. Suite à la catastrophe de la fin du Permien, la vie se rediversifie progressivement. Puis elle se stabilise avec des systèmes écologiques complets. La fin de période est marquée par une succession de crises touchant à chaque fois différentes communautés (la faune benthique, la faune pélagique¹³⁹, la flore terrestre, les dinosaures).

L'environnement marin est marqué par l'établissement des types modernes de coraux. Un type d'algues calcaires (*tubiphytes*) va créer également d'importants récifs mais ce groupe s'éteindra presque totalement en fin d'époque. Partant d'une seule lignée survivante de l'extinction P/T, les ammonites se rediversifient et redeviennent abondantes. Des bivalves pélagiques deviennent également très abondants. Les conodontes s'éteindront complètement à la limite Trias-Jurassique. Les poissons, qui ont subi peu de pertes à la limite P/T, montrent une grande stabilité. Les reptiles marins (notamment les ichthyosaures, plésiosaures, placodontes) vont se développer, devenir communs au Trias moyen et atteindre des tailles énormes au Trias supérieur. L'apparition du plancton à coquilles calcaires et du nanoplancton modifie profondément l'écologie et la chaîne alimentaire océanique.



Figure 17. Vue d'artiste d'un paysage du Trias.

Chez les végétaux terrestres, les survivants de l'extinction massive dominant encore au Trias inférieur avant de laisser leur place aux *cycades*, *ginkgophyta* et les *glossoptérides*¹⁴⁰. Les *spermatophytes*, ou plantes à graines, dominant ensuite la flore. Dans l'hémisphère nord les conifères se multiplient.

Différents groupes d'amphibiens se succèdent. Des *cynodontes*¹⁴¹ vont donner naissance aux premiers mammifères. Chez les reptiles, les *archosaures*¹⁴² remplacent progressivement les reptiles *synapsides*¹⁴³ qui ont dominé le Permien. Certains d'entre eux avec des espèces de petites tailles, évoluent en donnant entre autres naissance aux ptérosaures et aux dinosaures.

¹³⁹ Qui vit en pleine mer (Wikipédia).

¹⁴⁰ Les glossopteris est un genre de plante d'un ordre éteint, abondant au Permien. Il doit son nom à la forme des feuilles (signifiant langue)

¹⁴¹ Clade des reptiles mammaliens dont il ne reste aujourd'hui que les mammifères (Wikipédia).

¹⁴² Clade regroupant les crocodiliens, les oiseaux et des groupes disparus comme les ptérosaures et les dinosaures (Wikipédia).

¹⁴³ Division des reptiles conduisant à la lignée des mammifères (Wikipédia).

Les *squamates*¹⁴⁴ apparaissent vers -230 Ma. Ils donneront naissance aux *lepidosauria* (serpents et aux lézards actuels) ainsi qu'aux *sphénodontiens*, groupe important à l'époque mais qui ne compte plus aujourd'hui que deux espèces en danger d'extinction dans quelques îles de Nouvelle-Zélande¹⁴⁵. Les premiers *chéloniens* (tortues) apparaissent vers -220 Ma.

Sur la Figure 17 la vue d'artiste d'un paysage du Trias a été portée¹⁴⁶.

Le Jurassique

C'est la période entre -199,6 Ma à -145,5 Ma¹⁴⁷, soit, dans une échelle à 7 jours le dernier jour de 21h35 à 22h14.

Elle commence par une extinction massive d'espèces. Au cours de cette époque les formes de vie les plus évoluées dans les mers sont les poissons et des reptiles marins, incluant des ichthyosaures, des plésiosaures et des crocodiles marins. Dans le monde des invertébrés plusieurs groupes apparaissent, entre autres les *rudistes*¹⁴⁸, une variété de bivalves, et les bélemnites. Le plancton apparaît lui aussi pendant cette période. Les ammonites apparues pendant le Trias sont très communes.



Figure 18. Vue d'artiste d'un paysage du Jurassique.

Sur terre, les *archosauriens*¹⁴⁹ restent dominants. Le Jurassique est l'âge d'or des grands dinosaures, Leurs sources de nourriture principales consistent en prairies, fougères, cycadales

¹⁴⁴ Reptiles à écailles comprenant tous les lézards, les serpents et les amphibènes (Wikipédia).

¹⁴⁵ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Sph%C3%A9nodontiens>

¹⁴⁶ <http://gigadino.pagesperso-orange.fr/triasfaune.html>

¹⁴⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Jurassique>

¹⁴⁸ Bivalve du Mésozoïque caractérisé par une forte asymétrie entre les valves (Wikipédia).

¹⁴⁹ Clade regroupant les crocodiliens et les oiseaux, ainsi que des groupes disparus comme les ptérosaures et les dinosaures non aviens (Wikipédia).

et *bennettiales*¹⁵⁰. Certains dinosaures se sont adaptés pour consommer des conifères plus élevés. Les principaux prédateurs de ces grands herbivores sont des *saurischiens*¹⁵¹.

Vers la fin du Jurassique, les premiers oiseaux évoluent à partir des *cœlurosauria*¹⁵², les premiers fossiles d'*archaeopteryx*¹⁵³ datent d'entre -156 à -151 Ma. Les *ornithischiens* sont moins nombreux et plus petits que les saurischiens. Toutefois, ils peuvent jouer un rôle écologique important.

Dans les airs, les *ptérosaures*¹⁵⁴ dominent dans des niches écologiques occupées aujourd'hui par les oiseaux.

Le climat chaud et humide permet le développement de forêts couvrant une grande partie des terres. Les conifères continuent à dominer la flore, ils constituent le groupe le plus diversifié et la majorité des arbres. On trouve parmi eux des groupes toujours existants ainsi que des familles maintenant éteintes. Les *cycadophytes*, les *ginkgoaceae*, et les fougères sont aussi communs. Les ginkgos sont principalement présents dans les latitudes moyennes et dans l'hémisphère nord tandis que les *podocarpaceae* (famille de conifères) le sont dans l'hémisphère sud.

La Figure 18 correspond à une vue d'artiste d'un paysage du Jurassique¹⁵⁵.

Le Crétacé

Cette période s'étend de -145,5 Ma à -65,5 Ma¹⁵⁶. Sur une échelle à 7 jours, cela correspond au dernier jour de 22h14 à 23h12. Elle est ainsi nommée d'après les dépôts crayeux retrouvés en grande quantité en Europe. Elle se termine de manière catastrophique, par l'extinction massive ayant mis fin à la domination des dinosaures.

Les *angiospermes* s'étendent mais ne deviennent dominants qu'à partir de la fin du Crétacé. Leur dissémination est aidée par l'apparition des abeilles. Les premiers représentants d'arbres à feuilles (figuiers, magnolias et *Platanaceae*) apparaissent tandis que les conifères continuent de se développer. Les bennettiales apparus pendant le Trias s'éteignent vers la fin de cette époque.

Les mammifères sont petits et n'ont que peu d'importance dans le règne animal. La faune est dominée par les reptiles archosauriens, essentiellement des dinosaures. Dans le ciel, les ptérosaures sont communs dans les environnements maritimes. Le développement des oiseaux leur fait concurrence. À la fin du Crétacé, seulement deux espèces de ptérosaures subsistent. Les *Maniraptora*¹⁵⁷ trouvés sur ces sites sont intermédiaires entre les dinosaures et les oiseaux. Leur corps est, au moins partiellement, couvert de plumes.

¹⁵⁰ Groupe de plantes disparu, proche des cycas.

¹⁵¹ Dinosaures dits à bassin de reptile, par opposition à ceux à bassin d'oiseau appelés ornithischiens (Wikipédia).

¹⁵² <http://fr.wikipedia.org/wiki/C%C5%93lurosauria>

¹⁵³ Dinosaur à plume (Cf. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Archaeopteryx>).

¹⁵⁴ Groupe de vertébrés volants ayant disparu, non apparentés aux dinosaures (Wikipédia).

¹⁵⁵ http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/annee_terre/terre7.html

¹⁵⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A9tac%C3%A9>

¹⁵⁷ Clade des dinosaures cœlosauriens (Wikipédia).

Durant le Crétacé, les insectes se diversifient. Des familles de termites, de fourmis, de pucerons, de sauterelles ou des nouveaux papillons apparaissent. La Figure 19 correspond à une vue d'artiste d'un paysage du Crétacé¹⁵⁸.



Figure 19. Vue d'artiste d'un paysage du Crétacé.

Dans les mers, les raies, les requins modernes et les poissons deviennent communs ainsi que les reptiles marins comme l'Ichtyosaure durant le Crétacé inférieur, le Plésiosaure durant toute la période, et le Mosasaure durant le Crétacé supérieur. Un genre d'ammonite, les baculites, devient florissant. Les milieux marins sont colonisés par des oiseaux dentés, les *hesperornithiformes*. Les foraminifères et des échinodermes tels les étoiles de mer ou les oursins prospèrent. La première expansion des *diatomées*¹⁵⁹ se fait dans les océans. Les couches sédimentaires commencent à évoluer sous l'effet de la bioérosion. La Figure 20 représente une vue d'artiste d'un paysage sous-marin du Crétacé¹⁶⁰.

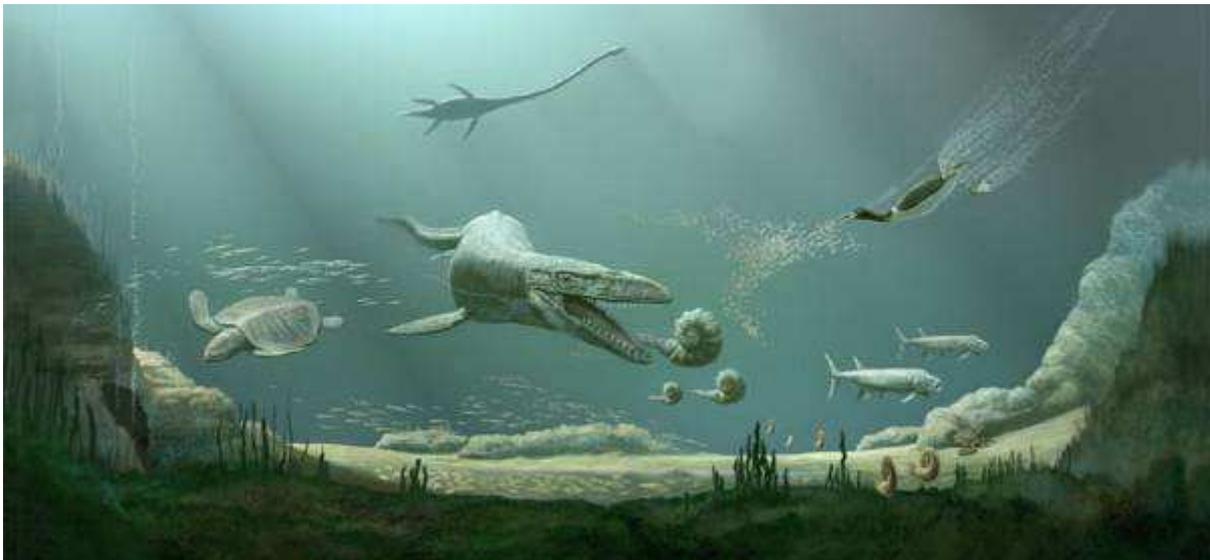


Figure 20. Vue d'artiste d'un paysage sous la mer du Crétacé.

¹⁵⁸ http://dinonews.net/dossiers/disparition/etat_monde_1c.php

¹⁵⁹ Microalgues unicellulaire enveloppée par un squelette externe siliceux (Wikipédia).

¹⁶⁰ http://dinonews.net/dossiers/disparition/etat_monde_1c.php

7. L'ère Cénozoïque

C'est la troisième et dernière ère géologique¹⁶¹. Elle commence il y a 65,5 Ma après la dernière grande extinction, soit *le dernier jour à 23h12* dans une genèse à 7 jours. Son nom signifie nouvelle vie, traduisant le renouvellement des espèces après la grande catastrophe. Elle est divisée en trois périodes, le Paléogène, le Néogène et le Quaternaire.

Le Paléogène

C'est la période entre -65,5 à -23,03 Ma¹⁶². Dans l'échelle à 7 jours, il s'agit *du dernier jour entre 23h12 et 23h43*. Elle est elle-même subdivisée en *Paléocène* (-65,5 à -55,8 Ma), *Éocène* (-55,8 à -33,9 Ma) et *Oligocène* (-33,9 à 23,03 Ma).

Le climat se refroidit, mais la fin du Paléocène et le début de l'Éocène est marqué par une remontée très rapide des températures. Ainsi la température de surface des océans passe de 5° à 8° en quelques milliers d'années. L'Éocène voit la surrection des Alpes.

L'extinction du Crétacé a laissé la place à de nombreuses niches écologiques. Les mammifères évoluent depuis des formes simples en des espèces plus complexes. Parmi ceux-ci, le *plesiadapis*, apparu au Paléocène, est considéré comme l'ancêtre probable des primates¹⁶³ (Figure 21¹⁶⁴). Des mammifères se spécialisent dans des formes géantes. Les oiseaux évoluent eux aussi considérablement durant cette période. La plupart des autres branches du vivant sont restées relativement stables.



Figure 21. Dessin d'artiste d'un Plésiadapis, l'ancêtre supposé des Primates.

Le Néogène

Cette période s'étend de -23,03 à -2,588 Ma¹⁶⁵. Dans la chronologie à 7 jours, elle occupe le dernier jour du *23h43 à 23h57*.

A la fin du Néogène les continents occupaient approximativement leurs emplacements actuels, le changement le plus notable étant la jonction de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud. Pendant ces 21 Ma les mammifères et les oiseaux ont évolué

¹⁶¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9nozo%C3%AFque>

¹⁶² <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A9og%C3%A8ne>

¹⁶³ <http://lesdinos.free.fr/Au%20temps%20des%20dinosaur%C3%A9s%20Dossier%20Vie-terre.htm>

¹⁶⁴ <http://cenozoicpark.e-monsite.com/pages/paleocene/un-proche-parent-des-primates.html>

¹⁶⁵ <http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9og%C3%A8ne>

considérablement. La plupart des autres formes de vies animales sont restées relativement stables. C'est au Miocène que s'effectue la séparation entre les lignées de l'homme et du chimpanzé. Le fossile Toumaï, datant de 7 Ma, correspond à une espèce, *Sahelanthropus tchadensis*, très proche de cette séparation.

Le Quaternaire

C'est la dernière période géologique¹⁶⁶. Elle commence il y a 2,588 Ma et se continue jusqu'à nos jours.

Elle est caractérisée par le retour des glaciations et l'apparition du genre Homo. Elle a été divisée en deux époques, le Pléistocène et l'Holocène. Une troisième époque, l'Anthropocène a été proposée. Elle serait marquée par une nouvelle extinction massive, dont l'origine serait essentiellement écologique. L'espèce humaine se serait développée en éliminant de plus en plus d'espèces animales et végétales, non seulement pour sa propre consommation mais aussi pour éliminer des concurrents.

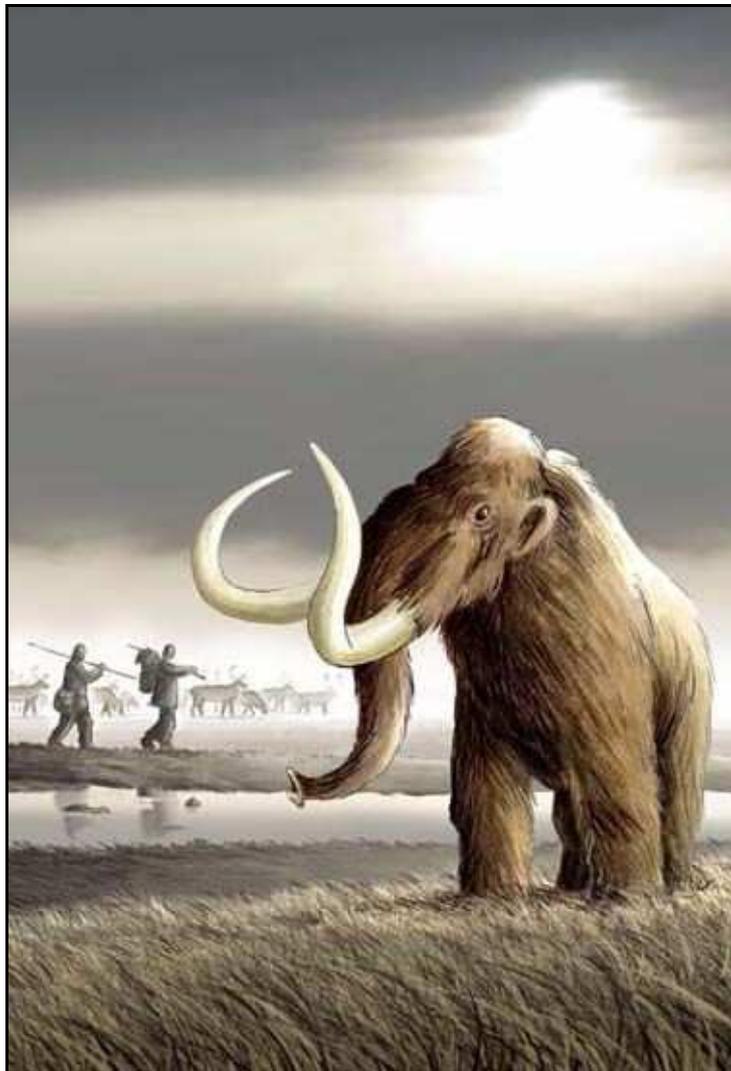


Figure 22. Vue d'artiste d'un paysage du néolithique, vers -12 000 ans.

¹⁶⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Quaternaire>

La Figure 22 est une vue d'artiste d'un paysage du Néolithique, vers -12 000 ans, soit il y a environ 0,5 seconde, dans une chronologie sur 7 jours.

8. L'évolution créatrice

Finalité et Causalité

Au cours de l'Histoire de nombreux philosophes ou savants se sont interrogés sur la dynamique qui animait l'évolution de l'Univers, de la Terre et de l'Homme. Parmi ceux-ci, en 1907, Henri Bergson a débattu en détail ce problème dans son livre "*L'évolution créatrice*". Existe-t-il une finalité à l'évolution, thèse débattue entre autres par Leibniz ou Aristote? Est-ce que la création de structures nouvelles n'est que le fruit de causes, comme le pense Descartes?

Pour Bergson, ces deux thèses sont similaires car l'évolution est imprévisible : le monde va à l'aventure, sans chemin préexistant. Cette thèse fut fortement critiquée par Bertrand Russell¹⁶⁷.

Le second principe de la thermodynamique

En examinant le fonctionnement d'une machine à vapeur, Sadi Carnot a introduit en 1824 ce principe fondamental de la Science.

Dans son énoncé actuel, il stipule que toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale, incluant celles du système et du milieu extérieur¹⁶⁸.

L'entropie est une quantité introduite par Rudolf Clausius, caractérisant le degré d'organisation d'un système¹⁶⁹. Le second principe indique une tendance à l'augmentation du désordre. On dit aussi qu'un système dissipe de la chaleur: la quantité totale d'énergie ne change pas, mais celle-ci est en partie dégradée sous forme de chaleur.

Entropie et information

En 1948 le mathématicien américain Claude Shannon a introduit une théorie mathématique permettant de quantifier la quantité d'information contenue dans un message¹⁷⁰. Ses travaux rejoignent ceux des thermodynamiciens statisticiens. Il introduit une entropie de l'information coïncidant, au signe près, avec celle introduite par Boltzmann en thermodynamique.

Le physicien franco-américain Léon Brillouin a approfondi ce lien dans son ouvrage publié en 1956 *Science et théorie de l'information*^{171 172}.

Les lois de la physique sont réversibles par rapport au temps. Laplace avait développé l'idée que, si on connaissait la position de tous les objets dans l'Univers avec leur vitesse, il suffirait

¹⁶⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/L%27%C3%89volution_cr%C3%A9atrice

¹⁶⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Deuxi%C3%A8me_principe_de_la_thermodynamique

¹⁶⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Entropie_%28thermodynamique%29

¹⁷⁰ C.E. Shannon et W. Weaver : The mathematical Theory of communication, University of Illinois, Urbana III, 1949.

¹⁷¹ L. Brillouin, *Science and Information Theory*, New York, Academic Press, 1956, *La science et la théorie de l'information*, Masson, 1959.

¹⁷² http://fr.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9on_Brillouin

d'inverser les mouvements pour connaître tout le passé de l'Univers¹⁷³. Avec le second principe, la symétrie temporelle est brisée. Si on étudie un phénomène irréversible (brisure d'une tasse par exemple), de l'entropie est produite et il est nécessaire de fournir de l'énergie pour retrouver l'état initial. L'idée majeure de Brillouin est que cette entropie correspond à une information produite par le système, cette information pouvant être acquise par un observateur. Il y aurait ainsi une balance entre l'énergie dissipée et la création d'information.

L'auto-organisation

Pour aller plus loin, il faut introduire la notion de structure dissipative¹⁷⁴ telle qu'elle a été introduite par le prix Nobel Ilya Prigogine¹⁷⁵. Il s'agit d'un système thermodynamique ouvert échangeant de l'énergie et/ou de la matière avec son environnement. Ce système n'est donc pas dans une situation d'équilibre thermodynamique.

Dans une structure dissipative, en raison de processus physiques non linéaires, une auto-organisation se met en place¹⁷⁶. Cette organisation correspond à une mise en ordre croissant du système, au prix d'une augmentation de l'entropie.

Dans la théorie mathématique des systèmes dynamiques, c'est-à-dire des systèmes causaux et déterministes¹⁷⁷, on a montré que, même avec des équations très simples, l'évolution de ces systèmes pouvait comporter des instabilités. C'est le cas, par exemple, pour la suite logistique introduite en 1845 par Pierre François Verhulst pour l'étude des populations¹⁷⁸. Il s'agit de la suite définie par l'équation:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), \text{ pour } x_n \in [0,1].$$

Si $0 \leq \mu \leq 3$ le comportement de la suite est stable, avec une limite bien définie, nulle si $\mu \leq 1$ et égale à $(\mu - 1) / \mu$ pour $1 \leq \mu \leq 3$.

Au delà de la valeur 3 pour le paramètre, le comportement de la suite n'est plus stable. Si $3 \leq \mu \leq 3,57$, elle oscille entre 2, puis 4, puis 8, ... , valeurs. Au delà de 3,57 le comportement est chaotique, à l'exception de quelques valeurs critiques. Au dessus de 4, la suite diverge.

Dans ce cadre une notion importante a été introduite par Per Bak, Chao Tang et Kurt Wiesenfeld, celle de la criticalité auto-organisée (SOC)¹⁷⁹. C'est la propriété de systèmes dynamiques ayant un point critique comme attracteur. Ces auteurs ont montré qu'une auto-organisation pouvait naître spontanément de simples interactions¹⁸⁰.

¹⁷³ Pierre-Simon Laplace, *Essai philosophiques sur les probabilités*, Courcier, 1814, p. 2-3.

¹⁷⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_dissipatif

¹⁷⁵ I. Prigogine. *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*, Dunod, 1968

¹⁷⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Auto-organisation>

¹⁷⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_dynamique

¹⁷⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Suite_logistique

¹⁷⁹ Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., *Self-Organized criticality: an explanation of 1/f noise*, Physical Review Letters, 59, 381-384, 1987.

¹⁸⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Self-organized_criticality

Le principe de la production maximale d'entropie

La thermodynamique irréversible près de l'équilibre correspond à un système pour lequel les forces et les flux sont en relation linéaire¹⁸¹. Dans un tel système, le prix Nobel de Chimie 1968 Lars Onsager a montré qu'il y avait production minimale d'entropie¹⁸². Mais lorsqu'on est loin de l'équilibre, c'est-à-dire, lorsque les relations ne sont plus linéaires, cette règle n'a plus cours. Dès 1948, M. Kohler proposa un principe de production maximale d'entropie dans un système ouvert¹⁸³.

En 2003, Roderick Dewar a fourni une explication très générale du principe de la production maximale d'entropie¹⁸⁴ contrôlant l'évolution de tout système thermodynamique ouvert. Il a été montré valide pour de nombreux systèmes.

Le principe du Maximum d'entropie a été énoncé en 1957 par le physicien Edwin T. Jaynes¹⁸⁵. Dans ses articles, Jaynes avait développé le lien entre la théorie de l'information et la mécanique statistique, indiquant, comme Brillouin, que l'entropie de la mécanique statistique et celle de la théorie de l'information étaient deux notions identiques. La mécanique statistique ne devenant qu'une application particulière de la théorie de l'information.

Le principe du Maximum d'entropie a été avec succès dans de nombreux problèmes du traitement du signal et de l'image. Il est principalement utilisé pour obtenir la loi de distribution a priori dans le cas d'une analyse bayésienne¹⁸⁶.

Un système thermodynamique fermé évolue de manière à atteindre le maximum d'entropie. Au cours de son évolution, il dissipe de l'énergie, c'est-à-dire qu'il augmente son désordre. Comme il ne peut revenir en arrière sans apport extérieur, il ne peut s'arrêter que lorsqu'il atteint le désordre maximal, c'est à dire le maximum d'entropie.

Pour un système ouvert, il n'en ait pas de même puisqu'il peut toujours prendre de l'énergie et de la matière sur l'extérieur. C'est bien le cas de la Terre, puisqu'elle reçoit de l'énergie essentiellement du Soleil. Celui-ci joue un rôle déterminant dans son évolution, ne serait-ce que par la photosynthèse. Le principe du maximum de production d'entropie indique donc que le système formé par la Terre et la biosphère va évoluer de manière à maximiser la production d'entropie.

S'il est dans un état A produisant une entropie S_A par une unité de temps, il va chercher à atteindre l'état B produisant $S_B > S_A$ par unité de temps. Evidemment le saut de A à B n'est pas nécessairement possible dans un système bien stable, mais si le système a un comportement chaotique, le système passant rapidement par des états très différents, il va pouvoir choisir celui qui lui correspond le mieux, c'est à dire qui maximise la production d'entropie.

¹⁸¹ L. Onsager. *Reciprocal relations in irreversible processes*. Physical Review: I 37, 405-426, 1931; II 38, 2265-2279, 1931.

¹⁸² I. Prigogine, *Thermodynamics of irreversible processes*. Interscience, New-York, 1967.

¹⁸³ M. Kohler, *Behandlung von Nichtgleichgewichtsvorgängen mit Hilfe eines Extremalprinzips*. Z. Phys. 124, 772-789

¹⁸⁴ R. Dewar. *Information theory: explanation of the fluctuation theorem, maximum entropy production and self-organization criticality in non-equilibrium stationary states*. J. Phys. A Math. Gen. 36, 631-641, 2003.

¹⁸⁵ E.T. Jaynes. *Information theory and Statistical mechanics*. Physical Review series II. 106, 620-630, 1957; 108,171-190, 1957.

¹⁸⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Principle_of_maximum_entropy

C'est sur ce principe que François Roddier a développé une théorie globale de l'évolution, publiée sous le titre: *Thermodynamique de l'évolution, essai de thermo-bio-sociologie*¹⁸⁷. Il montre comment à tous les niveaux de structure de l'Univers la production d'entropie n'a cessé de croître depuis le Big-Bang. Par exemple, nos sociétés dissipent bien plus d'énergie que les sociétés primitives, par unité de masse. Ces dernières produisaient plus d'entropie que les dinosaures, toujours en les ramenant à la même masse.

Pour lui, depuis la première seconde de l'Univers, la création de toutes les structures astrophysiques, géophysiques, biologiques et sociologiques ont conduit à amplifier le taux d'entropie par gramme de matière.

Parallèlement, l'Univers s'est complexifié. Du chaos du Big-Bang, des structures de plus en plus complexes sont apparues. Ces structures portent une information codée grâce à différents canaux. Le code ADN de chaque organisme vivant fait partie de ces informations acquises parallèlement à la production d'entropie.

La question qui se pose alors est celle de la manière avec laquelle la nature atteint progressivement la maximisation de production d'entropie.

Chaos et Optimisation

En mathématiques, pour rechercher le maximum ou le minimum d'une fonction on applique un algorithme d'optimisation. La méthode la plus classique consiste dans l'algorithme du gradient, appelé aussi algorithme de la plus forte pente¹⁸⁸. Il consiste dans un processus itératif dans lequel on passe d'une solution à l'autre en modifiant la solution intermédiaire en tenant compte du gradient de la fonction à optimiser.

Dans le cas où cette fonction est convexe (dans le cas d'une minimisation) ou concave (dans le cas d'une maximisation) l'algorithme est optimal pour déterminer la solution. Ainsi, graduellement on converge sur la solution qui optimise la fonction.

Mais dans la nature on n'est pas toujours en présence d'un problème convexe, avec une seule solution. La fonction, dans notre cas la production d'entropie par unité de masse, peut avoir de nombreux maxima secondaires. A priori d'ailleurs nous n'en savons rien, mais à l'analyse des données paléontologiques, il est apparu que le taux de production d'entropie n'a fait que croître depuis la nuit des temps. Comment la nature s'est-elle prise pour atteindre ce résultat?

Pour lever l'ambiguïté des extrema secondaires, les mathématiciens ont développé de nombreux algorithmes, en particulier en copiant la nature elle-même, les algorithmes génétiques^{189 190}. Ils sont basés sur le principe de combinaisons des résultats précédents avec sélection. Ces algorithmes sont très coûteux en temps de calcul et ne convergent pas nécessairement vers la solution optimale.

¹⁸⁷ F. Roddier. *Thermodynamique de l'évolution, essai de thermo-bio-sociologie*. Editions Parole, Artignon-sur-Verdon (83530, France), 2012.

¹⁸⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_du_gradient

¹⁸⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_g%C3%A9n%C3%A9tique

¹⁹⁰ J. H. Holland, *Adaptation In Natural And Artificial Systems*, University of Michigan Press (1975)

L'algorithme du recuit simulé est lui aussi inspiré par la nature^{191 192}. On ajoute des valeurs aléatoires au résultat précédent, du point de vue thermodynamique cela correspond à les chauffer, puis on recherche un nouveau minimum ou maximum à partir de ces valeurs. Progressivement la température diminue, c'est-à-dire que la dispersion des valeurs ajoutées est progressivement réduite, jusqu'à convergence. Cet algorithme est utilisé de manière intensive en mathématiques appliquées. La convergence vers le minimum global est assurée si le cycle thermique prend bien en compte les propriétés globales de la fonction.

Les grandes extinctions et l'évolution des espèces

On voit donc différents processus ayant pu être mis en œuvre par la nature pour optimiser le taux de production d'entropie. Une évolution avec croisement des gènes et sélection: c'est l'évolution darwinienne. Mais cette évolution, graduelle, lente, peut se perdre autour d'un maximum secondaire de production.

Au cours de ce chapitre, nous avons vu que l'histoire de la Terre a été marquée par des grands épisodes d'extinctions d'espèces vivantes. Les géologues ont pu les mettre en évidence dans leurs études stratigraphiques. Ces événements ont conduit à éliminer aléatoirement un très grand nombre d'espèces. On n'est plus dans un algorithme génétique mais dans celui du recuit simulé. À chaque extinction massive la nature a évolué en éliminant les espèces les plus fragiles et en sélectionnant celles qui possédaient le plus d'atouts pour survivre.

Pour l'histoire de la vie, ces extinctions ont donc été un facteur essentiel de l'évolution des espèces vers une complexité, donc une production d'entropie, croissante. Plusieurs questions se posent alors: quelles en ont été leurs origines ? Ont-elles été uniques ?

¹⁹¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Recuit_simul%C3%A9

¹⁹² Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr, C. D.; Vecchi, M. P. (1983). "Optimization by Simulated Annealing". *Science* **220** (4598): 671–680.

Chapitre 2 : les extinctions massives

L'idée de grandes catastrophes d'origine cosmique remonte au moins aux temps bibliques. On trouvera dans l'ouvrage de Michel-Alain Combes "*La Terre Bombardée*" (LTB) un très bon historique des catastrophes pouvant être attribuées à des impacts cosmiques¹⁹³. Pour la grande majorité d'entre elles, il ne s'agissait que d'événements isolés, qui n'auraient entraîné que la disparition d'un écosystème sur une zone limitée (l'Atlantide, le Déluge, Sodome et Gomorrhe, par exemple). L'apocalypse de Jean est le dernier livre du Nouveau Testament¹⁹⁴. Michel-Alain Combes a beaucoup insisté dans son ouvrage sur les références qu'on peut y trouver à des catastrophes liées à des impacts qui auraient pu avoir eu lieu dans les siècles précédents.

D'une manière générale, les événements historiques, le plus souvent transformés en légendes, n'auraient conduit qu'au pire à la disparition partielle de la vie mais la notion d'extinctions massives des espèces, n'a émergée qu'au cours du 18^e siècle, associée au *Catastrophisme*. Cette thèse a été fortement combattue au 19^e siècle par les défenseurs de la théorie de Darwin de l'évolution, théorie conduisant au *Gradualisme*. Le catastrophisme a été complètement renouvelé au 20^e siècle¹⁹⁵, à l'examen des données paléontologiques.

1. L'évolution des espèces

Buffon et l'Histoire Naturelle

On doit à Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon¹⁹⁶, (1707-1788, Figure 23) la publication dans son *Histoire Naturelle*¹⁹⁷ de premiers travaux sur une histoire de la Terre marquée par une succession de périodes avec l'existence de disparition d'espèces¹⁹⁸.

Ces travaux étaient en conflit avec une interprétation littérale de la Bible, mais au 18^e siècle, il devenait évident que les nombreuses espèces de fossiles différaient des espèces vivantes. Le problème devint incontournable lorsque l'on découvrit des mammifères fossilisés, tels que les mastodontes¹⁹⁹, en Amérique du Nord, et les mammoths, en Sibérie.

¹⁹³ M.A. Combes. *La Terre Bombardée. La théorie de l'impactisme terrestre*. Editions France-Empire, 1982. Une version actualisée est accessible à l'adresse http://www.astrosurf.com/macombes/LTB_2012.pdf

¹⁹⁴ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Apocalypse>

¹⁹⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_massive

¹⁹⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Georges-Louis_Leclerc,_comte_de_Buffon

¹⁹⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_naturelle_%28Buffon%29

¹⁹⁸ Il s'agit du tome XXIV (suppléments V), *Des époques de la Nature*, publié en 1779. Ce document est accessible à l'adresse: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97518z>. Dans cet ouvrage Buffon recompose l'histoire de la Terre en 6 époques en se basant sur les 6 jours de la Genèse pour la Création du Monde jusqu'à l'homme.

¹⁹⁹ Les mastodontes sont des proboscidiens vivant au tertiaire et aujourd'hui éteints. Ils appartiennent à la famille des Mammutidae et ne doivent pas être confondus avec les vrais mammoths (*Mammuthus*), qui appartiennent à la famille des Elephantidae (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Mastodonte>).



Figure 23. Statue de Georges Buffon au Jardin des Plantes de Paris²⁰⁰

Cuvier et le Fixisme

Georges Cuvier (1769-1832, Figure 24), fondateur de l'anatomie comparée, a donné à la géologie des bases nouvelles, en fournissant les moyens de dater les couches terrestres par la nature de leurs fossiles²⁰¹. Dans *Les Révolutions de la surface du Globe* (1825) Cuvier a constaté les disparitions et apparitions simultanées de plusieurs espèces. Il en a déduit l'existence de crises locales. Il est devenu ainsi l'un des principaux défenseurs de la thèse du *fixisme* selon laquelle chaque espèce serait apparue telle quelle au cours du temps.

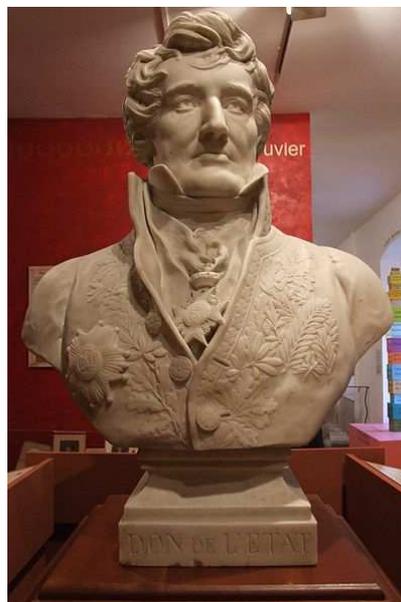


Figure 24. Buste de Georges Cuvier au musée de Montbeliard²⁰².

²⁰⁰ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GLBuffon.jpg>

²⁰¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Georges_Cuvier

²⁰² http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mus%C3%A9_de_Montb%C3%A9liard_-_Cuvier.jpg

Sur la page Wikipédia consacrée au transformisme les rédacteurs ont introduit cette intéressante discussion sur la genèse des thèses sur l'évolution²⁰³: "*Pour plusieurs théologiens, les extinctions étaient inconcevables, car le concept de plénitude ne s'accordait pas avec ces dernières : Dieu, ayant créé toutes les espèces vivantes possibles, ne permettrait pas que l'une d'elles disparût. Pour les autres naturalistes, majoritairement déistes, le problème posé par l'existence d'extinctions n'était pas plus clair, puisque Dieu ne pouvait intervenir sur Terre et modifier ou créer quoi que ce fût. Ils devaient alors soit postuler une loi établie dès la création du Monde expliquant la constante extinction d'espèces anciennes et l'apparition de nouvelles espèces au cours du temps géologique, ou tout simplement nier ces dernières. On tenta alors plusieurs hypothèses au cours du 18^e et du 19^e siècle.*

L'explication populaire identifiait le Déluge, ou toute autre catastrophe, comme cause des extinctions. Bien que cette hypothèse fût fragilisée par le constat de l'extinction de plusieurs espèces aquatiques, ce catastrophisme fut soutenu par plusieurs naturalistes tels que Georges Cuvier ou Louis Agassiz²⁰⁴. Selon une autre explication, les espèces supposées éteintes auraient pu survivre dans une région encore inexploree du globe. Enfin, certains expliquèrent les extinctions en soutenant qu'elles avaient été l'œuvre de l'homme, surtout dans le cas du mammoth et du mastodonte".

Pour Cuvier, il n'y a pas évolution des espèces. Celles-ci apparaissent telles quelles à différentes époques géologiques. Cette thèse va s'opposer ainsi au *transformisme*²⁰⁵ du Chevalier de Lamarck.

Lamarck et le Transformisme

Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829, Figure 25) fut un naturaliste qui a établi la classification des invertébrés²⁰⁶. Il a introduit le terme biologie pour désigner la science étudiant les êtres vivants.



Figure 25. Statue de Lamarck au Jardin des Plantes de Paris²⁰⁷.

Nous pouvons lire sur la page Wikipédia consacrée au transformisme: "*En introduisant les données géologiques et le facteur temps, dû au grand âge de la Terre, Lamarck cerna la faille de la théologie naturelle et des explications antérieures de l'extinction des espèces.*

²⁰³ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformisme>

²⁰⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Louis_Agassiz

²⁰⁵ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Transformisme>

²⁰⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste_de_Lamarck

²⁰⁷ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Statue_Lamarck_Leon_Fagel.jpg

Selon lui, l'idée d'une création parfaite des organismes, qui seraient parfaitement adaptées à l'environnement, contredisait la modification avérée et continue de la Terre. En conséquence, les espèces, se devant d'être en équilibre avec leur environnement pour survivre, devaient aussi changer, car les adaptations, dans de telles conditions de changements géologiques, ne pouvaient être maintenues que si les organismes s'ajustaient constamment aux circonstances, c'est-à-dire évoluaient.

La nouvelle conception de Lamarck faisait des extinctions un pseudo-problème : les espèces fossilisées que l'on croyait éteintes existaient encore ; elles avaient tout simplement changé dans de telles proportions qu'on ne les reconnaissait plus, sauf quand on pouvait suivre, en étudiant une série ininterrompue de fossiles, une évolution extrêmement lente".

Selon la page Wikipédia sur Lamarck, sa théorie était basée sur deux principes: i/ la complexification de l'organisation des êtres vivants sous l'effet de la dynamique interne propre à leur métabolisme, ii/ la diversification des êtres vivants sous la contrainte de l'adaptation au milieu.

Lyell et l'Uniformitarisme

Charles Lyell (1797-1875, Figure 26) est l'un des fondateurs de la géologie moderne²⁰⁸. Il fut le propagandiste de la thèse de l'Uniformitarisme, énoncée par James Hutton, qui est considéré comme le fondateur de la géologie. *L'uniformitarisme postule que les processus qui se sont exercés dans le passé lointain s'exercent encore de nos jours...Ce principe s'oppose au catastrophisme selon lequel les caractéristiques de la surface terrestre sont apparues soudainement dans le passé à partir de processus radicalement différents de ceux existant aujourd'hui*²⁰⁹.



Figure 26. Portrait de Charles Lyell.

Comme il est indiqué sur la page Wikipédia en référence, l'uniformitarisme a été modifiée au 20^e siècle pour tenir compte des catastrophes passées (impacts, volcanismes géants).

²⁰⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Lyell

²⁰⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Uniformitarisme>

En 1827, Charles Lyell a lu avec intérêt l'ouvrage de Lamarck sur la *Philosophie zoologique* (1809), même s'il n'avait admis l'ensemble des idées. Ami de Charles Darwin, il lui recommanda la lecture de cet ouvrage. Bien que soutenant le travail de Darwin, il n'approuva pas sa thèse de l'évolution des espèces, la considérant comme une modification de celle de Lamarck, thèse à laquelle il n'avait pas adhéré. Le conflit engendré durera jusqu'à leur mort^{210 211}.

Dès 1832, Lyell a introduit une notion essentielle, qui sera reprise par Darwin, le facteur d'adéquation d'une espèce à son environnement, le *fitness*²¹².

Darwin et la théorie de sélection naturelle

Charles Darwin (1809-1882, Figure 27) a révolutionné la compréhension de l'évolution des organismes vivants avec la publication en 1859 de son ouvrage *De l'origine des espèces* (1859).

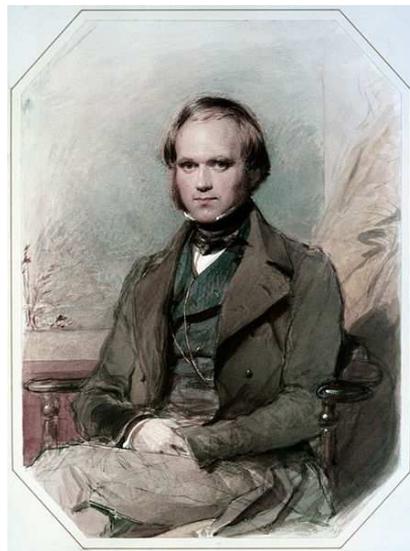


Figure 27. Portrait de Charles Darwin²¹³.

La théorie de la sélection naturelle^{214 215} de Charles Darwin²¹⁶ donne un cadre pour expliquer les transformations des espèces à travers la sélection des individus d'une population grâce à un avantage sélectif dans un environnement donné, cet avantage étant transmissible par hérédité. Dans sa forme initiale, cet ouvrage n'est pas une théorie de l'évolution, mais il traite d'un mécanisme pour expliquer la transformation et la diversification adaptative des espèces dans leur milieu. Ce n'est que dans dernière édition que le darwinisme deviendra une théorie de l'évolution. En cela il diffère profondément des travaux de Lamarck, qui avait cherché à

²¹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Lyell

²¹¹ D. Boulanger. Lamarck et son temps, Lamarck et notre temps. VRIN, Paris, 1981.

²¹² M.E.J. Newman, P.G. Palmer. *Models of extinction: a review*. SFI working paper 199-08-061 (www.santafe.edu), 1999.

²¹³ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charles_Darwin_by_G._Richmond.jpg

²¹⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9lection_naturelle

²¹⁵ Ch. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, Londres, John Murray, 24 novembre 1859

²¹⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Darwin

bâti une théorie de l'évolution en se basant sur des principes initiaux. On retrouve chez Darwin, le concept d'hérédité des caractères acquis qu'avait postulé Lamarck.

Cet ouvrage eut une large diffusion. Étant en opposition totale avec les thèses créationnistes, cette idée fut fortement dénigrée par les milieux religieux.

La théorie synthétique de l'évolution

Les lois de l'hérédité avaient été établies par Mendel vers 1850²¹⁷ et publiées en 1866 dans une obscure revue. Il a fallu attendre 1900 pour que ces lois soient redécouvertes par plusieurs biologistes, avec une large diffusion dans la communauté scientifique²¹⁸.

Cette découverte conduit naturellement au développement de la génétique des populations²¹⁹. Dans l'article Wikipédia correspondant, il est écrit qu'il s'agit de *l'étude de la distribution et des changements de la fréquence des versions d'un gène (allèles) dans les populations d'êtres vivants, sous l'influence des « pressions évolutives » (sélection naturelle, dérive génétique, recombinaison, mutations, et migration)*.

La synthèse de ces concepts avec la thèse de Darwin a conduit à ce qui est couramment appelé néodarwinisme, mais plus précisément *théorie synthétique de l'évolution*²²⁰. Cette théorie, très mathématique, permet de décrire comment une population peut évoluer en tenant compte principalement des mutations et de la sélection naturelle.

Les mutations consistent dans une modification de l'information génétique, donc d'une modification de la séquence ADN²²¹. Pour un virus à ARN, les mutations affectent l'ARN. Les mutations ont lieu en raison de facteurs mutagènes soit physiques soit chimiques²²². Les rayonnements ont joué un rôle sans doute important dans l'histoire de l'évolution. Il peut s'agir des rayons UV ou de rayonnements ionisants, comme ceux associés aux rayons cosmiques. La radioactivité joue également un rôle dans les mutations.

Théorie des équilibres ponctués

La théorie darwinienne n'est pas catastrophique, elle est gradualiste. Il y aurait une évolution continue des espèces, alors que l'histoire de la vie sur Terre montre qu'indubitablement il y a eu des phases d'extinctions massives, associées à des modifications profondes des strates géologiques.

Avec la *théorie des équilibres ponctués*^{223 224} (1972) Stephen Jay Gould et Niles Eldredge postulent que l'évolution comprend de longues périodes d'équilibre, ponctuées de brèves

²¹⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Lois_de_Mendel

²¹⁸ <http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9tique>

²¹⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9tique_des_populations

²²⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_synth%C3%A9tique_de_l%27%C3%A9volution

²²¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Mutation_g%C3%A9n%C3%A9tique

²²² <http://fr.wikipedia.org/wiki/Mutag%C3%A8ne>

²²³ http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quilibre_ponctu%C3%A9

²²⁴ Stephen Jay Gould, *La Structure de la théorie de l'évolution*, Éditions Gallimard, 2006, pages 1427-1430

périodes de changements. Les partisans du néodarwinisme ont souligné que Darwin avait aussi envisagé cette thèse dans la 6^e édition de son ouvrage sur l'Origine des Espèces²²⁵.

On peut montrer des systèmes dynamiques peuvent évoluer avec un comportement montrant des évolutions très rapides (transitions de phase) suivies de périodes stables^{226 227}. Il n'est donc pas nécessaire d'introduire un événement extérieur au monde vivant pour interpréter l'existence de discontinuités dans les populations.

Pour aller plus loin il est indispensable d'étudier et d'analyser les extinctions massives des espèces bien identifiées et d'en rechercher les causes : catastrophes liées à un événement d'origine extraterrestre, cataclysmes d'origine purement terrestre, phénomènes purement écologiques, évolutions biologiques naturelles, etc.

2. Les différentes extinctions massives

Le renouveau du catastrophisme

Les thèses catastrophistes ont été progressivement abandonnées, jusqu'à la parution de d'un article en 1963 dans la revue *Scientific American*²²⁸ écrit par le géologue américain Norman Newell²²⁹ concernant les crises dans l'histoire de la vie.

Cette thématique a pris un intérêt considérable lors de la publication en 1980 dans la revue *Science* d'un article écrit par Luis Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro et Helen Michel sur la cause extraterrestre de l'extinction des dinosaures non aviens entre le Crétacé et le Tertiaire²³⁰. Les auteurs s'appuyaient sur l'existence d'une anomalie du taux d'iridium dans une couche liée à cette extinction.

Dans la classification géochimique l'iridium fait partie des éléments sidérophiles en raison de son affinité pour le fer, à l'état liquide²³¹. Pour cette raison, au moment de la formation de la Terre cet élément très rare a en grande partie migré avec le fer au centre de la Terre. Son abondance dans la croûte terrestre est donc bien inférieure à celle qu'on trouve dans le système solaire. Une anomalie dans une couche géologique peut signifier une origine extra terrestre, en raison d'un impact de comète ou d'astéroïde.

Luis Alvarez (1911-1988, Figure 28, à gauche) était un physicien américain fort connu, prix Nobel en 1968, spécialisé en physique nucléaire et en rayonnement cosmique²³². Il participa auprès d'Oppenheimer au développement de la bombe atomique. Il se consacra ensuite à la construction de l'accélérateur linéaire de protons de Berkeley. Cet instrument le conduisit à la découverte de plusieurs états de résonance des particules élémentaires. Son fils Walter (Figure

²²⁵ P. Tort. *Darwin et le Darwinisme* p. 89 (Que sais-je? PUF), cité dans la page Wikipédia sur les Équilibres ponctués.

²²⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Bak%E2%80%93Sneppen_model

²²⁷ Bak, P. and Kim Sneppen (1993). "Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution". *Physical Review Letters* **71** (24): 4083–4086

²²⁸ Newell, N. D. (1963). "Crises in the History of Life." *Scientific American* 208 (2): 76-92.

²²⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Norman_D._Newell

²³⁰ L.W. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro, and H.V. Michel, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: Experimental results and theoretical interpretation: *Science*, 208, 1095-1108, 1980.

²³¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Sid%C3%A9rophile>

²³² http://en.wikipedia.org/wiki/Luis_Walter_Alvarez

28, à droite) était un géologue ayant apporté des contributions essentielles à la théorie de la tectonique des plaques pour la Méditerranée²³³. Frank Asaro et Helen Michel étaient deux collaborateurs chimistes.



Figure 28. Photographie, à gauche Luiz Alvarez et à droite son fils Walter²³⁴. Elle a été obtenue en 1981 devant une couche géologique associée à l'anomalie K-T à Gubbio, en Italie.

Ce travail a joué un rôle majeur dans la relance de l'intérêt des scientifiques sur les extinctions massives des espèces. De plus en plus de données ont été ensuite accumulées pour mieux les comprendre.

Les variations temporelles du taux d'extinction des espèces

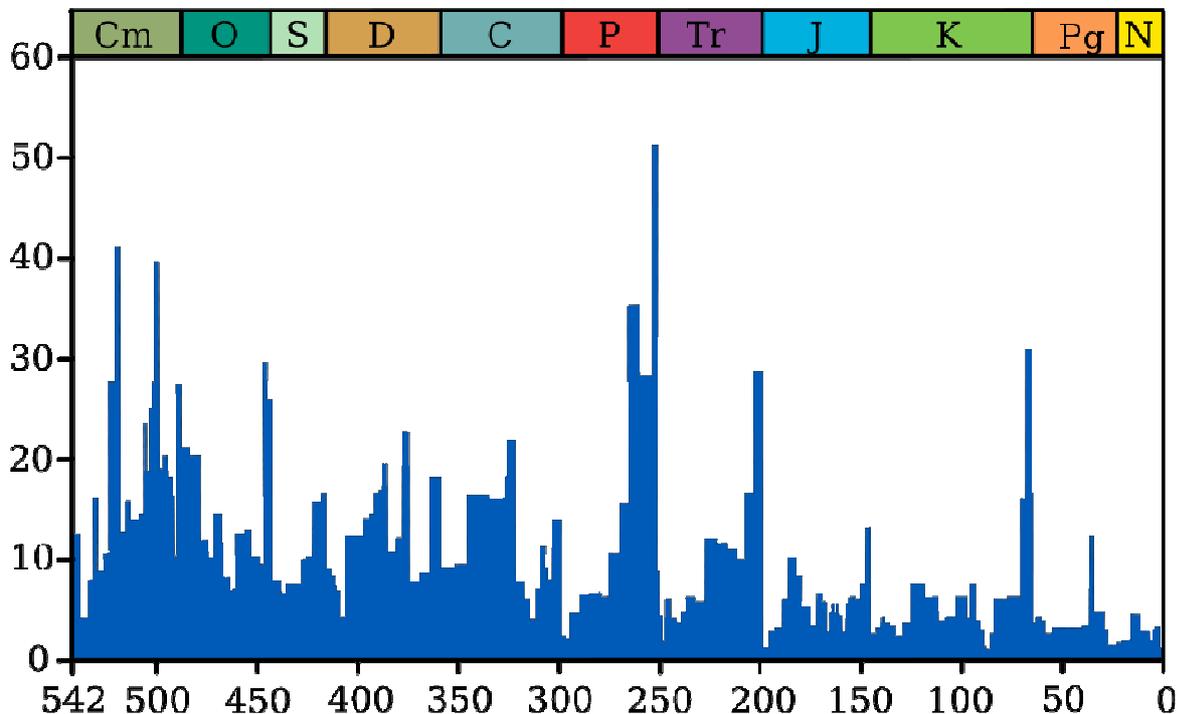


Figure 29. Variation avec le temps du taux d'extinction des espèces marines.

²³³ http://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Alvarez

²³⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/File:LWA_with_Walt.JPG

Les variations du taux d'extinction des espèces marines avec le temps sont représentées sur la Figure 29²³⁵. Les données proviennent du compendium sur les espèces et genres marins fossiles accumulé par John Sepkowi²³⁶. Ce sont ces données qui sont exploitées généralement pour les études sur les extinctions massives.

On remarque immédiatement l'existence de pics très élevés au dessus d'un fond moyen qui a tendance à baisser. Les pics sont associés aux discontinuités mises en évidence par la stratigraphie géologique. Leur décompte est lié au seuil d'extinction considéré. Généralement on considère qu'il y a eu 5 extinctions majeures. Sur la page Wikipédia, 6 extinctions massives sont proposées²³⁷ :

- L'extinction entre le Cambrien et l'Ordovicien, il y a environ 500 Ma. Cette extinction n'apparaît pas dans la liste des 5 majeures ;
- Celle entre l'Ordovicien et le Silurien entre -440 et -435 Ma, sous la forme de deux extinctions consécutives ;
- Celle entre le Dévonien et le Carbonifère (-365 Ma) ;
- Celle entre le Permien et le Trias de -245 Ma à -252 Ma. C'est la plus intense, on considère aujourd'hui que 95% des espèces marines et 70% des espèces terrestres ont alors disparues ;
- Celle du Trias il y a 200 Ma (75% des espèces marines, 70% des espèces terrestres) ;
- Celle du Crétacé-Paléogène il y a 65 Ma, la plus connue et qui a conduit à la disparition d'environ 50% des espèces.

On note aisément sur la figure plusieurs époques où le taux d'extinction a aussi été très important. Ainsi Richard Bambach note sur les données de Sepkovski 19 périodes d'extinction massive²³⁸.

3. L'extinction du Crétacé-Paléogène

La signature de l'événement

L'extinction Crétacé-Tertiaire ou extinction K-T (de l'allemand Kreide-Tertiär) s'est produite il y a 65,5 Ma environ, dans une courte période de temps à l'échelle géologique²³⁹. Cet événement marque la fin de l'ère mésozoïque et le début de l'ère cénozoïque. Elle est associée à une signature géologique connue sous le nom de limite K-T, habituellement une couche mince d'argile présentant un taux anormal d'iridium que l'on retrouve dans diverses régions du monde. Cet événement est maintenant désigné comme l'extinction du Crétacé-Paléogène (C-P).

²³⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Extinction_intensity.svg

²³⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Jack_Sepkoski

²³⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_massive

²³⁸ R. Bambach. Phanerozoic biodiversity mass extinctions. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 34, 127-155, 2006.

²³⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_du_Cr%C3%A9tac%C3%A9-Pal%C3%A9og%C3%A8ne

Les populations disparues

Les paléontologues estiment majoritairement que les dinosaures non aviens se sont éteints juste avant, ou pendant l'évènement. Les rares fossiles de dinosaures découverts au-dessus de la limite K-T étaient supposés être là du fait du remaniement des sédiments, c'est-à-dire que l'érosion les a ramenés à la surface puis ils ont été recouverts par un dépôt de sédiments plus récents. Cependant, cette théorie n'est pas certaine, les systèmes de datation utilisés jusqu'au début des années 2010 ne permettant pas de dater directement les ossements. Les mosasaures²⁴⁰, les plésiosaures²⁴¹, les ptérosaures²⁴² et de nombreuses espèces de plantes et d'invertébrés se sont également éteints. Les clades de mammifères et d'oiseaux ont survécu avec peu d'extinctions, et une radiation évolutive des taxons de la fin du Crétacé s'est produite bien après la limite. Les taux d'extinctions et de radiations ont varié à travers différents clades.

Scénario possible

Bien que l'évènement de la limite K-T ait été de grande ampleur, il y eut une variabilité significative du taux d'extinction entre les différents groupes d'espèces. On suppose que des particules atmosphériques ont bloqué la lumière du Soleil, réduisant la quantité d'énergie solaire pouvant atteindre la Terre. Les effectifs des espèces dépendant de la photosynthèse ont donc diminué, certaines espèces se sont même éteintes. Vers la fin du crétacé, les organismes qui photosynthétisent, dont le phytoplancton et les plantes terrestres, étaient à la base de la chaîne alimentaire comme c'est le cas aujourd'hui. L'extinction d'espèces végétales alors dominantes a causé un remaniement important de ce groupe d'organismes. L'observation suggère que les animaux herbivores se sont éteints quand les plantes dont ils dépendaient pour se nourrir sont devenues rares ; en conséquence, les prédateurs supérieurs comme le Tyrannosaure ont également péri.

Les *coccolithophorides*²⁴³ (des algues unicellulaires microscopiques) et les mollusques, incluant les ammonites, les rudistes, les escargots d'eau douce et les moules, ainsi que les organismes dont la chaîne alimentaire inclut ces animaux à coquilles se sont éteints ou ont connu de lourdes pertes. Par exemple, on pense que les ammonites étaient la nourriture principale de mosasaures, un groupe de vertébrés marins géants qui se sont éteints précisément à cette période²⁴⁰.

Les populations survivantes

Les omnivores, les insectivores et les charognards ont survécu à l'évènement d'extinction, peut-être en raison de la plus grande disponibilité de leurs sources de nourriture. À la fin du crétacé il ne semble y avoir eu aucun mammifère purement herbivore ou purement carnivore. Les mammifères et les oiseaux qui ont survécu à l'extinction se sont nourris d'insectes, de vers, et d'escargots, qui eux-mêmes se nourrissaient de matière morte végétale ou animale. Les scientifiques pensent que ces organismes ont survécu à l'effondrement des chaînes

²⁴⁰ Les Mosasauridae sont une famille éteinte de reptiles marins géants apparentés aux lézards et aux serpents (mais en aucune façon aux dinosaures, aux plésiosaures ou aux ichtyosaures) et regroupant différents genres comme le *Mosasaurus* (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Mosasauridae>).

²⁴¹ Les plésiosaures (*Plesiosauroidea*) étaient de grands vertébrés diapsides (ayant deux fosses temporales comme les reptiles actuels ou les oiseaux) aquatiques (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Plesiosauroidea>). Ils possédaient un très long cou.

²⁴² Les ptérosaures (*Pterosauria*) sont des vertébrés volants apparus il y a 230 Ma et il y a 65 Ma. Ils pouvaient atteindre 12 m d'envergure (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Pt%C3%A9rosaures>).

²⁴³ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Coccosphaerales>

alimentaires basées sur les plantes parce qu'ils se sont nourris de débris ou d'autres matériaux organiques non vivants.

Dans les biocénoses²⁴⁴ des cours d'eau, peu de groupes d'animaux se sont éteints parce que ces communautés dépendent moins directement des plantes vivantes pour leur nourriture et plus des débris qui ruissellent de la terre, ce qui les protégea de l'extinction. Des mécanismes semblables, mais plus complexes ont été observés dans les océans. Les extinctions ont été plus nombreuses parmi des animaux vivant dans la zone pélagique, que parmi des animaux des fonds sous-marins. Les animaux de la zone pélagique dépendent presque entièrement de la production primaire du phytoplancton vivant, alors que des animaux vivants dans les fonds marins s'alimentent de débris ou peuvent passer à une alimentation constituée uniquement de débris.

Les plus grands survivants aérobies de l'évènement, les crocodiliens et les *champsosaures*,²⁴⁵ étaient semi-aquatiques et ont eu accès aux débris. Les crocodiliens modernes peuvent vivre comme charognards et survivre pendant des mois sans nourriture. En outre, dans leur jeunesse, ils se développent lentement et se nourrissent pendant leurs premières années en grande partie d'invertébrés et d'organismes morts ou de fragments d'organismes. Ces caractéristiques ont permis la survie de ces espèces à la fin du Crétacé.

Après l'évènement du K-T, la biodiversité a eu besoin d'un temps substantiel pour récupérer, en dépit de l'existence de nombreuses niches écologiques.

4. Théories concernant l'extinction K-T

Plusieurs théories expliquent la limite K-T et les causes de l'extinction massive. À la base de ces théories on trouve des impacts de météorites ou un volcanisme accru ; certaines théories intègrent les deux éléments. On a aussi proposé un scénario combinant trois causes : le volcanisme, la régression marine, et un impact cosmique. Dans ce dernier scénario, les communautés terrestres et marines auraient été perturbées par les changements dans leurs écosystèmes et par des pertes d'habitats. Les dinosaures, ainsi que les plus grands vertébrés, auraient été les premiers affectés par les changements environnementaux, en conséquence leur diversité aurait diminué. En même temps, des particules en suspension provenant du volcanisme auraient refroidi et asséché certains secteurs du globe. Puis, un impact cosmique se serait produit, ce qui aurait causé un effondrement des chaînes alimentaires fondées sur la photosynthèse, affectant à la fois les chaînes alimentaires terrestres déjà perturbées et les chaînes alimentaires marines. La différence principale entre cette théorie et les théories reposant sur une cause unique est que ses partisans pensent qu'aucune des causes uniques ne soit suffisante pour expliquer l'ampleur des extinctions ni pour produire le modèles taxonomiques de l'extinction.

²⁴⁴ Une biocénose est l'ensemble des êtres vivants coexistant dans un espace défini (le biotope), ainsi que leur organisation et leur richesse spécifique (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Bioc%C3%A9nose>).

²⁴⁵ Les champsosaures furent d'étranges reptiles dont les affinités restent encore incertaines. Si leur allure générale rappelle celle des crocodiles, cette ressemblance n'est qu'un phénomène de convergence évolutive: les deux groupes, qui ne sont pas directement apparentés, ont acquis une morphologie semblable par adaptation à un environnement identique. Les premiers représentants du groupe des champsosaures sont apparus à la fin du Trias, il y a 210 millions d'années. Les champsosaures ont vécu dans les eaux douces de l'hémisphère nord jusqu'à l'Oligocène, il y a environ 30 millions d'années (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Champsosaurus>).

*Les Trapps du Deccan*²⁴⁶

Des couches de lave gigantesques ont été retrouvées dans la région du Deccan : il peut y avoir jusqu'à 2 400 m d'épaisseur de basalte, et la surface actuellement couverte dépasse les 500 000 km² (à partir d'une surface originelle sans doute supérieure à 1 500 000 km²). Avant l'an 2000, l'argument qu'il y avait un lien avec l'extinction n'était évoqué que dans l'hypothèse d'une extinction progressive, car on pensait l'intense activité volcanique avait commencé autour de 68 Ma et avait duré plus de 2 millions d'années. Plus récemment, on a déterminé que les énormes éruptions volcaniques se produisirent sur une période de 800 000 ans comprenant la limite K-T, et pourraient donc être responsables de l'extinction et du rétablissement biotique ralenti qui a suivi.

Les Trapps du Deccan pourraient avoir causé l'extinction par plusieurs mécanismes, y compris le dégagement de poussières, de cendres et d'aérosols soufrés dans l'air qui pourraient avoir bloqué la lumière du Soleil et réduit ainsi la photosynthèse pour les plantes. En outre, le volcanisme des Trapps du Deccan pourrait avoir eu comme conséquence des émissions de gaz carbonique qui auraient augmenté l'effet de serre déjà produit par les poussières et les aérosols présents dans l'atmosphère.

La régression marine

Des indications claires montrent que le niveau des mers s'est abaissé à la fin du Crétacé plus qu'à n'importe quelle autre moment de l'ère mésozoïque. Dans certains étages stratigraphiques de la fin du Crétacé de diverses régions du monde, les plus récents sont terrestres ; on trouve ensuite des rivages et les étages les plus anciens correspondent à la mer. Ces couches ne montrent pas l'inclinaison et la déformation liées à la construction de montagne, donc, l'explication la plus probable est une régression, c'est-à-dire, une baisse du niveau de la mer. On n'a pas de preuve directe de la cause de cette régression, mais l'explication qui est actuellement acceptée comme la plus probable est que les rides médio-océaniques²⁴⁷ sont devenues moins actives et sont donc descendues sous leur propre poids.

Une régression sévère aurait considérablement réduit le plateau continental, qui est le secteur le plus riche en espèces marines, et pourrait donc avoir suffi pour causer une extinction de masse marine. Cependant les recherches concluent que ce changement aurait été insuffisant pour causer le niveau d'extinction observé chez les ammonites. La régression aurait également causé des changements climatiques, en partie en perturbant des vents et des courants océaniques et en partie en réduisant l'albédo de la Terre entraînant donc des températures globales croissantes.

L'impact cosmique

À la fin des années 1970, l'exploration de certaines couches géologiques a révélé une couche d'argile de quelques centimètres d'épaisseur entre les strates du Crétacé et du Tertiaire. On parle d'elle sous le nom de limite Crétacé-Tertiaire, de limite CT ou de limite K-T. Cette limite géologique, bien visible en certains points du globe, présente un taux anormal d'iridium (30 fois et 130 fois plus élevé que la normale dans les deux sections étudiées à l'origine).

²⁴⁶ Keller G, Adatte T, Gardin S, Bartolini A, Bajpai S, « Main Deccan volcanism phase ends near the K–T boundary: Evidence from the Krishna-Godavari Basin, SE India », *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 268, 2008, p. 293–311

²⁴⁷ Une dorsale, ou ride médio-océanique, est une frontière de divergence entre deux plaques tectoniques qui s'écartent l'une de l'autre, couplé à une remontée du manteau entre elles avec création de lithosphère océanique : c'est le phénomène d'accrétion océanique (http://fr.wikipedia.org/wiki/Dorsale_%28g%C3%A9ologie%29).

L'iridium est extrêmement rare dans la croûte terrestre parce que c'est un élément sidérophile, ce qui signifie qu'il a migré avec le fer pendant la différenciation planétaire et se trouve donc principalement dans le noyau. Cet élément est donc rare sur Terre mais abondant dans certaines météorites.

Comme je l'ai indiqué ci-dessus, en 1980, un groupe de scientifiques autour du prix Nobel de physique Luis Alvarez a émis l'hypothèse de la chute d'une météorite (astéroïde ou comète) à cette période. Cette hypothèse d'un impact cosmique avait été publiée auparavant, mais l'hypothèse ne s'appuyait pas sur des données concrètes.

L'impact aurait formé un large cratère. La conséquence d'un tel impact aurait été un nuage de poussière, qui aurait bloqué la lumière du Soleil sur une majeure partie de la Terre pour une année ou moins, et une augmentation des aérosols soufrés dans la stratosphère, menant à une réduction de 10-20 % du rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre et empêchant ainsi la photosynthèse. Il aurait fallu au moins dix ans pour que ces aérosols se soient déposés, expliquant donc l'extinction des plantes, du phytoplancton et des organismes dépendant de ces derniers (comprenant les prédateurs aussi bien que les herbivores). Les petites créatures ayant un régime alimentaire à base de détritus ont eu de meilleures chances de survie. Les conséquences de la réentrée des éjectas dans l'atmosphère terrestre aurait causé une brève (quelques heures) mais intense augmentation du rayonnement infrarouge, tuant les organismes y étant exposés. Des tempêtes de feu globales ont pu résulter de l'augmentation de chaleur et de la chute sur Terre de fragments incendiaires provenant de l'explosion. Les niveaux élevés d'oxygène pendant le Crétacé supérieur auraient maintenu une combustion intense. Le niveau de l'oxygène atmosphérique est descendu au début de la période tertiaire. Si des feux de grande ampleur se sont produits, ils ont augmenté la teneur en CO₂ de l'atmosphère et ont causé un effet de serre temporaire une fois que le nuage de poussière s'était résorbé, et ceci aurait exterminé les organismes les plus vulnérables qui avaient survécu à la période juste après l'impact.

L'impact a pu également avoir produit des pluies acides, selon le type de roche sur lequel l'astéroïde a frappé. Cependant, la recherche récente suggère que cet effet aurait été relativement mineur, ne durant qu'approximativement 12 ans. L'acidité était neutralisée par l'environnement, et la survie des animaux vulnérables aux effets des pluies acides (comme les grenouilles) indiquent que cet effet n'a pas contribué de façon importante à l'extinction. Les théories d'un impact cosmique peuvent seulement expliquer des extinctions très rapides, puisque les nuages de poussière et les aérosols sulfurés potentiels seraient éliminés de l'atmosphère dans un temps assez court (moins de 10 ans).

Des recherches ultérieures ont permis d'identifier le cratère enterré sous Chicxulub sur la côte du Yucatán, au Mexique (Figure 30²⁴⁸), comme cratère d'impact concordant avec la datation de l'hypothèse d'Alvarez. Identifié en 1990 à la suite du travail de Glen Penfield effectué en 1978, ce cratère est ovale, avec un diamètre moyen d'environ 177 km, soit une taille proche de celle calculée par l'équipe d'Alvarez²⁴⁹. La forme et la localisation du cratère indiquent d'autres causes de dévastation en plus du nuage de poussière. L'astéroïde a atterri dans l'océan ce qui aurait causé des tsunamis, dont les traces ont été trouvées dans plusieurs endroits dans les Caraïbes et à l'est des États-Unis – du sable marin en des endroits qui n'étaient alors pas côtiers, et des débris de végétation et des roches terrestres dans des sédiments marins datant

²⁴⁸ <http://www.athenapub.com/chicxmp1.htm>

²⁴⁹ Hildebrand, A. R., G. T. Penfield, et al. (1991). "Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico." *Geology* 19: 867-871.

de la période de l'impact. L'astéroïde a atterri dans un lit de gypse (sulfate de calcium), ce qui aurait produit un dégagement d'anhydride sulfureux sous forme d'aérosols. Cela aurait réduit encore plus l'intensité lumineuse du Soleil à la surface de la Terre puis aurait provoqué des pluies acides, tuant la végétation, le plancton et les organismes qui possèdent des coquilles de carbonate de calcium (les *coccolithophoridés*²⁵⁰ et les mollusques). En février 2008, une équipe de chercheurs a utilisé des images sismiques du cratère pour déterminer que le projectile a atteint l'eau plus profondément que ce que l'on avait supposé précédemment. Ceci aurait eu comme conséquence que les aérosols dans l'atmosphère auraient été plus riches en sulfates, augmentant la mortalité de l'impact par des changements de climat et des pluies acides.

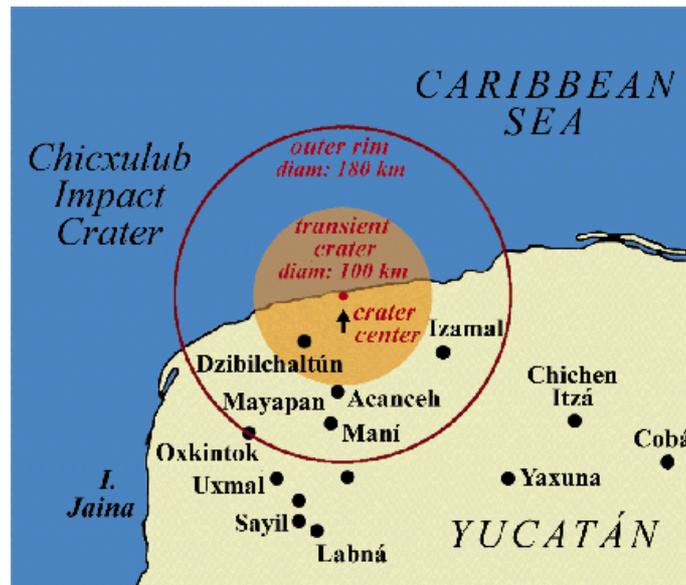


Figure 30 La zone d'impact de l'astéroïde du Chicxulub il y a 66 Ma.

La plupart des paléontologistes s'accordent maintenant pour dire qu'un astéroïde a frappé la Terre il y a 65 Ma, mais il n'y a pas de consensus sur le fait que l'impact soit ou non la cause unique des extinctions. On a montré qu'il y a un intervalle d'environ 300 000 ans entre l'impact et l'extinction de masse. En 1997, le paléontologue Sankar Chatterjee a attiré l'attention sur le cratère de Shiva qui est beaucoup plus grand (600 km) et a émis l'hypothèse d'un scénario d'impacts multiples²⁵¹.

En 2007, des chercheurs ont émis l'hypothèse que le projectile qui a tué les dinosaures il y a 65 Ma appartenait à la famille d'astéroïdes de Baptistina²⁵². Le lien entre les deux évènements avait été mis en doute, en partie parce qu'on possède très peu d'observations de l'astéroïde ou de la famille. En effet, on a récemment découvert que 298 Baptistina ne partagent pas la même signature chimique que la source de l'impact du K-T. Bien que ceci rende le lien entre la famille de Baptistina et le projectile de K-T plus difficile à justifier, il n'en exclut pas la possibilité.

Selon une nouvelle étude publiée le 7 février 2013 dans la revue américaine Science, la chute de la météorite au Mexique aurait bien porté un coup fatal aux dinosaures il y a 66 millions

²⁵⁰ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Coccosphaerales>

²⁵¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Shiva_crater

²⁵² Bottke WF, Vokrouhlický D, Nesvorný D (September 2007). "An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor". *Nature* **449** (7158): 48–53.

d'années²⁵³. Il est estimé que l'objet impacteur mesurait près de 10 km de diamètre. En utilisant des techniques de datation radiométrique de haute précision, la collision se serait produite il y a 66,038 Ma, soit 33 000 ans avant l'extinction des dinosaures (laquelle daterait donc d'il y a 66,005 Ma). Comme l'indique Paul Renne, professeur à l'université de Berkeley, le faible écart temporel entre les deux événements semblent indiquer que l'impact a eu un rôle important dans l'extinction des dinosaures. Cependant, il précise que *si l'impact a porté le coup fatal aux dinosaures, ça n'a probablement pas été le seul facteur*, citant par exemple de fortes variations climatiques pendant le million d'années précédant leur disparition, dont de longues périodes froides, causées notamment par une série d'énormes éruptions volcaniques en Inde.

Ces dernières estimations permettent de préciser les estimations des précédentes études sur la date de la cette extinction, déduites à partir de l'étude des fossiles. Jusqu'alors, il était en effet estimé que cet impact avait eu lieu 300 000 ans avant la disparition des dinosaures.

Plusieurs autres cratères semblent s'être également formés au moment de la limite K-T. Ceci suggère la possibilité d'impacts multiples presque simultanés, peut-être provenant des fragments d'un unique objet cosmique, semblable à la collision de Comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter en 1994²⁵⁴. En plus du cratère de Chicxulub de 180 kilomètres, il y a le cratère de Boltysh en Ukraine de 24 km daté à $(65.17 \pm 0.64 \text{ Ma})$, le cratère de Silverpit de 20 km, un cratère d'impact suspecté dans la Mer du Nord daté à (60-65 Ma), et le cratère de Shiva et ses 600 km controversés. Les autres cratères auraient pu s'être formés dans l'océan Téthys et avoir été effacés par des événements tectoniques comme la dérive de l'Afrique et celle de l'Inde vers le nord.

Causes multiples

J. David Archibald et David E. Fastovsky ont proposé un scénario combinant les trois causes²⁵⁵ : volcanisme, régression marine et impact cosmique. Dans ce scénario, les communautés terrestres et marines auraient été perturbées par les changements de leurs écosystèmes et par des pertes d'habitat. Les dinosaures, comme les plus grands vertébrés, auraient été les premiers affectés par les changements environnementaux, et leur diversité aurait diminué. En même temps, les particules causées par le volcanisme auraient refroidi et asséché certains secteurs du globe. Puis, un impact cosmique se serait produit, causant l'effondrement des chaînes alimentaires fondées sur la photosynthèse, à la fois dans les chaînes alimentaires terrestres déjà soumises à perturbations et dans les chaînes alimentaires marines. La différence principale entre cette théorie et les théories mettant en avant une cause unique est que ses partisans pensent que les causes simples qui sont avancées soit n'avaient pas la force nécessaire pour causer les extinctions, soit n'étaient pas susceptibles de produire le profil taxonomique des extinctions. La difficulté à trancher de façon définitive vient de l'impossibilité actuelle de définir un biotope sur quelques milliers ou même millions d'années de façon très précise. Seule cette précision permettrait de dire si les groupes d'espèces ont disparu en quelques jours (ce qui confirmerait définitivement la thèse de la météorite comme

²⁵³ Paul R. Renne, Alan L. Deino, Frederik J. Hilgen, Klaudia F. Kuiper, Darren F. Mark, William S. Mitchell III, Leah E. Morgan, Roland Mundil, Jan Smit, Time Scales of Critical Events Around the Cretaceous-Paleogene Boundary, Science 8 February 2013: Vol. 339 no. 6120 pp. 684-687

²⁵⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Shoemaker-Levy_9

²⁵⁵ Archibald, J. D. and Fastovsky, D. E. 2004. Dinosaur extinction. In, Weishampel, D. B et al., eds., *The Dinosauria*. University of California Press, p.672-684

cause dominante), ou en quelques centaines de milliers d'années (ce qui ferait plutôt pencher pour les Trapps du Deccan, ou pour un mixte Deccan — régression marine et météorite).

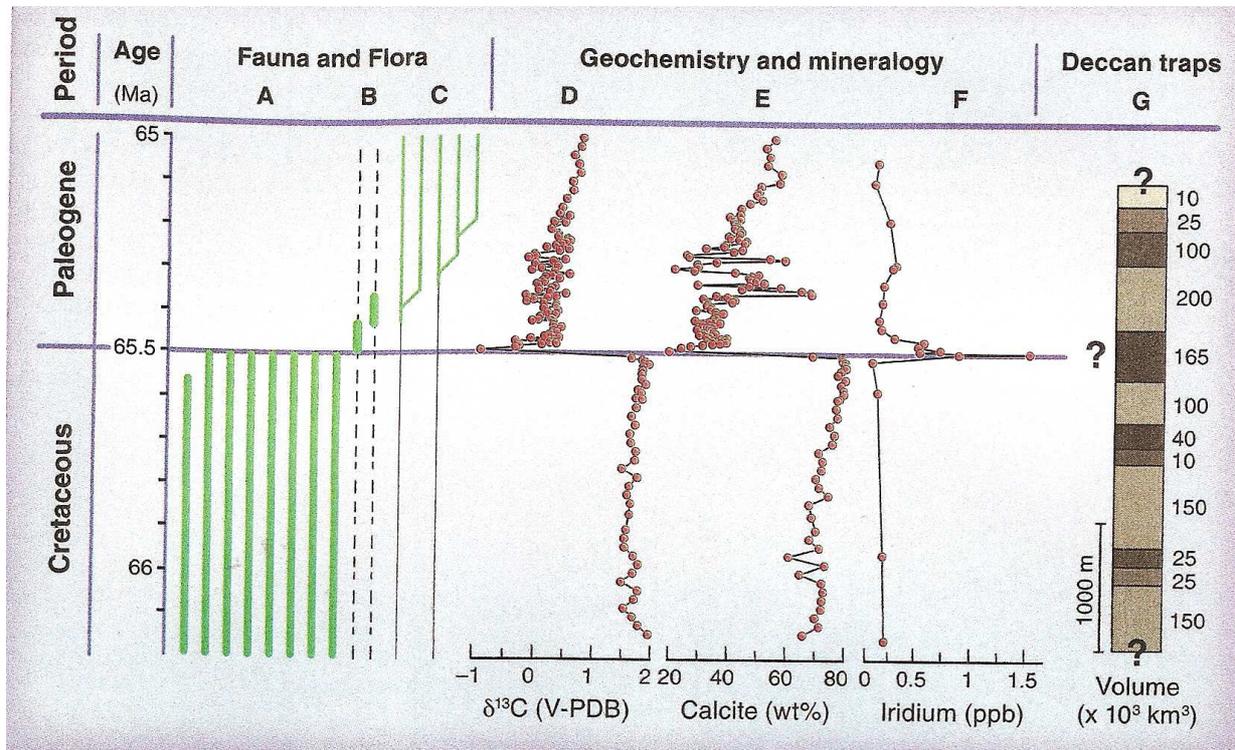


Figure 31 Stratigraphie et indications schématiques des événements biotiques autour la discontinuité K-T et les liens avec les facteurs chimiques et minéralogiques.

Scénario complet

Peter Schulte et ses collaborateurs en 2010 pour proposer un scénario complet de cette extinction massive²⁵⁶. Pour eux la cause décisive est celle de l'impact météoritique. Sur la Figure 31, la figure 1 de leur article a été reportée. Les colonnes A, B, C correspondent schématiquement à l'évolution de la faune et de la flore : A pour les espèces qui disparaissent à cette époque, B celles qui survivent telles quelles, et C pour les nouvelles espèces. Les colonnes D, E et F correspondent aux mesures faites du carbone 13 et de la calcite, très sensibles à la masse vivante, et de l'iridium, sans doute lié à la chute de l'astéroïde. La colonne 13 donne une indication de l'écoulement basaltique dans le Deccan durant cette période.

Il est clair sur ce schéma que les trapps du Deccan ne peuvent avoir été le facteur déclenchant de l'extinction. La coïncidence de la couche d'argile ayant un taux élevé d'iridium est trop évidente pour réfuter que la cause directe ne puisse être l'impact avec un ou plusieurs météorites.

²⁵⁶ P. Schulte et al. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary, *Science*, 327, 1214-18, 2010, <http://www.sciencemag.org/content/327/5970/1214.short>

5. Extinction du Permien-Trias²⁵⁷

Les faits

L'extinction Permien-Trias ou extinction permienne est une extinction massive survenue il y a environ 252 Ma. Cette extinction est marquée par la disparition de 95 % des espèces marines et de 70 % des espèces vivant sur les continents, ce qui en fait la plus grande extinction massive ayant affecté la biosphère. En conséquence, retrouver un niveau de diversification équivalent a pris beaucoup plus de temps que pour les autres extinctions massives. Les étapes de l'extinction sont encore controversées. Différentes études suggèrent de un à trois pics.

Selon une étude parue en octobre 2012²⁵⁸, une chaleur extrême aurait dominé sur la Terre pendant 5 Ma, rendant impossible à la vie de s'épanouir de nouveau. En effet, dans les régions équatoriales, la température avoisinait entre 50° et 60°. Tandis qu'à la surface des océans équatoriaux, elle approchait 40°. Pour parvenir à ces résultats, la composition de près de 15 000 ossements fossiles de conodontes, des animaux marins, a été analysée. En mesurant la quantité d'isotopes de l'oxygène présents dans ces ossements, les chercheurs ont pu retracer les niveaux de températures océaniques et terrestres qui ont vraisemblablement prévalu à cette époque.

Causes

Il existe plusieurs mécanismes proposés pour expliquer l'extinction. Dans l'hypothèse de pics multiples, le plus important serait dû à une évolution graduelle de l'environnement alors que le second serait dû à un événement catastrophique.

Les évolutions graduelles seraient des changements progressifs du niveau de la mer, l'anoxie (manque d'oxygène), l'accroissement de l'aridité et une modification dans la circulation océanique due à un changement climatique.

L'événement catastrophique pourrait être un ou plusieurs impacts de météorites, l'augmentation du volcanisme (notamment celle dont les trapps de Sibérie sont la trace), ou la soudaine libération d'hydrates de méthane à partir des océans avec, comme conséquence, une baisse importante de la teneur en dioxygène.

En janvier 2011, des géologues de l'Université de Calgary ont publié un article dans la revue Nature Geoscience appuyant l'hypothèse de l'éruption d'un supervolcan en Sibérie²⁵⁹. ***
Courtilot 2014

Tectonique des plaques

Cette crise serait en relation avec la survenue d'un phénomène géologique principal dû à la tectonique des plaques²⁶⁰. « *En reconstruisant l'histoire du mouvement des continents, on se rend compte que le Permien a été le théâtre d'un événement unique : la réunion de tous les continents en un seul supercontinent* », la Pangée. Ce rapprochement fait disparaître les plateaux continentaux, abritant un grand nombre d'espèces, aux niveaux de la collision

²⁵⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_Permien-Trias

²⁵⁸ Yadong Sun et al., Lethally Hot Temperatures During the Early Triassic Greenhouse, Science, 338, 366-370, 2012, <http://www.sciencemag.org/content/338/6105/366>

²⁵⁹ Stephen E. Grasby, Hamed Sanei et Benoit Beauchamp, « Catastrophic dispersion of coal fly ash into oceans during the latest Permian extinction », Nature Geoscience, vol. 4, 23 janvier 2011, p. 104–107

²⁶⁰ Stephen Jay Gould, Darwin et les grandes énigmes de la vie, éd. Points, coll. Sciences, 1997, p. 143-148

formant la chaîne hercynienne ; puis, le passage de plusieurs continents à un seul, s'il conserve la surface totale de terres émergées, diminue la longueur totale des côtes. Les zones côtières soumises à un climat océanique sont donc plus restreintes et les zones continentales sont plus vastes et soumises à un climat aride permanent.

Il y a 265 Ma une diminution de l'activité tectonique caractérisée par l'affaissement de la dorsale médio-océanique a pour conséquence une régression marine. Les hauts-fonds des plateaux continentaux tendent à disparaître; la surface disponible habitable s'amenuise encore plus.

Activités volcaniques localisées

On note à environ - 258 Ma une intense activité volcanique continentale (trapps d'Emeishan (Chine), puis à environ - 251 Ma les trapps de Sibérie, contemporains de l'extinction. Il s'agit d'une activité très importante des dorsales océaniques de l'océan Téthys, produisant un volume considérable de laves basaltiques à l'origine d'une transgression (envahissement des continents par la mer²⁶¹) affectant les côtes de la Pangée, sur une dizaine de millions d'années.

Anoxie²⁶² localisée

Une théorie complémentaire concerne la variation du niveau de la chimiocline²⁶³. Celle-ci atteignant la surface suite au réchauffement global de la planète, lui-même induit par l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone d'origine volcanique, permet la libération dans l'atmosphère d'une grande quantité de sulfure d'hydrogène, toxique pour la plupart des organismes. En outre, le sulfure d'hydrogène libéré peut détruire la couche d'ozone, ce qui a également des conséquences délétères pour la plupart des espèces terrestres ou littorales non protégées par une épaisseur d'eau suffisante. Les biomarqueurs des sédiments montrent que les bactéries consommatrices de sulfure d'hydrogène ont proliféré dans tous les océans de la fin du Permien.

Météorite

Une météorite serait tombée dans l'hémisphère sud et les ondes sismiques auraient ouvert les trapps de Sibérie aux antipodes. Luann Becker pense que l'astéroïde faisait 11 km de diamètre et se serait écrasée à Bedout, au large de la côte nord-ouest de l'Australie, où l'on trouve un cratère de 170 km de diamètre²⁶⁴. En revanche, Ralph von Freese pense que la météorite faisait 45 km de diamètre et se serait écrasée en Antarctique où l'on trouve un cratère de 480 km de diamètre²⁶⁵. Cette hypothèse est contestée par de nombreux scientifiques qui font remarquer que l'extinction a été progressive et non due à un événement brutal.

²⁶¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Transgression_marine

²⁶² En écologie scientifique, l'anoxie est une diminution de l'oxygène dissous ou présent et biodisponible dans le milieu (http://fr.wikipedia.org/wiki/Anoxie_%28eau%29).

²⁶³ La chimiocline est l'interface existant entre différentes couches d'eau, dans une mer, un lac, lorsque celles-ci ne se mélangent pas. L'anoxie des couches inférieures peut être provoquée par la production importante de sulfure d'hydrogène par des micro-organismes benthiques (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Chimiocline>).

²⁶⁴ http://www.nasa.gov/home/hqnews/2004/may/HQ_04159_australian_coast.html

²⁶⁵ <http://researchnews.osu.edu/archive/erthboom.htm>

6. Les autres extinctions massives

*Extinction du Cambrien*²⁶⁶

L'extinction du Cambrien date d'environ 480 millions d'années, c'est la première des extinctions majeures des espèces macroscopiques (environ 85 % des espèces). Les causes extra terrestres (impacts météoritiques) ne sont pas prouvées. Par contre on peut incriminer un grand refroidissement global et des variations du niveau marin. Le supercontinent Gondwana, alors placé au pôle Sud, porte une immense calotte glaciaire (*inlandsis*). Cette glaciation qui mobilisa d'énormes quantités d'eau, a fait baisser le niveau des mers ; ce qui entraîne un ralentissement de la circulation océanique et établit des conditions de faible teneur en oxygène, ce qui peut expliquer des conditions de vie plus difficiles.

*Extinction de l'Ordovicien-Silurien*²⁶⁷

L'extinction de l'Ordovicien-Silurien est la disparition d'une proportion significative des espèces animales et végétales présentes sur la Terre, il y a environ 440 Ma. À cette époque, deux extinctions massives se produisent, peut-être suite à une grande glaciation qui aurait entraîné des désordres climatiques et écologiques rendant difficile l'adaptation des espèces et écosystèmes au recul de la mer sur des centaines de kilomètres, puis à son retour en fin de phase glaciaire.

Une théorie propose que la Terre ait été frappée par une énorme bouffée de rayons gamma issue de l'explosion d'une étoile. Cette irradiation aurait alors provoqué des changements dans l'atmosphère, entraînant une dégradation de la couche d'ozone et un assombrissement global de forte ampleur, cause de la glaciation²⁶⁸. Cette théorie ne fait cependant pas l'unanimité dans la communauté scientifique.

*Extinction du Dévonien*²⁶⁹

L'extinction du Dévonien est l'une des grandes destructions d'espèces animales et végétales de l'histoire de la vie sur Terre. Elle se situe entre -380 et -365 Ma, sur 6 événements biologiques, et porte sur environ 75 % des espèces (benthos, récifs, brachiopodes) et ne concerne que peu les plantes et arthropodes continentaux.

La fermeture de la *Paléotéthys* (une aire océanique ouverte au nord du Gondwana) modifie la circulation atmosphérique et le climat se réchauffe. L'élévation du niveau des mers amène des eaux peu oxygénées sur les plateaux continentaux. Une flore et une faune y prolifèrent, favorisées par un afflux de nutriments continentaux. Cependant, le climat se refroidit de nouveau et les faunes adaptées à ces eaux chaudes disparaissent.

On constate aussi l'existence de cratères d'impacts datant de cette époque; ce facteur de bouleversement paraît cependant secondaire. Cependant, une extinction de masse remontant à -360 Ma est imputée à une série d'impacts météoritiques, dont le cratère du East Warburton Basin près de Melbourne en Australie²⁷⁰.

²⁶⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_du_Cambrien

²⁶⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_de_l%27Ordovicien-Silurien

²⁶⁸ <http://news.nationalgeographic.com/news/2009/04/090403-gamma-ray-extinction.html>

²⁶⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_du_D%C3%A9vonien

²⁷⁰ <http://www.telegraph.co.uk/science/space/9883335/One-of-biggest-ever-asteroid-impact-zones-found-in-Australia.html>

*Extinction du Trias-Jurassique*²⁷¹

L'extinction du Jurassique s'est produite à la fin du Trias, il y a environ 200 Ma. Près de 20 % des espèces marines, les *Crurotarsi*²⁷² (clade d'*Archosauria*²⁷³) les plus importants, une grande partie des *Therapsida*²⁷⁴ et les gros amphibiens ont disparu. La diversité biologique a été diminuée de moitié.

Cette extinction s'est produite à peu près au moment où la Pangée s'est fracturée. On n'en connaît pas la cause mais elle peut être due à la conjugaison :

- d'un changement climatique graduel ou de fluctuations du niveau de la mer, mais ceci n'explique pas les disparitions marines ;
- d'un ou plusieurs impacts d'astéroïdes, mais aucun grand cratère d'impact ne coïncide pour cette période ;
- à une éruption volcanique qui aurait entraîné un réchauffement climatique global, l'ouverture de la province magmatique centre atlantique semble être une des causes les plus plausibles²⁷⁵.

Cette extinction a permis l'explosion radiative des dinosaures en libérant des niches écologiques.

Analyse

Les trapps volcaniques semblent avoir joué un rôle essentiel dans les extinctions d'espèce. Couplés avec l'impact d'un astéroïde, ces trapps peuvent être responsable de l'extinction K-T.

Pour les événements récents il y a couplage entre des impacts, peut-être multiples, un hyper-volcanisme, une modification du climat et une régression marine.

Il est bien évident que plus on remonte dans le temps plus il est difficile de pouvoir identifier des impacts catastrophiques.

Afin de mieux cerner les risques de tels événements, nous allons examiner de plus près ce qu'on sait aujourd'hui du bombardement de la Terre.

8. Modèles d'évolution avec extinctions massives²⁷⁶

Approche darwinienne

Les modèles d'extinction sont bien sûr liés aux théories de l'évolution. Par ailleurs, nous avons cité Buffon et Lamarck pour l'émergence du concept d'extinction. Charles Lyell a introduit en 1832 l'idée que les espèces qui apparaissent avaient un facteur d'adéquation au milieu (*fitness*) et qu'ils disparaissaient lorsque leur fitness devenait inférieur à celui d'autres

²⁷¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Extinction_du_Trias-Jurassique

²⁷² <http://fr.wikipedia.org/wiki/Crurotarsi>

²⁷³ Les archosauriens forment un clade regroupant les crocodiliens et les oiseaux, ainsi qu'un grand nombre de groupes disparus, comme les ptérosaures et les dinosaures non-aviaires (wikipedia).

²⁷⁴ Anciennement appelés reptiles mammaliens (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Therapsida>)

²⁷⁵ Jessica H. Whiteside et al., Compound-specific carbon isotopes from Earth's largest flood basalt eruptions directly linked to the end-Triassic mass extinction, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010

²⁷⁶ M.E.J. Newman, R.G.Palmer, Models of extinction, a review. Santa Fé Institute, 1999. <http://www.santafe.edu/media/workingpapers/99-08-061.pdf>

espèces. Charles Darwin a repris ce concept dans sa théorie. Mais dans ces travaux, la disparition des espèces est graduelle et non catastrophique. Le darwinisme ne peut être directement considéré comme une théorie pour les extinctions massives.

Pour aller plus loin, il faut introduire une hypothèse importante, liant les espèces entre elles, celle de la Reine Rouge.

*Hypothèse de la Reine rouge*²⁷⁷

C'est une hypothèse de la biologie évolutive proposée par Leigh Van Valen (1973), qui peut se résumer ainsi : *l'évolution permanente d'une espèce est nécessaire pour maintenir son aptitude suite aux évolutions des espèces avec lesquelles elle co-évolue*²⁷⁸.

Ainsi, elle postule que l'environnement d'un groupe concurrentiel d'organismes se modifierait en permanence, si bien que l'effort d'adaptation serait toujours à recommencer, et l'extinction toujours aussi probable.

Cette théorie privilégie les facteurs biotiques comme facteurs sélectifs au cours de l'évolution. Elle n'est néanmoins pas incompatible avec l'intervention de facteurs abiotiques, comme le climat et l'évolution géophysique, à une échelle de temps plus large, telle que par exemple postulée par la théorie des équilibres ponctués.

L'hypothèse de la reine rouge part de la constatation par Van Valen que la probabilité d'extinction d'un groupe d'êtres vivants est constante au cours des temps géologiques. Elle se base sur les courbes de survie, établies par Van Valen, d'une cinquantaine de groupes d'organismes vivants tels que des protistes, des plantes et des animaux.

Elle tire son nom d'un épisode fameux du livre de Lewis Carroll : De l'autre côté du miroir (deuxième volet, d'Alice au pays des merveilles) au cours duquel le personnage principal et la Reine Rouge se lancent dans une course effrénée. Alice demande alors : « *Mais, Reine Rouge, c'est étrange, nous courons vite et le paysage autour de nous ne change pas ?* » Et la reine répondit : « *Nous courons pour rester à la même place.* ».

Cette métaphore symbolise la course aux armements entre les espèces. Ainsi, si la sélection naturelle favorise les prédateurs les plus rapides, elle favorise aussi les proies les plus rapides, ce qui aurait pour résultat un rapport de forces inchangé entre les espèces mais des générations d'individus toujours plus rapides, donc des espèces pas plus « évoluées » vis-à-vis du rapport de forces. Le processus constitue donc, comme dans le conflit sexuel, une forme de co-évolution antagoniste. De ce fait, la théorie de la Reine rouge est également surnommée paradoxe de l'évolution.

Dans cette course, la reproduction sexuée est un avantage certain grâce à la constante recombinaison des allèles qu'elle permet.

*Modèle de Van Valen*²⁷⁹

Van Valen admet que la durée d'un genre est aléatoire, avec une constante indépendante de l'espèce. Cela conduit à une loi exponentielle. L'ajustement aux genres des mammifères est assez bon avec une constante de temps de 36 Ma. Mais cette loi n'est pas la même pour une autre famille.

²⁷⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Hypoth%C3%A8se_de_la_reine_rouge

²⁷⁸ Leigh van Valen, A new evolutionary law Evolutionary Theory, Vol. 1 (1973), pp. 1-30.

²⁷⁹ Van Valen, L. 1973. A new evolutionary law. Evol. Theory 1, 1-30.

Raup (1991, 1996) a généralisé ce modèle dans le cas où les extinctions ne sont pas stochastiquement constantes.

Le modèle NK ²⁸⁰

Kauffman (1993, 1995) avec différents collaborateurs a proposé tout un ensemble de modèles basés sur le paramètre d'adéquation (fitness). Leurs travaux suggèrent une relation entre la dynamique d'évolution résultante et le taux d'extinction.

Le modèle de Bak-Sneppen²⁸¹

Per Bak et Kim Sneppen ont simplifié le modèle de Kauffman et c'est le plus souvent ce modèle qui est exposé dans le cadre de l'évolution avec fitness. Ils l'ont proposé en 1993 dans Physical Review Letters.²⁸²

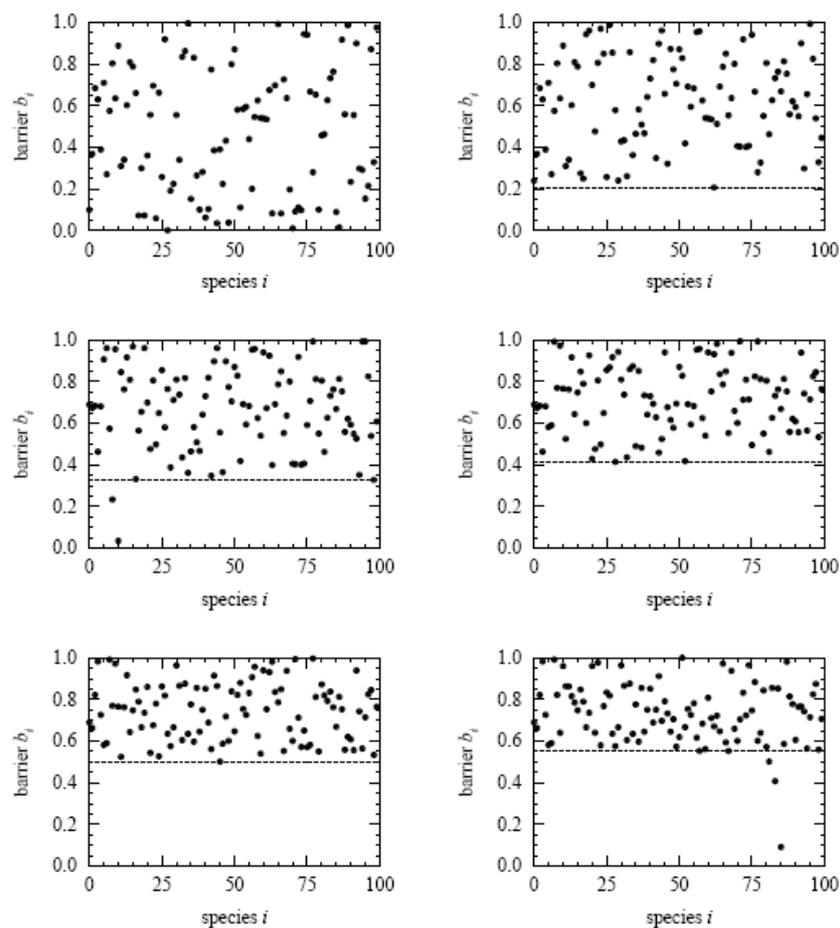


Figure 32 Évolution du paramètre f pour une simulation à 100 espèces, après 50, 100, 200, 400, 800 et 1600 pas de simulations. On voit parfaitement apparaître un seuil qui progressivement monte. Lorsqu'il atteint une valeur autour de seuil, une avalanche se produit.

²⁸⁰ Kauffman, S. A. 1993. *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press (Oxford).

²⁸¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Bak%E2%80%93Sneppen_model

²⁸² Bak, P. and Kim Sneppen (1993). "Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution". *Physical Review Letters* 71 (24): 4083–4086.

Dans ce modèle on considère une population de N genres alignés sur un anneau. Chaque genre n a un fitness $f(n)$, constant, compris entre 0 et 1. À chaque pas de temps t , le genre de plus faible f est éliminé, ainsi que ses deux voisins. À leur place, on insert des nouveaux genres avec un fitness tiré aléatoirement entre 0 et 1. Le processus évolue progressivement en élevant progressivement le niveau moyen des genres (Figure 32)²⁸³.

Lorsque le plus bas fitness est au dessus de 0,6, on voit expérimentalement l'apparition d'une avalanche : une partie notable des genres disparaissent (Figure 33)²⁸⁴. Ce renouvellement a été mis en parallèle avec les extinctions massives. Néanmoins, la statistique des intensités n'est pas conforme avec la statistique observée dans la disparition des espèces.

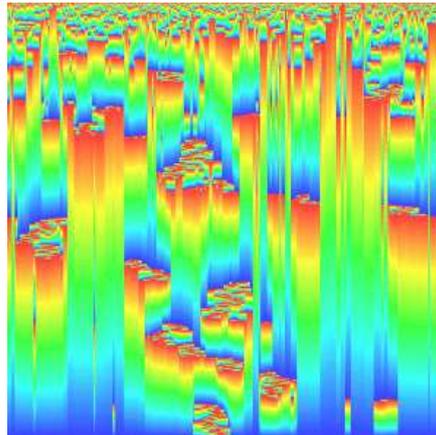


Figure 33 Evolution du modèle de Bak-Sneppen. En x les espèces, en y le temps. La couleur est relative à l'âge de l'espèce. On observe des époques pour lesquelles il va y avoir brutalement de nombreuses disparitions.

Autres modèles d'extinction

Le modèle de Bak-Sneppen a été développé avec introduction d'un forçage externe (Newman & Roberts 1995²⁸⁵). Les résultats dépendent bien sûr de la loi de forçage introduite. Des modèles explicitant les interactions entre espèces ont été développés. L'environnement a été également considéré. En 1999, Newman, dans une revue sur ce sujet, concluait sur l'insuffisance des signatures statistiques pour pouvoir distinguer entre les différents mécanismes.

²⁸³ Figure 18 de la référence 276.

²⁸⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bak_sneppen_model.png

²⁸⁵ Newman, M. E. J. & Roberts, B. W. 1995. Mass extinction: Evolution and the effects of external influences on unfit species. Proc. R. Soc. London B 260,31-37.

Chapitre 3: Le Bombardement de la Terre

1. Deux événements exceptionnels

Le Météorite de l'Oural

Dans la matinée du 15 Février 2013, les habitants de la ville de Tcheliabinsk, située dans l'Oural, ont été le témoin de la chute d'un météorite²⁸⁶. Plus d'un million de personnes de cette ville de près d'un million d'habitants a été victime de cet impact. En grande partie, en raison des bris de vitres et des projections d'objets dus au souffle associé au déplacement de cet objet dans l'atmosphère à des vitesses supersoniques.

Grâce à des documents vidéo obtenus essentiellement avec des téléphones portables et des caméras de surveillance on a pu, pour la première fois, avoir des informations significatives sur le déroulement d'une telle catastrophe.

L'analyse des données recueillies conduirait à l'impact d'un petit corps d'une dizaine de mètres. L'explosion aurait été d'une énergie de l'ordre de 30 fois celle de la bombe d'Hiroshima. Finalement le faible nombre relatif de victimes a été lié à la manière avec laquelle l'énergie s'est dissipée. L'objet s'est en partie décomposé dans la haute atmosphère. Les dégâts sont liés au souffle du déplacement et très peu à des impacts directs.

Quelques petits morceaux de l'objet ont été recueillis sur une zone très large. Le cœur du météorite semble reposé au fond d'un petit lac proche de la ville²⁸⁷. Il est bien évident que les futures analyses pourront permettre de mieux connaître la nature de l'objet et éventuellement son origine cosmique.

L'événement de la Toungouska

Le 30 Juin 1908 à 7h14 dans la région de la Toungouska en Sibérie, a eu lieu l'impact de plus important noté dans l'histoire humaine^{288 289}. Le bruit de cet événement a été entendu dans un rayon de l'ordre de 800 km ! La forêt a été détruite dans un rayon de 20 km (Figure 34²⁹⁰).

L'accès au pays des Toungouses est difficile. En raison aussi du premier conflit mondial et de la révolution russe, il a fallu attendre 1928 pour qu'une expédition soviétique s'y rende recueillir les témoignages de survivants et des données sur le terrain. Une seconde mission en 1948 a permis de préciser le scénario d'impact.

En fait on ne connaîtra jamais le nombre de victimes. Les témoignages sont très insuffisants. Aucun morceau du météorite n'a été recueilli, ce qui a conduit à des scénarios très fantaisistes, par exemple impliquant un vaisseau extra-terrestre.

²⁸⁶ <http://www.rfi.fr/europe/20130215-russie-oural-pluie-meteorites>

²⁸⁷ <http://lci.tf1.fr/science/nouvelles-technologies/meteorites-des-scientifiques-disent-avoir-retrouve-des-fragments-7833911.html>

²⁸⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89v%C3%A9nement_de_la_Toungouska

²⁸⁹ <http://www.astrosurf.com/luxorion/impacts-tunguska.htm>

²⁹⁰ <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tunguska-Map-fr.svg>

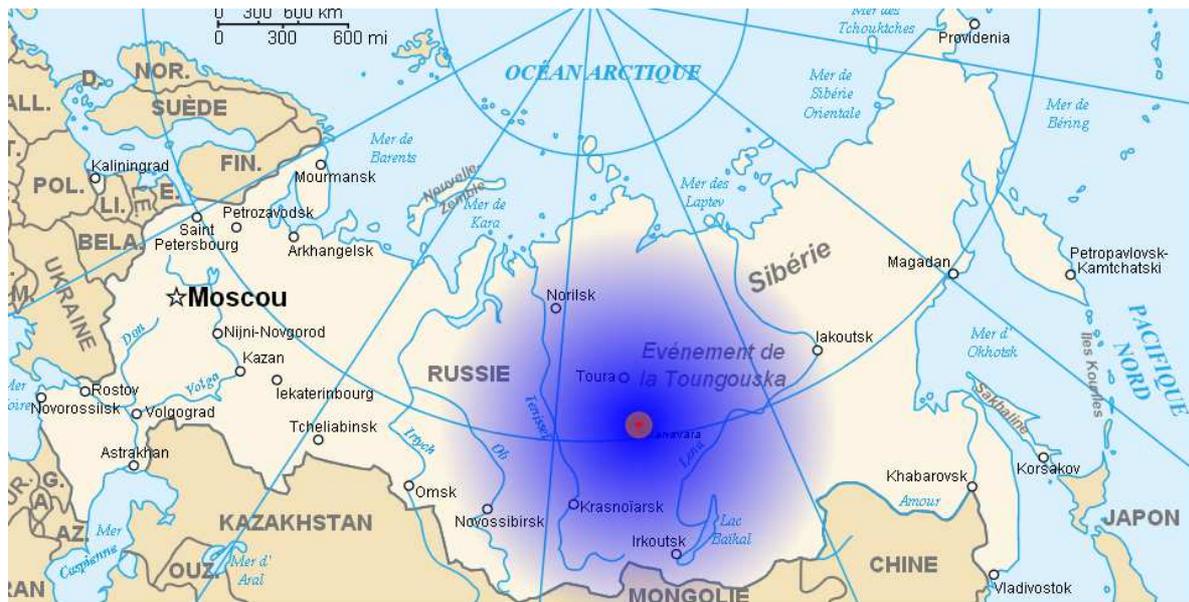


Figure 34 Zone de l'impact du météorite de 1908. En bleu la région pour laquelle le bruit a pu être entendu.

L'explosion correspondait à celle de plusieurs centaines de fois celle d'Hiroshima. La taille de l'objet pourrait être d'une cinquantaine de mètres.

L'astronome anglais Fred Whipple a émis l'hypothèse qu'il s'agissait d'un morceau de comètes. La sublimation de la glace en arrivant dans l'atmosphère aurait conduit à un souffle brisant les arbres sur une grande étendue.

On a proposé d'identifier l'impacteur à la Comète 97P/1906 V2 Metcalf/Brewington et à l'astéroïde 106538 (LINEAR 2000).

2. Les impacts connus^{291 292}

Identification

L'imagerie satellitaire a permis de faciliter la détection des cratères d'impact. Cette opération est délicate car il faut éviter de les confondre avec des cratères d'origine terrestre. Ces cratères peuvent aussi se trouver sous l'eau des océans ou sous une épaisse couche de glace en Antarctique. Il est de même très difficile de les identifier sous une jungle épaisse. Des méthodes numériques ont été mises au point pour une identification automatique des candidats cratères sur les images satellitaires. Plusieurs objets ont été ainsi identifiés.

Le Comité Consultatif sur les Météorites et les impacts de l'Agence Spatiale Canadienne tient à jour la liste des cratères considérés comme d'origine extra-terrestre, soit en 2010 172 cratères. En outre, 40 formations étaient en attente pour une confirmation (Figure 35).

On peut remarquer le nombre élevé d'impacts connus par rapport au nombre d'extinctions massives. Même si celles-ci pourraient être dues à des impacts de météorites, tous les impacts, et loin s'en faut, ne conduisent pas à des extinctions massives.

²⁹¹ <http://www.astrosurf.com/luxorion/impactlistecrateres2.htm>

²⁹² http://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_cosmique

Cela conforte l'idée que les scénarios d'extinction sont probablement plus complexes, pouvant associer plusieurs impacts - mais alors pourquoi une telle simultanéité - et être liés à d'autres causes géophysiques (hyper-volcanisme, modification du climat), écologiques ou inconnues à ce jour.

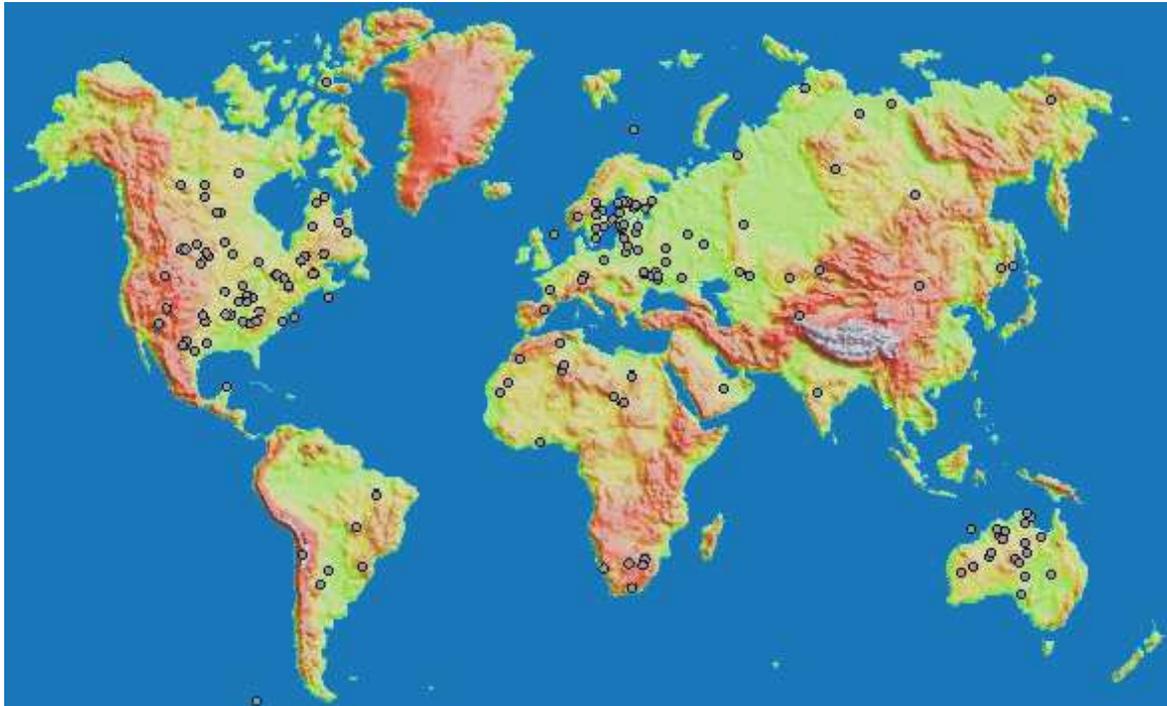


Figure 35 Répartition des impacts connus en 2010

*La statistique des impacts*²⁹³

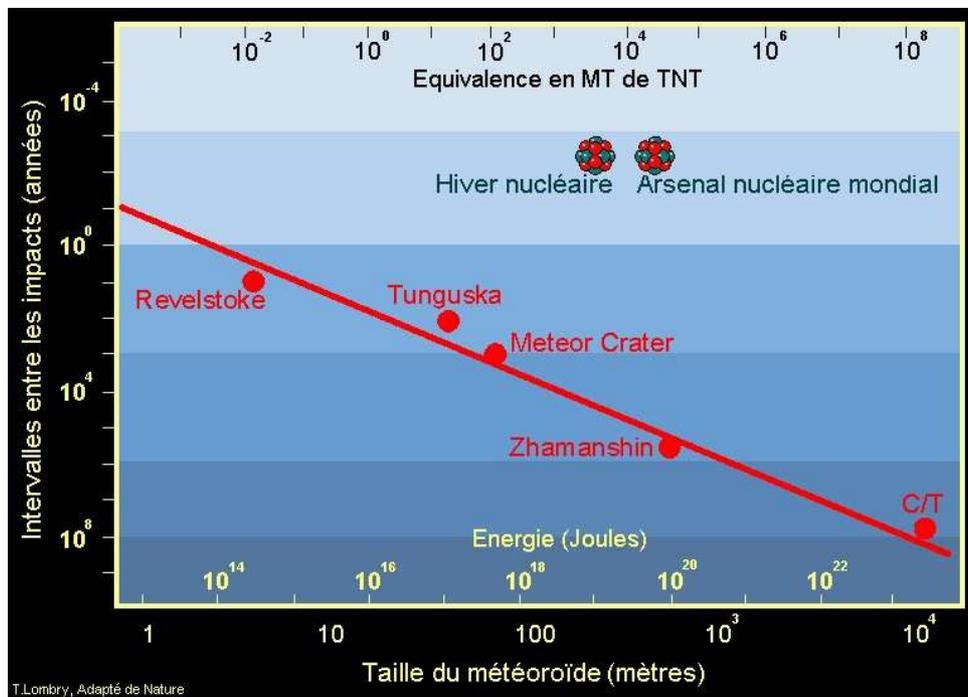


Figure 36 Statistique des impacts.

²⁹³ <http://www.astrosurf.com/luxorion/impacts4.htm>

Sur la Figure 36 la statistique moyenne de l'intervalle entre deux impacts est tracée en fonction de la taille du météorite, en échelle logarithmique. La loi observée semble linéaire. Autrement dit, l'intervalle entre deux événements croît en loi de puissance avec la taille, l'exposant étant autour de 2.

Ces lois est à mettre en relation avec un processus en cascade. Si un objet de 10 m se fragmente en 1000 morceaux de 1m, l'intervalle de temps est réduit d'un facteur mille. On aurait donc un exposant de 3. L'exposant 2 peut être déduit d'une fragmentation en morceaux de différente taille.

Risques liés à la chute de météorites

Entre 1954 et 2012 les médias n'avaient reporté que l'existence de deux blessés par la chute de météorites entre ces deux dates. L'événement du 13 Février 2013 a bouleversé cette statistique avec plus d'un millier de blessés à Tcheliabinsk.

Taille	0,1 – 10 m	50 m	100 m	500 m	1 km	10 km
Fréquence	200 / an	1 / 100 ans	1/ 1000 ans	1/100 000ans	1/300000ans	1/10 ⁸ ans
Effet	Brûlent dans l'atmosphère Dommages à des voitures ou à des toitures Accidents mortels rares	Cataclysme local Pertes humaines équivalentes à une inondation ou à un séisme	Destruction d'une ville Si impact océanique : vague de 35m et raz-de-marée	Peut rayer de la carte un état de taille moyenne Grands tsunamis si impact maritime	Disparition d'espèces 100 millions de morts	Cataclysme planétaire Extinction de masse

Ceci est conforme aux études publiées comme celle de Chapman et Morrison (Nature, 1994). Pour eux le risque de mortalité lié à la chute d'un météorite est supérieur à celui d'un Américain de décéder à la suite d'un attentat²⁹⁴.

Il s'agit donc d'événements très rares, mais pouvant être d'un danger extrême, concernant des très grandes régions, si ce n'est la planète entière. Ce rapport a conduit le congrès américain à financer le projet Spaceguard avec pour but :

- D'identifier les objets dangereux ;
- De déterminer leur orbite précise avec une extrême précision ;
- De développer une stratégie de destruction ou de protection.

Dans le prochain chapitre nous allons examiner l'état de nos connaissances en matière d'objets pouvant impacter la Terre.

²⁹⁴ Clark R. Chapman & David Morrison, « Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard », Nature, vol. 367, 6 Janvier 1994, p. 33-40

3. Les Géocroiseurs^{295 296}

Historique

Dans la nuit du 13 Août 1898, l'astronome allemand Gustav Witt à Berlin a découvert (433) Eros, conjointement avec Auguste Charlois à l'Observatoire de Nice²⁹⁷. C'était le premier des astéroïdes pouvant être très proche de la Terre. De ce fait, plusieurs campagnes de suivi ont été entreprises pour avoir une orbite précise. Il a été aussi l'objet d'une mission spatiale (NEAR-Shoemaker) avec un survol en 1998, puis par un survol orbital en 2000 et finalement un atterrissage en Février 2001. Ses dimensions sont presque cylindriques, avec 34,4 km de long et 11,2 km de diamètre, avec une forme tourmentée et de nombreux cratères.

Le 23 Octobre 1924 Walter Baade découvrait (1036) Ganymède, le plus gros des astéroïdes proches de la Terre avec une taille à peu près sphérique de 31,7 km de diamètre²⁹⁸.

(1566) Icare, détecté également par Walter Baade le 27 Juin 1949, est le premier vrai géocroiseur identifié²⁹⁹.

(1862) Apollon avait été découvert le 24 Avril 1932 par Karl Wilhem Rienmuth mais on avait perdu sa trace jusqu'en 1973.³⁰⁰ De petite taille, c'est le premier objet reconnu comme traversant l'orbite terrestre. Il possède un satellite d'environ 80 m. Son orbite croise aussi celle de Vénus et de Mars.

Au cours de la seconde moitié du 20^e siècle on a pris conscience d'une part que le nombre d'astéroïdes pouvant croiser l'orbite terrestre devait être très élevé et que, d'autre part, leur impact pouvait être catastrophique pour la survie de l'espèce humaine.

De nombreux programmes ont été mis en œuvre pour détecter et identifier ces objets

Identification

La NASA a mis sur pied en 1998 le programme Spaceguard de détection des astéroïdes géocroiseurs (dont l'orbite coupe celle de la Terre) ayant un diamètre supérieur à 1 km³⁰¹. Cette dimension a été retenue car l'impact d'un tel astéroïde pourrait amener l'extinction de l'humanité. On estime qu'il existe moins de 1 200 astéroïdes dans cette catégorie. Un objet de ce type frappe la Terre environ tous les 500 000 ans. Fin 2008, près de 90 % des objets de cette dimension aurait été recensés. Ces dernières années plusieurs programmes de détection de la NASA³⁰² (LINEAR³⁰³, NEAT³⁰⁴, Spacewatch³⁰⁵, LONEOS³⁰⁶, Catalina Sky Survey³⁰⁷,

²⁹⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Ast%C3%A9ro%C3%AFde_g%C3%A9ocroiseur

²⁹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Near-Earth_object#Near-Earth_asteroids

²⁹⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/433_Eros

²⁹⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/1036_Ganymed

²⁹⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/1566_Icarus

³⁰⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/%281862%29_Apollon

³⁰¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Spaceguard>

³⁰² neo.jpl.nasa.gov/programs/

³⁰³ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/linear.html>

³⁰⁴ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/neat.html>

³⁰⁵ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/spacewatch.html>

³⁰⁶ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/loneos.html>

ADAS³⁰⁸) ou d'autres pays (CINEOS³⁰⁹,...) ont été mis sur pied pour identifier les objets de plus petite taille. Ces programmes utilisent des télescopes dédiés à cette tâche et basés sur Terre. Le programme NEOWISE³¹⁰ exploite les capacités du télescope spatial infrarouge WISE pour identifier une sous-catégorie des astéroïdes géocroiseurs baptisée PHA³¹¹ (Potentially hazardous asteroid) définis comme ceux dont l'orbite coupe celle de la Terre à moins de 8 millions de km de celle-ci. Les résultats de cette étude, achevée en 2012, permettent d'estimer qu'il existe environ 4 000 à 5 000 astéroïdes de ce type ayant une taille comprise entre 100 mètres et un kilomètre dont 20 à 30 % sont aujourd'hui identifiés. Il existe par ailleurs un demi million d'astéroïdes géocroiseurs d'une taille comprise entre 50 et 100 mètres. Un de ces objets frappe la Terre statistiquement tous les mille ans (un astéroïde de moins de 50 mètres tous les 100 ans). Début 2013 seule une faible fraction de ces objets a été détectée.

*LINEAR*³¹²

Le projet Lincoln Near-Earth Asteroid Research est réalisé entre l'US Air-Force, la NASA et le laboratoire Lincoln du MIT. Démarré à la fin des années 1970, il ne devient réellement opérationnel qu'en Mars 1998. Aujourd'hui, le projet utilise 2 télescopes de 1 m et une caméra de suivi sur un télescope de 50 cm. 20% du ciel est exploré ainsi chaque nuit près de Socorro dans le Nouveau Mexique.

Au 15 Septembre 2011 LINEAR a détecté 231 082 nouveaux objets, dont au moins 2 423 géocroiseurs et 279 comètes. 136 367 astéroïdes détectés sont numérotés au 30 Janvier 2013.

*Spacewatch*³¹³

C'est le nom d'un groupe du Laboratoire lunaire et planétaire de l'Université d'Arizona fondé par Tom Gehrels et Robert S. McMillan en 1980. Ce groupe observe avec le télescope de 0,9 m et de 1,8 m situés à Kitt-Peak avec des caméras faites de mosaïques de CCD.

Spacewatch a découvert un satellite naturel de Jupiter, maintenant appelé Callirrhoe, qui à l'origine était considéré comme un astéroïde. D'autres découvertes notables incluent Pholus, Varuna, 1998 KY26, (35396) 1997 XF11 et (48639) 1995 TL8. Le projet a également retrouvé Albert, un astéroïde perdu depuis longtemps. Il a aussi découvert la comète périodique 125P/Spacewatch. Il est au 2^e rang des découvreurs d'astéroïdes, avec 71112 astéroïdes numérotés (30 Janvier 2013).

Ce projet est à l'origine de la découverte du corps le plus lointain du système solaire : la comète C/1992 J1.

*NEAT*³¹⁴

³⁰⁷ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/catalina.html>

³⁰⁸ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/adas.html>

³⁰⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Campo_Imperatore_Near-Earth_Object_Survey

³¹⁰ <http://neo.jpl.nasa.gov/programs/neowise.html>

³¹¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Potentially_hazardous_object

³¹² http://en.wikipedia.org/wiki/Lincoln_Near-Earth_Asteroid_Research

³¹³ <http://spacewatch.lpl.arizona.edu/>

³¹⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Near-Earth_Asteroid_Tracking

Near Earth Asteroid Tracking (NEAT) était un programme dirigé par la NASA et le Jet Propulsion Laboratory pour découvrir des objets géocroiseurs. Le système NEAT a commencé ses observations en décembre 1995 pour s'achever en avril 2007. Le principal chercheur était Eleanor Helin, avec les co-chercheurs Steven H. Pravdo et David Rabinowitz.

NEAT avait un accord de coopération avec l'US Air Force pour utiliser les télescopes GEODSS (Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance) situés sur le volcan Haleakalā, dans l'île de Maui à Hawaï. Les télescopes à grand champ de l'US Air Force ont été conçus pour observer optiquement les engins spatiaux en orbite. L'équipe NEAT a conçu une caméra CCD et un système informatique pour le télescope GEODSS. Le format de la caméra CCD est de 4096×4096 pixels et le champ visuel est de $1,2^\circ \times 1,6^\circ$.

À partir d'avril 2001, le télescope de Schmidt de 1,2 m d'ouverture de l'observatoire du Mont Palomar a aussi été utilisé pour découvrir et suivre les objets géocroiseurs. Ce télescope est équipé d'une caméra constituée de 112 capteurs CCD de 600×2400 pixels. C'est le télescope qui a produit les images ayant permis la découverte de (50000) Quaoar en 2002 et de (90377) Sedna en 2003 et de la fameuse X^e planète (136199) Éris.

NEAT est au 3^e rang des découvreurs d'astéroïdes, avec 35 660 astéroïdes numérotés (30 Janvier 2013). En plus de découvrir des milliers d'astéroïdes, NEAT a aussi co-découvert (redécouvert) la comète périodique 54P/de Vico-Swift-NEAT et l'étoile de Teegarden ayant un mouvement propre élevé. Un astéroïde a été nommé en son honneur, (64070) NEAT, début 2005.

LONEOS³¹⁵

Lowell Observatory Near-Earth-Object Search (LONEOS) était un programme dirigé par la NASA et l'observatoire Lowell pour découvrir des objets géocroiseurs. Le système LONEOS a commencé les observations en décembre 1997 et s'est achevé en fin février 2008. Le principal chercheur était Ted Bowell.

LONEOS utilise un système avec une chambre de Schmidt ayant un miroir primaire de 0,6 m d'ouverture qui donne une vue à grand champ couvrant 3° du ciel. Il a un taux de balayage d'environ 1 000 degrés carré par nuit (la caméra peut couvrir l'intégralité du ciel visible en environ un mois). Le CCD a détecté des astéroïdes ayant une magnitude apparente allant jusqu'à 19,8.

Le travail d'utilisation de la caméra et de recherche est principalement effectué par des ordinateurs et des logiciels spécifiques. LONEOS a découvert des milliers d'astéroïdes et les comètes périodiques 150P/LONEOS, 159P/LONEOS et 182P/LONEOS. Il est au 4^e rang des découvreurs d'astéroïdes, avec 19 148 astéroïdes numérotés (30 Janvier 2013).

Autres relevés

Le relevé du Mont-Lemmon, station de l'observatoire Steward avec 19108 découvertes au 30 Janvier 2013 est au cinquième rang.

Le Catalina Sky Survey, prenant son nom du massif montagneux où est situé le télescope, les montagnes Santa Catalina près de Tucson dans l'Arizona, est un projet pour découvrir des comètes et astéroïdes, et pour rechercher des objets géocroiseurs. L'équipe du CSS est dirigée par Steve Larson du laboratoire lunaire et planétaire de l'université d'Arizona. Ce projet possède un homologue dans l'hémisphère sud en Australie : le Siding Spring Survey. Il est au 6^e rang des découvreurs d'astéroïdes, avec 16 317 astéroïdes numérotés (30 Février 2013).

³¹⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Lowell_Observatory_Near-Earth-Object_Search

Le 7^e rang dans le nombre de découvertes est occupé par l'équipe américaine C. J. van Houten, I. van Houten-Groeneveld, T. Gehrels, avec 4556 découvertes sur des plaques photographiques.

On peut noter que la totalité de ces relevés sont américains. Depuis le remplacement des plaques photographiques par des détecteurs à transfert de charge (CCD), les autres pays n'ont contribué que de manière marginale à la détection des astéroïdes. Il est bien évident que le projet Spaceguard a joué un rôle essentiel dans les investissements américains dans ces détections.

4. Inventaire des géocroiseurs

Les différentes classes³¹⁶

Les géocroiseurs ont été classés en fonction de leur grand axe (a), et de leurs distances au Soleil au périhélie (q) et à l'aphélie (Q).

- Les Atiras (ou Apohele) ont une orbite strictement à l'intérieur de celle de la Terre. Pour cela il faut que leur distance à l'aphélie soit plus petite que celle de la Terre au périhélie, soit 0,983 UA.
- Les Atens ont un grand axe plus petit que celui de la Terre, mais leur distance à l'aphélie est plus grande que 0,983 UA. Ils peuvent croiser l'orbite terrestre.
- Les Apollos ont un grand axe plus grand qu'une UA, mais leur distance au périhélie est plus petit que 1,017 UA, distance aphélique de la Terre.
- Les Amors ont une orbite qui est extérieure à celle de la Terre, avec une distance périhélique inférieure à 1.3 UA. Ce ne sont pas des géocroiseurs au sens strict, mais ce sont des objets potentiellement dangereux car une petite perturbation gravitationnelle peut dévier leur trajectoire et les transformer en objet du groupe Apoll.

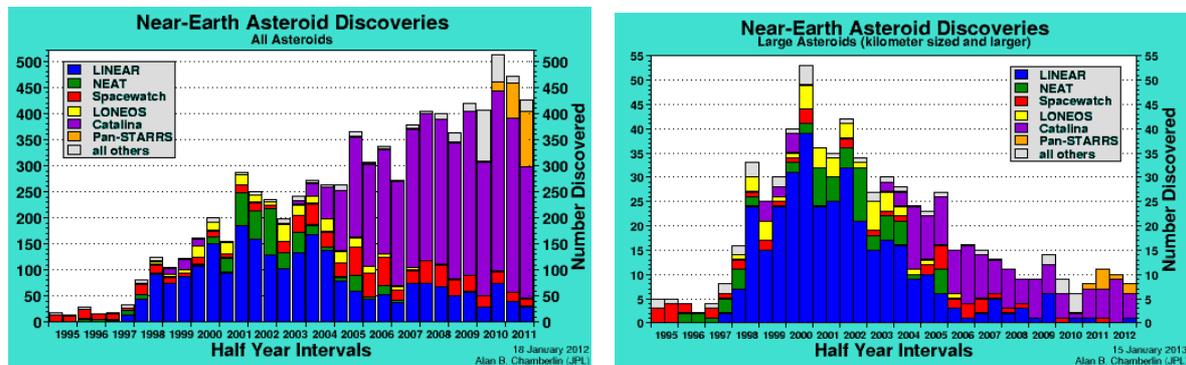


Figure 37 A gauche statistique de détection de tous les géocroiseurs, à droite statistique limitée aux objets de plus d'un kilomètre.

On a aussi identifié 93 géocroiseurs du type comète (Février 2013). On a émis l'hypothèse que des fragments de comètes ont impactés la Terre. Ce peut être le cas pour l'événement de la Toungouska, qui aurait pu être engendré par un morceau de la comète d'Encke.

³¹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Near-Earth_object

Statistiques³¹⁷

En Février 2013, 9 683 géocroiseurs ont été identifiés. Parmi eux il y a 751 Atens, 3613 Amors et 5214 Apollos. 1 360 géocroiseurs sont considérés comme des objets potentiellement dangereux (potentially hazardous asteroids PHA). 155 PHA ont une dimension probable supérieure à 1 km.

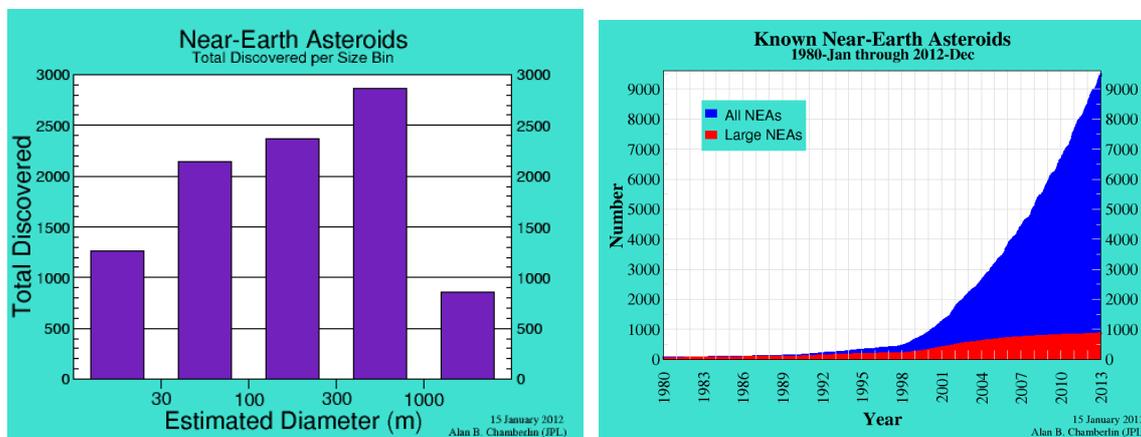


Figure 38 À gauche, statistique des géocroiseurs en fonction de la taille; à droite nombre cumulé de géocroiseurs selon la taille.

Sur Figure 37 nous avons la statistique de détection des géocroiseurs en fonction du temps, avec à gauche tous les objets et à droite la statistique limitée aux objets de plus d'un kilomètre. On voit immédiatement qu'alors on détecte sans cesse des géocroiseurs, la détection des grands objets semble stagner, parce qu'une grande partie des objets a été identifiée. Ceci est conforme au tracé de droite de la Figure 38. Alors que le nombre total d'objet croît linéairement depuis 1998, époque de mise en œuvre des relevés CCD, la courbe rouge, correspondant aux grands objets semble avoir atteint son asymptote.

Suivi des géocroiseurs

Ce sont surtout les PHA que l'on cherche à recenser d'une manière quasi exhaustive afin de les détruire ou les détourner en cas de risque d'impact avec la Terre. Il existe deux systèmes automatisés destinés à la surveillance, Sentry à Pasadena aux États-Unis et NEODyS à Pise en Italie³¹⁸.

5. Quelques objets

Toutatis³¹⁹

(4179) Toutatis (Figure 39³²⁰) est un astéroïde géocroiseur de type Apollo découvert par Christian Pollas le 4 janvier 1989 sur une plaque photographique prise par Alain Maury et Derral Mulholland avec le télescope de Schmidt du Centre de recherches en géodynamique et

³¹⁷ <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>

³¹⁸ <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>

³¹⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/%284179%29_Toutatis

³²⁰ <http://levillagedessourds.fr-bb.com/t459-l-asteroide-toutatis-arrive>

astrométrie (C.E.R.G.A.). L'astéroïde a été, tout d'abord numéroté 1989AC, puis il fut nommé en référence au dieu des Gaulois suite à sa numérotation (4179) par le Minor Planet Center.

Son orbite excentrique de quatre ans s'étend à l'intérieur de l'orbite de la Terre jusqu'à la ceinture principale d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. L'inclinaison de l'orbite de Toutatis est très faible (il n'y a qu'une cinquantaine d'astéroïdes géocroiseurs qui ont une orbite moins inclinée).



Figure 39 Image du géocroiseur Toutatis.

Dans le dernier quart de siècle, il s'est approché de la Terre le 8 décembre 1992 à une distance de 3,6 millions de kilomètres (Gm), puis le 29 septembre 2004 à 1,5 Gm et enfin le 9 novembre 2008 à 7,5 Gm (0,0503 UA pour être précis). Sa dernière approche en date avec notre planète a eu lieu le 12 décembre 2012 à une distance minimale de 7 Gm, une distance qui ne posait aucun risque d'impact avec notre planète. La prochaine approche entre l'astéroïde et notre planète devrait avoir lieu entre le 25 et le 28 décembre 2016, mais cette fois-ci à une distance d'environ 30 Gm (0,207 UA). Sa prochaine plus proche approche aura lieu le 5 novembre 2069, à une distance de 0,019 848 6 UA (2 969 310 km).

Une conséquence de ces fréquentes approches de l'astéroïde à la Terre est qu'il subit les perturbations gravitationnelles de celle-ci. Ainsi on ne peut prédire avec exactitude sa trajectoire pour plusieurs siècles à venir.

*Apophis*³²¹

(99942) Apophis (anciennement 2004 MN4) est un astéroïde géocroiseur qui fut découvert le 19 juin 2004. Mesurant environ 325 mètres de diamètre, constitué de fer et d'une masse d'environ 47 millions de tonnes, il suit une orbite proche de celle de la Terre qu'il croise deux fois à chacune de ses révolutions.

Les premières observations de l'astéroïde tendaient à donner une probabilité non négligeable d'une collision avec la Terre le vendredi 13 avril 2029. L'astéroïde avait alors été classé au niveau 4 sur l'échelle de Turin, ce qui fut un cas unique. Cependant, de nouvelles observations ont précisé davantage sa trajectoire et ont écarté la possibilité d'une collision avec la Terre ou la Lune pour 2029. En effet, l'astéroïde doit alors passer à environ 30 000 km de cette première.

Fin juin 2006, la NASA a évalué la probabilité de collision entre cet astéroïde et la Terre au cours des 100 années suivantes à approximativement 1/45 000, la date de collision la moins

³²¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/%2899942%29_Apophis

improbable se situant en 2036, également aux alentours du 13 avril. En octobre 2009, la NASA a publié un communiqué dans lequel elle affirme qu'après avoir affiné ses calculs, elle n'évalue plus cette probabilité qu'à environ 1/250 000. Le 10 janvier 2013, après le passage d'Apophis près de la Terre le 9 janvier, les scientifiques de la NASA ont évalué, d'après des observations radars, que l'astéroïde n'entrera pas en collision avec la Terre en 2036.

L'astéroïde n'est plus classé qu'au niveau 0 sur l'échelle de Turin.

*1950 DA*³²²

Aujourd'hui (Février 2013), (29075) 1950 DA est l'objet géocroiseur qui possède la plus forte probabilité connue d'impact avec la Terre, selon l'échelle de Palerme. 1950 DA fut découvert la première fois le 22 février 1950 par Carl A. Wirtanen à l'observatoire Lick. Il fut observé pendant 17 jours puis perdu pendant un demi-siècle. Un objet découvert le 31 décembre 2000 (désigné provisoirement 2000 YK66) fut reconnu comme étant 1950 DA. L'astéroïde a reçu le numéro 29075 mais ne porte pas de nom. Wirtanen avait les droits de nommage en tant que premier découvreur. À sa mort, ces droits sont revenus à l'UAI, qui pourra éventuellement lui assigner un nom dans le futur.

*2002 NT7*³²³

(89959) 2002 NT7 est un astéroïde Apollo, qui peu de temps après sa découverte en 2002 a été présenté par les médias comme candidat à entrer en collision avec la Terre le 1er février 2019. Les calculs ultérieurs ont invalidé cette première hypothèse.

*VK184*³²⁴

2007 VK184 est un objet géocroiseur de type astéroïde Apollon découvert le 12 novembre 2007 par le Catalina Sky Survey. En octobre 2011 c'était, avec 2011 AG5, un des deux seuls objets classés au-dessus du niveau 0 de l'échelle de Turin, qui mesure le risque d'un impact avec la Terre, pour les 100 prochaines années. Il avait alors le niveau 1 sur cette échelle. En janvier 2013, c'est le seul à être classé au niveau 1, 2011 AG5 ayant été rétrogradé au niveau 0 le 21 décembre 2012, suite à de nouvelles observations.

Selon la liste Near Earth Object, 99 observations faites sur 52 jours indiquent que l'astéroïde a une probabilité égale à 1 risque sur 2 700 de percuter la Terre le 3 juin 2048. Ces chiffres équivalent à 0,037 % de risque d'impact (ou 99,963 % de non impact). L'astéroïde a un diamètre estimé à 130 mètres et voyage à travers l'espace à une vitesse relative par rapport à la Terre de 15,63 km/s.

Les astéroïdes classés au-dessus du niveau 1 sur l'échelle de Turin sont rares et sont, selon NEO, souvent rétrogradés au niveau 0 après les premières observations.

*2008 TC3*³²⁵

2008 TC3 est un astéroïde géocroiseur de deux à cinq mètres de diamètre ayant heurté la Terre le 7 octobre 2008 à 2 h 46 UTC. Il a la particularité d'être le premier astéroïde détecté et suivi dans l'espace avant sa chute sur Terre. Il fut découvert environ deux jours avant son

³²² http://fr.wikipedia.org/wiki/%2829075%29_1950_DA

³²³ http://fr.wikipedia.org/wiki/%2889959%29_2002_NT7

³²⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/2007_VK184

³²⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/2008_TC3

impact par Richard Kowalski du Mount Lemmon Observatory faisant partie du Catalina Sky Survey. Les seuls indices de l'impact, à la frontière du Soudan et de l'Égypte, sont un écho d'infrason obtenu par un réseau d'écoute au Kenya, et un flash observé par l'équipage d'un avion de ligne de la compagnie KLM préalablement prévenu de l'imminence du passage de l'aérolithe. Il se serait vaporisé dans l'atmosphère dans une explosion équivalente à 1 ou 2 kilotonnes de TNT. Seuls quelques débris auraient atteint le sol, et 280 fragments de la météorite ont pu être récoltés.

Peter Jenniskens de l'institut SETI de Mountain View en Californie et Muawia Hamid Shaddad, astronome à l'université de Khartoum au Soudan, qui avait récolté des photographies de l'astéroïde prises par des personnes de la région, ont mis sur pied une expédition en vue de retrouver des débris de l'astéroïde. Ils parviennent à leur but, les débris de l'astéroïde étant noir se confondant à même le sol sableux du désert au nord du Soudan non loin de la frontière égyptienne. Les morceaux recueillis de 2008 TC3 révèlent que la météorite était composée d'urélite, un minéral très poreux et fragile, très rare parmi les météorites. L'astéroïde est catégorisé parmi les achondrites. Cette récupération d'un corps extraterrestre sur le sol terrestre, préalablement repéré de façon formelle dans l'espace, est une première mondiale.

La météorite a été nommée officiellement Almahata Sitta, en conformité avec les règles de la Meteoritical Society.

*2012 DA14*³²⁶

2012 DA14 est un astéroïde géocroiseur d'environ 45 mètres de diamètre et d'une masse de l'ordre de 120 000 à 150 000 tonnes, découvert le 23 février 2012 à l'observatoire de La Sagra, à Puebla de Don Fadrique (Grenade), en Espagne. Le 15 février 2013, cet astéroïde est passé à seulement 0,09 distance lunaire (34 000 km) du centre de la Terre.

Les risques cumulés de collision entre 2012 DA14 et la Terre sur la période 2020-2057 sont estimés à 0,021 % (1 sur 4 7605). Au 6 mars 2012, les probabilités d'impact le 16 février 2020 sont d'une sur 83 0005. Il est classé à -3,29 sur l'échelle de Palerme. Le risque est plus d'un millier de fois plus faible que celui estimé pour un autre géocroiseur de taille comparable dans cette période de temps. Il est classé 0 (pas de risque) sur l'échelle de Turin. S'il venait à percuter la Terre, on estime qu'il aurait un impact similaire à celui de la Toungouska, survenu le 30 juin 1908 en Sibérie centrale.

6. Impacts et passages récents

Outre les événements déjà signalés (Tcheliabinsk, Toungouska, Soudan, ..) d'autres impacts ou passages très proches ont été signalés³²⁷. Par exemple, un bateau a été endommagé par un météorite alors qu'il naviguait entre Sydney et l'Amérique du Sud. Une jeune fille a été atteinte d'une pierre à la tête en 1927 au Japon. Une femme a été blessée dans sa maison par un météorite de 4kg en 1954 en Alabama.

En 1972, un météorite a été observé par de nombreux témoins dans les Montagnes Rocheuses. Il n'a probablement que frôlé la Terre.

³²⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/2012_DA14

³²⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Impact_event

En 1979, le satellite de défense américain Vela a identifié un événement au large de l'Afrique du Sud équivalent à l'explosion d'une bombe nucléaire. Sa nature extra-terrestre n'a pas pu être prouvée.

Le 6 Juin 2002 un objet d'une dizaine de mètres serait entré en collision avec la Terre en Méditerranée, entre la Lybie et la Grèce, avec une énergie comparable à la bombe d'Hiroshima. Un objet similaire se serait écrasé en Indonésie le 8 Octobre 2009, libérant une énergie de 2 bombes atomiques. Aucune victime n'a été signalée.

De nombreux passages proches ont été signalés, comme celui de l'astéroïde (4581) Asclepius, de 300 m de diamètre, qui est passé le 23 Mars 1989 à deux fois la distance Terre-Lune.

En moyenne, on signale un passage proche (à moins de la distance Terre-Lune) chaque année par un objet pouvant libérer une énergie au moins égale à la bombe d'Hiroshima.

7. Origine des Géocroiseurs

Il est clair qu'aucun objet n'a une orbite croisant celle de la Terre depuis la formation du Système solaire, car la durée de vie sur cette orbite est beaucoup plus faible que l'âge de la Terre.

L'existence de géocroiseurs est sans doute liée aux collisions se produisant entre les petits corps du Système solaire. Ces collisions sont à l'origine des grandes familles d'astéroïdes. Par exemple la famille de Flore contient près de 800 membres et se serait formée par une collision survenue il y a moins d'un milliard d'années. La forme et la nature des astéroïdes révèlent le plus souvent l'histoire de ces chocs.

Ceci dit, les géocroiseurs ne viendraient pas nécessairement de débris de la ceinture principale mais ils pourraient résulter d'objets plus lointains, comme des débris cométaires provenant de la Ceinture de Kuiper ou du Nuage de Oort.

8. Liens entre les géocroiseurs et les étoiles filantes

Une étoile filante est le phénomène lumineux qui accompagne l'entrée dans l'atmosphère d'un corps extraterrestre appelé météoroïde, qui correspond à un petit corps circulant dans l'espace à des vitesses de l'ordre de 70 km/s, son orbite croisant celle de la Terre³²⁸. Cette traînée lumineuse est causée par la vaporisation du corps et l'ionisation de l'air sur sa trajectoire, ce qui provoque la combustion de ce corps qui laisse derrière lui un sillage de gaz ionisé, le plasma. Ce phénomène est dû principalement à la compression de l'atmosphère en avant du corps supersonique et non à la friction.

L'étoile filante est une fine poussière cosmique qui est vaporisée entièrement avant d'atteindre le sol tandis que le bolide, météoroïde de masse et taille importantes, produit un disque lumineux intense lors de sa rentrée atmosphérique. Ce bolide peut exploser, généralement à 90 ou 70 kilomètres d'altitude ou atteindre le sol (bolide lui-même ou les fragments issus de son explosion), devenant une ou des météorites.

Le phénomène se passe généralement entre 120 et 85 kilomètres d'altitude, bien que certaines étoiles filantes puissent être visibles à 400 ou 600 km au-dessus du sol.

Les étoiles filantes ont deux origines : les étoiles filantes sporadiques sont créées par des poussières d'astéroïdes, les étoiles filantes d'essaims sont issues de la poussière libérée par les comètes dont la Terre coupe la trajectoire.

³²⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile_filante

Chaque année à la même période, l'orbite de la Terre croise des nuages de poussières laissés par des comètes : les essaims météoritiques. Cela provoque des pluies de météores, appelées aussi pluies ou averses d'étoiles filantes. Il est à noter que le terme d'essaim d'étoiles filantes est souvent employé pour désigner aussi bien la pluie de météores que le nuage de poussières cométaires.

Par un effet de perspective, les étoiles filantes semblent toutes provenir du même point du ciel. On appelle ce point imaginaire le radiant. Certaines étoiles filantes ne semblent pas venir du radiant, ce sont des grains de poussière n'appartenant pas au nuage traversé, on les appelle des sporadiques.

Ces pluies périodiques d'étoiles filantes portent un nom dérivé de la constellation où se trouve leur radiant. Ainsi, les Perséides (visibles en août) ont leur radiant dans la constellation de Persée. L'essaim des Léonides peut donner lieu à des pluies de météores très intenses.

La frontière est floue entre les étoiles filantes et les géocroiseurs. Les pluies d'étoiles filantes sont plutôt associées aux débris cométaires alors que les géocroiseurs sont plutôt des astéroïdes, à la composition très différente. Néanmoins on peut s'interroger sur la filiation entre ces deux grandes familles de météoroïdes

Chapitre 4. Cycles de l'évolution des espèces

1. Analyse de Fourier du taux d'extinction

Première Analyse

En 1982 Les paléontologues David Raup et John Sepkovski publient dans *Science* une analyse des extinctions de masse à partir des fossiles marins³²⁹. Cette analyse, basée sur une période de 250 Ma conduit à l'existence d'une périodicité autour de 26 Ma, avec une certitude de 99,9% (Figure 40).

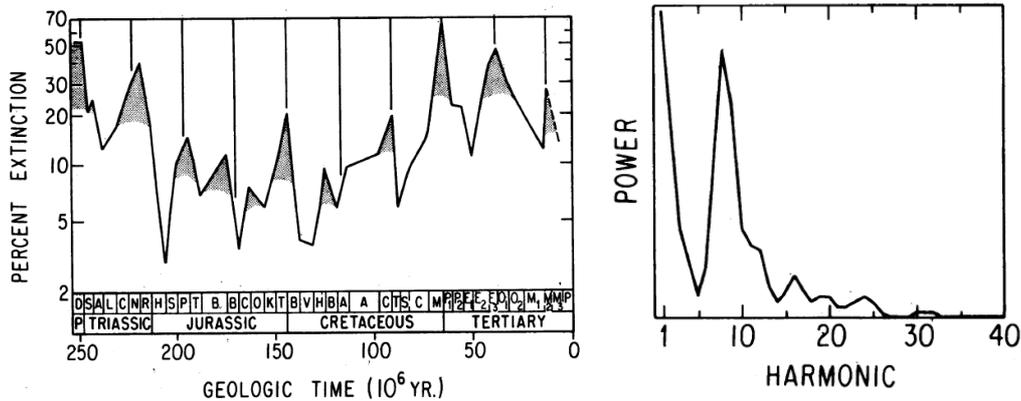


Figure 40 A gauche, pourcentages d'extinction utilisés pour l'analyse de Fourier ayant conduit à la figure de droite. Le pic correspond à une période de 26 Ma.

L'analyse des données semble avoir été très correctement menée. Une statistique aléatoire a donc très peu de chance de conduire à un tel spectre de puissance.

Notons que c'est l'ensemble des données qui a été utilisé et non la position des extinctions massives identifiées. L'identification de ces catastrophes étant basé sur un critère subjectif, cela aurait pu être contestable car avec cette analyse une dizaine de maxima sont identifiables, tous n'étant pas de valeur élevée.

L'analyse de Fourier suggère que :

- Les extinctions d'espèces sont en partie liées à un processus biologique ou géophysique ou planétologique ou solaire ou galactique ou d'origine inconnue récurrent ;
- Ce processus est stable depuis au moins 250 Ma ;
- Les effets sont variables d'une période à l'autre.

Analyse sur une durée plus longue

Le travail précédent ayant conduit à des très âpres discussions quant à l'origine de la périodicité, et, par conséquent, des extinctions massives, de nouvelles analyses ont été menées sur une période plus longue.

³²⁹ Raup, D. & Sepkoski, J. (1982). "Mass extinctions in the marine fossil record". *Science* 215: 1501–1503.

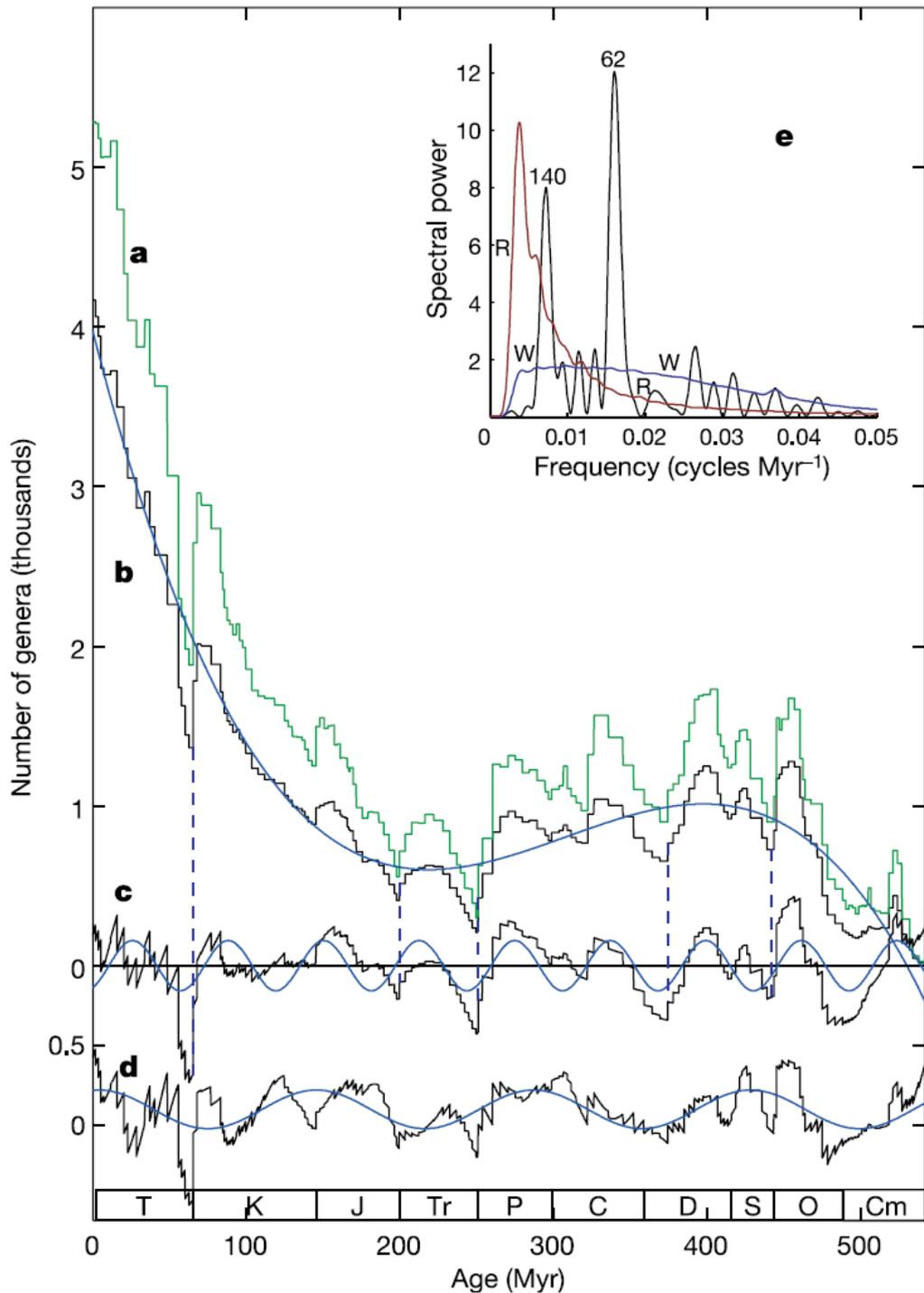


Figure 41 a (vert) : nombre d'espèces marines. b (noir) mêmes données après avoir soustrait des données de pauvre qualité. La ligne bleue est un polynôme du 3e degré donnant la tendance. c: la tendance est soustraite et l'ajustement sinusoïdal à 62 Ma est tracé. d : les données après soustraction du cycle de 62 Ma et le tracé de l'ajustement sinusoïdal à 140 Ma. e : le spectre de Fourier, les courbes bleue et rouge correspondent aux fonds.

Dans une lettre à la revue Nature publiée en Mars 2005, Robert Rohde et Richard Muller ont examiné une base de données établie par John Sepkovsky sur une durée totale de 542 Ma³³⁰.

³³⁰ Rohde, R.A. & Muller, R.A. (2005). "Cycles in fossil diversity". Nature 434: 209-210.

Le pic à 26 Ma devient moins important, mais surtout deux nouveaux pics apparaissent, le plus important à 62 Ma et un autre pic à 140 Ma (Figure 41).

L'existence de ces nouvelles périodes a rendu les spécialistes encore plus perplexes sur leurs causes.

Analyse croisée de deux séries

En 2010 Adrian Melott et Richard Bambach ont publié dans les MNRAS une étude basée sur des données sur 500 Ma³³¹. Au lieu de faire un spectre de puissance sur une série de données, les auteurs ont croisé deux séries différentes. Le spectre croisé est alors une fonction complexe, dont ils ont tracé la partie réelle (Figure 42).

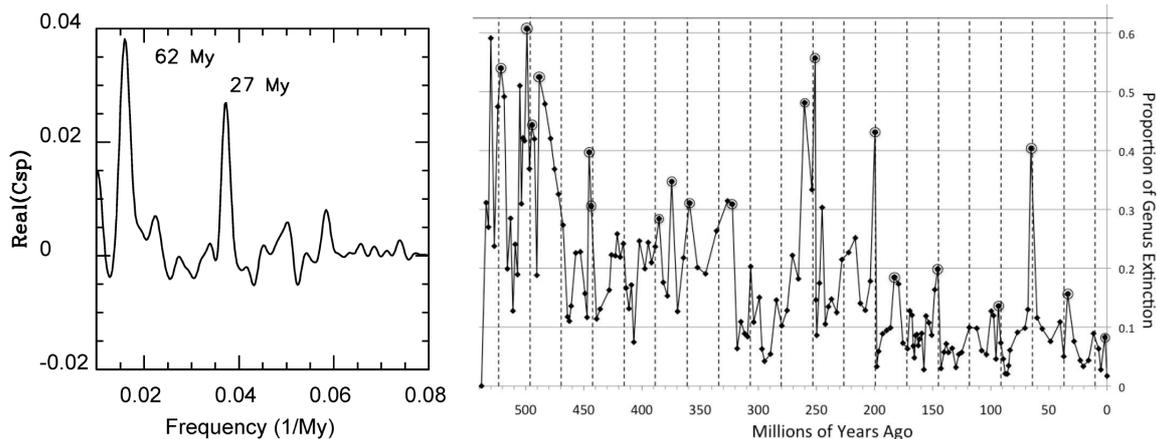


Figure 42 À gauche, partie réelle du spectre croisé entre deux séries paléontologiques. À droite, coïncidence entre les maxima et la grille correspondant à la période de 27 Ma.

La période passe à 27 Ma, mais aussi le pic à 62 Ma d'années apparaît. Une analyse statistique rigoureuse a été menée pour valider ces résultats, considérés avec une confiance de 99%.

2. L'hypothèse Némésis^{332 333}

Thèse initiale

L'hypothèse Némésis a été émise en 1984 par M. Davis, Piet Hut et Richard A. Muller, travaillant à Berkeley³³⁴. Elle résulte de l'annonce de la découverte de la périodicité dans les dates des grandes extinctions des espèces vivantes sur Terre, ainsi que de la proposition faite par Luis Alvarez en 1980 que l'extinction des dinosaures ait eu pour origine un impact cosmique.

Les auteurs ont proposé qu'une perturbation périodique du Nuage d'Oort³³⁵, lieu où résident la majeure partie des comètes du Système Solaire soit à l'origine des grandes extinctions (Figure

³³¹ <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1007/1007.0437.pdf>

³³² http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9m%C3%A9sis_%28C3%A9toile%29

³³³ <http://www.futurquantique.org/2010/03/11/les-extinctions-massives-et-l%E2%80%99hypothese-nemesis/>

³³⁴ M. Davis, Piet Hut, Richard A. Muller, « Extinction of species by periodic comet showers », Nature, vol. 308, p. 715-717, 1984.

³³⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage_d%27Oort

43). La perturbation serait causée par un compagnon du Soleil dont l'orbite se rapprocherait périodiquement du Soleil.

Caractéristiques attendues de Némésis

D'après la troisième loi de Kepler, un corps orbitant autour du Soleil avec une période de 26 millions d'années aurait une orbite dont la taille (demi-grand axe) serait d'environ 90 000 unités astronomiques, soit plus d'une année-lumière.

Pour expliquer que ce compagnon hypothétique n'ait pas été détecté, il faut donc supposer que celui-ci soit extrêmement peu brillant, et soit donc une étoile de faible masse (naine rouge) ou une étoile avortée (naine brune), ce qui en fait un corps significativement plus léger que le Soleil.

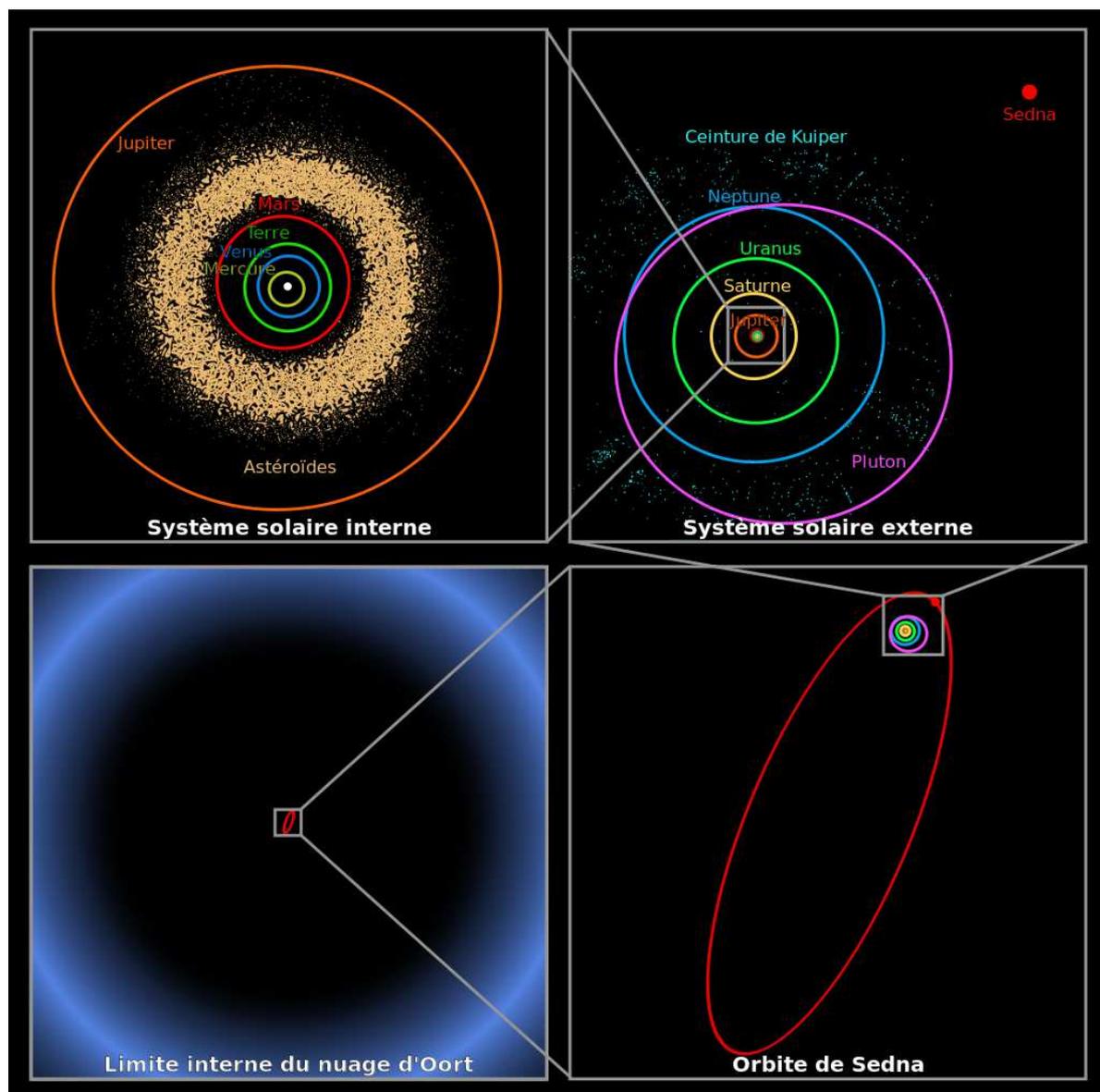


Figure 43 Nuage de Oort. Dimension par rapport aux autres composantes du système solaire.

L'hypothèse d'une période de 26 millions d'années ajouté au fait que Némésis serait responsable du déclenchement de l'extinction des dinosaures lors d'un précédent passage au périastre indique qu'elle serait aujourd'hui située au voisinage de l'apoastre, c'est-à-dire de son point le plus éloigné du Soleil. Pour provoquer périodiquement un excès de comètes dans le

Système solaire interne, elle doit également avoir une excentricité importante de façon à pénétrer le plus profondément dans le Nuage d'Oort à chaque révolution.

Il a été calculé qu'une étoile de 0,6 masse solaire aurait une influence négligeable sur le Nuage d'Oort si celle-ci le traversait à son extrémité. Pour affecter significativement le Nuage d'Oort, Némésis devrait certainement avoir une distance minimale d'approche au Soleil inférieure à une demi-année lumière, ou alors une masse significativement plus grande que 0,6 masse solaire. Dans un tel cas sa luminosité aurait été telle qu'elle aurait été détectée et identifiée depuis longtemps.

Némésis n'ayant pas été détectée, elle doit nécessairement avoir une distance d'approche plus faible qu'une demi-année lumière et une masse très faible. Même dans ce cas il semble difficile d'expliquer pourquoi elle n'a pas été détectée. Muller prétend que c'est parce qu'elle se situe dans une région du ciel très dense en étoiles, à savoir celle du centre galactique (constellation du Sagittaire).

Problèmes de la théorie

Au-delà de l'idée générale d'un astre obscur, compagnon du Soleil, aucune prédiction quantitative n'a été effectuée par Muller et ses collaborateurs. En particulier, il n'a pas été prouvé qu'il existe une plage de masse et de paramètres orbitaux pouvant expliquer l'éventuelle périodicité dans les extinctions massives et la non détection directe de Némésis.

Muller affirme que le fait que de nouvelles naines rouges soient régulièrement découvertes dans un rayon de 10 à 20 parsecs autour du Soleil est une indication forte du fait que de nombreux astres de ce type et près du Soleil restent à découvrir³³⁶.

Néanmoins, Némésis ne peut être située à guère plus de 2 années lumière du Soleil, ce qui en ferait un astre significativement plus lumineux (environ 6 magnitudes de différence par rapport à une distance de 10 parsecs) et donc bien plus facile à détecter à caractéristiques physiques identiques. De plus, si Némésis s'éloigne à plus de deux années lumière du Soleil à chaque révolution, cela rend son orbite très sensible aux perturbations des autres astres environnants (par exemple, Proxima du Centaure est située à moins de 4,5 années lumière du Soleil).

Muller n'a pas effectué de calcul de la stabilité éventuelle de Némésis, mais un tel calcul a été fait en 1984 par J. G. Hill, et donne un résultat négatif. Muller conteste ce dernier résultat, et le présente comme compatible avec les calculs effectués par son collaborateur Piet Hut qui conclue à une stabilité de l'orbite de Némésis sur le dernier milliard d'années.

Le fait que Némésis ait pu se former en même temps que le Soleil, et par suite rester dans une orbite à très longue période pendant près de 5 milliards d'années n'est pas affirmé avec certitude par Muller. Il indique par ailleurs que le peu de succès de sa théorie est uniquement dû à une présentation biaisée de ces deux résultats par l'éditeur de la revue Nature.

En tout état de cause, après une brève période d'intérêt l'hypothèse de Némésis n'a pas donné lieu à une littérature scientifique notable depuis 1990 malgré de très nombreuses tentatives de la part de Muller et ses collaborateurs pour promouvoir cette hypothèse.

Paradoxalement, la périodicité des extinctions d'espèces a été avancée comme un argument contre l'hypothèse Némésis. En effet en 2010, une nouvelle étude statistique sur les données paléontologiques a confirmé l'existence d'un cycle d'extinction de 27 Ma, mais avec une

³³⁶ <http://muller.lbl.gov/pages/lbl-nem.htm>

régularité incompatible avec les perturbations attendues d'un astre se situant à une distance aussi éloignée du Soleil. Selon les auteurs, une autre cause doit être recherchée.

Aujourd'hui, l'hypothèse d'un compagnon distant et obscur du Soleil semble donc extrêmement peu crédible. Il faut donc chercher d'autres processus pour expliquer les périodicités observées.

Chapitre 5 : la Voie lactée, notre galaxie^{337 338}

1. De la Voie Lactée à la Galaxie

Perception de la Voie lactée

Depuis la nuit des temps, par des nuits sans Lune et avec un ciel dégagé de tout nuage, l'Homme perçoit une grande bande lumineuse barrant les cieux. De nombreuses légendes y ont été attachées. Sa dénomination dans le monde méditerranéen, la Voie lactée, provient de la mythologie grecque. Héraclès était le fils de Zeus et d'Alcmène, une mortelle, femme du roi Amphitryon. Zeus le fait enlever par Hermès peu après sa naissance et celui-ci le place dans le lit d'Héra, son épouse, car aucun de ses fils ne peut devenir immortel s'il n'a pas tété au sein de la déesse. Dès qu'Héraclès commence à téter Héra, celle-ci se réveille, aperçoit le bébé et le repousse. Son lait se répand dans le ciel et forme une trainée blanchâtre, la Voie lactée³³⁹. Les Grecs l'appelaient Galaxie, dénomination liée aujourd'hui à l'ensemble de l'objet, et à tous les astres similaires.



Figure 44 Photographie de la Voie lactée prise au Cap Palliser sur l'île nord de la Nouvelle-Zélande par l'Australien Mark Gee.

Pour d'autres civilisations, la Voie lactée a été interprétée autrement. Selon Arago³⁴⁰ les Chinois et les Arabes la désignaient comme le Fleuve Céleste. Les Indiens l'appellent aussi le Gange céleste³⁴¹. Toujours selon Arago, elle était le Chemin des âmes pour les Amérindiens et le Chemin de Saint-Jacques de Compostelle pour les paysans français. Dans ce même esprit, d'après un ami d'origine corse, elle serait appelée le Chemin de Rome sur cette île.

³³⁷ F. Combes, J. Lequeux. La Voie lactée. EDP Sciences, Paris, 2012.

³³⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9e

³³⁹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9racl%C3%A8s>. Quelques sources de cette légende sont indiquées

³⁴⁰ F.Arago. Astronomie populaire, II, p.2, Gide, Paris, 1858.

³⁴¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way

Une image de la Voie lactée prise au Cap Palliser en Nouvelle Zélande a été portée sur la Figure 44. Son auteur, Mark Gee, a été récompensé comme "*Astronomy photographer of the year*" en 2013 par le Royal Observatory^{342 343}. Le point brillant, à droite, est le phare du Cap Palliser, d'où semble émerger la Voie lactée. La partie centrale correspond au bulbe galactique. Les deux galaxies à gauche sont les deux nuages de Magellan.

La Voie lactée est sans doute la plus grande structure céleste visible. Sa perception semble aisée, mais en pratique il est de plus en plus difficile de la percevoir en raison de la pollution lumineuse. Pour la voir, il faut pouvoir distinguer les étoiles jusqu'à la magnitude 5,1³⁴⁴. Le contraste sur le ciel est faible, il est indispensable d'être loin d'une ville. Elle peut s'admirer par une belle nuit de nouvelle Lune dans un site de montagne, à l'écart des éclairages publics, on doit alors pouvoir percevoir des étoiles jusqu'à la magnitude 6. Près d'une ville, on ne peut plus voir les étoiles de magnitude supérieure à 4. On peut s'attrister du fait que cette observation si familière à l'homme depuis des temps immémoriaux n'est plus possible pour une partie notable de l'humanité.

Avec les grands télescopes à grand champ il est possible d'obtenir des images plus profondes d'une partie de la Voie lactée. Sur la Figure 45 on a porté une image mosaïque de l'ensemble de la Voie lactée obtenues à partir de plusieurs images sur différents sites.

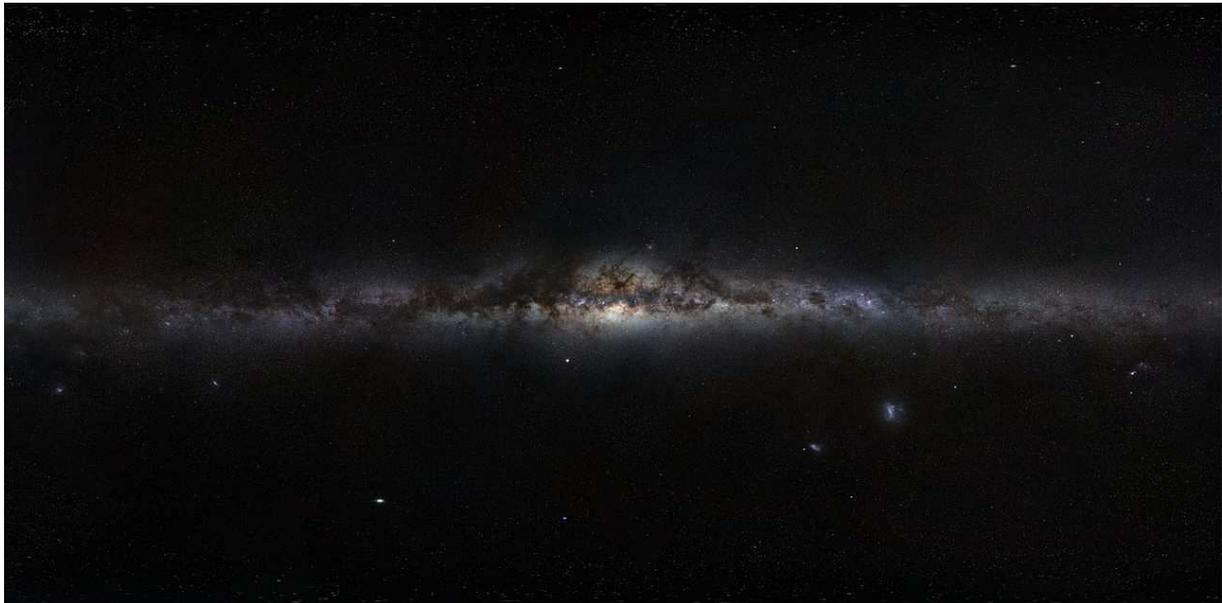


Figure 45 Image composite de l'ensemble de la Voie lactée obtenue en assemblant des photographies prises par Serge Brunier sur différents sites, dont principalement ceux de l'ESO au Chili sur le Mont Paranal et à la Silla³⁴⁵.

La magnitude totale de la Voie lactée n'est pas connue. Elle a été estimée à -5,1³⁴⁶, de manière indirecte. Celle du Soleil est estimée à -27, de la Lune à -12, de Vénus à -4,6 et Sirius à -

³⁴² <http://www.rmg.co.uk/whats-on/exhibitions/astronomy-photographer-of-the-year/2013-winners/earth-and-space>

³⁴³ <http://www.astrosurf.com/luxorion/univers-voielactee.htm>

³⁴⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way

³⁴⁵ <http://www.eso.org/public/images/eso0932a/>

³⁴⁶ <http://www.astrosurf.com/abduhad/Milky-Way-Brightness.htm>

1,5³⁴⁷. De ce fait, la Voie lactée est le troisième astre en matière de luminosité totale. Compte tenu de la définition des magnitudes, la Lune est apparemment un million de fois moins lumineuse que le Soleil et près d'un millier de fois plus lumineuse que la Voie lactée.

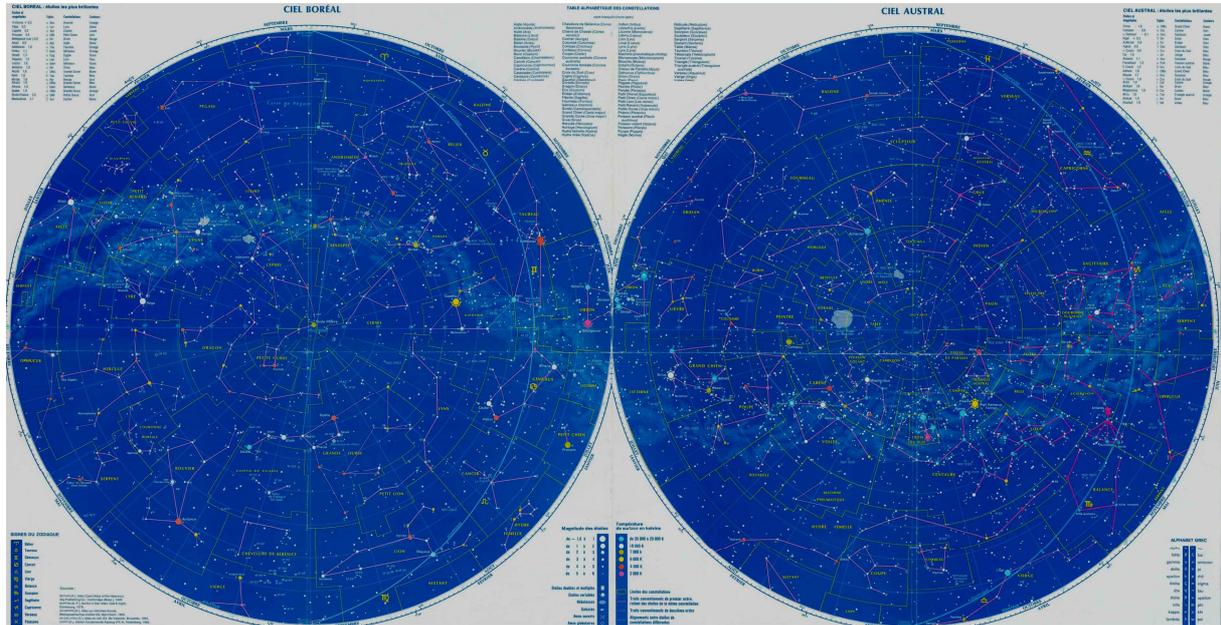


Figure 46 Carte du Ciel sur laquelle a été tracée l'empreinte de la Voie lactée.

Localisation

Sur la Figure 46, nous avons porté l'image d'une carte du ciel sur laquelle la Voie lactée a été représentée³⁴⁸. On voit que cette structure céleste fait un grand tour dans le ciel. En fait, la Voie lactée trace un grand cercle sur la sphère céleste, comme l'écliptique ou l'équateur.

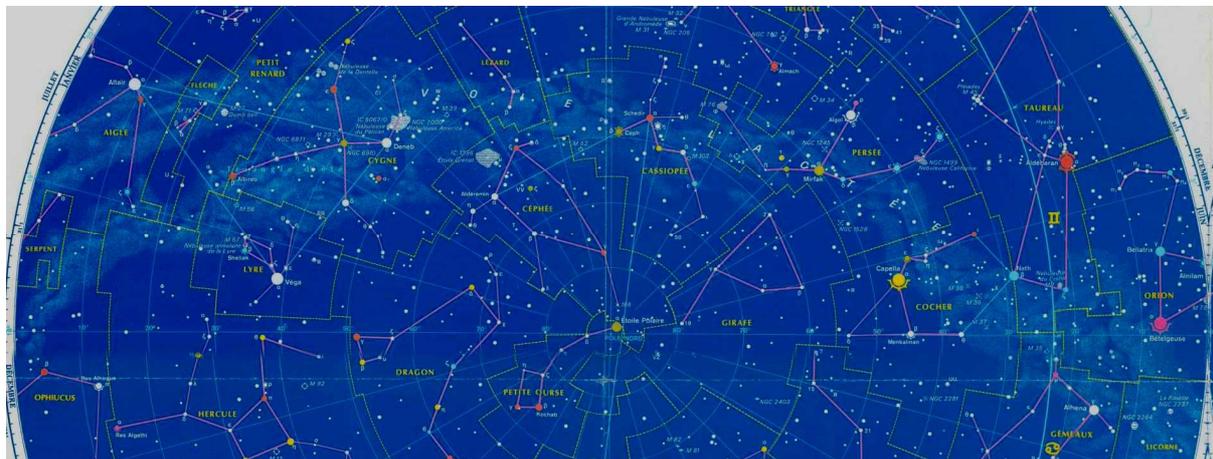


Figure 47 La Voie lactée dans l'hémisphère boréal.

Sur la Figure 47, nous avons représenté la partie située dans l'hémisphère boréal, entièrement visible du monde méditerranéen. Partons de la droite, la Voie lactée traverse les constellations de la Licorne et d'Orion. Elle traverse les Gémeaux et le Cocher, en passant près du Taureau, avec son superbe amas des Pléiades. Elle remonte vers le pôle en passant par Persée,

³⁴⁷ <http://www.imcce.fr/promenade/pages5/572.html>

³⁴⁸ http://philo06.free.fr/Astrophotographie/Carte_du_Ciel.jpg

Cassiopée et Céphée. Elle redescend ensuite par le Cygne. Elle se fragmente avec une branche passant par la Lyre et le Serpent, l'autre par le Petit renard, la Flèche et l'Aigle.

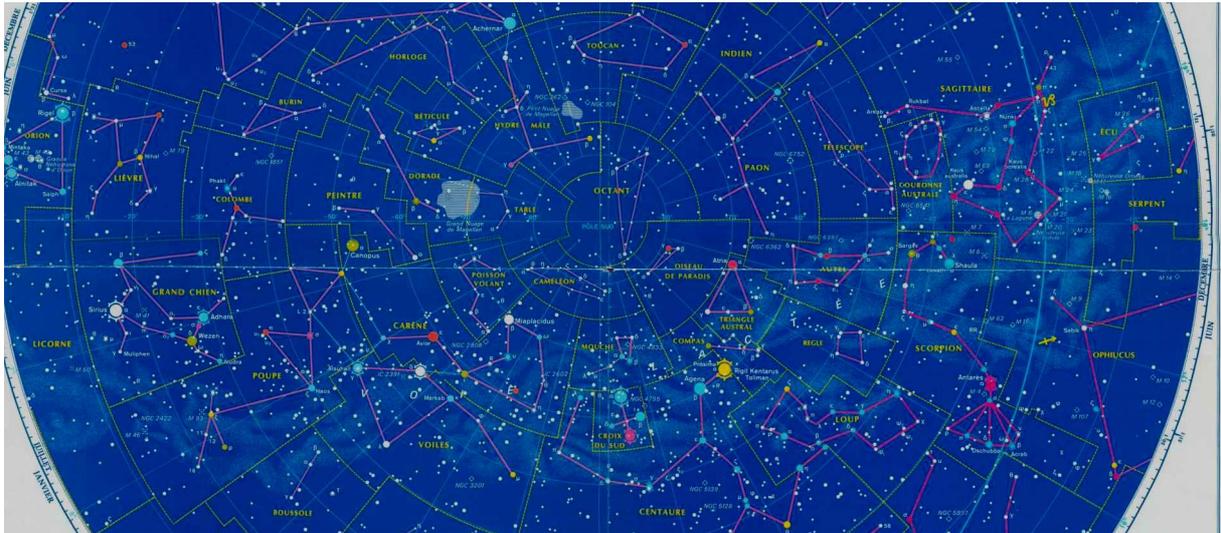


Figure 48 La Voie lactée dans l'hémisphère austral.

Sur la Figure 48, c'est la partie australe qui a été agrandie. Une grande partie de cette région n'a été connue des Européens qu'à partir des grandes expéditions maritimes de la Renaissance. Les embranchements de l'Aigle et du Serpent se sont rejoints dans la constellation de l'Écu. Puis La Voie lactée traverse plusieurs constellations, le Sagittaire, Ophiocaus puis la Couronne Australe et le Scorpion. Elle passe ensuite dans l'Autel, la Règle et le Loup, puis dans le Triangle austral, le Compas et le Centaure. Elle traverse la Mouche et la Croix du Sud, puis passe dans les Voiles. Elle rejoint la Licorne en passant par la Poupe et le Grand Chien. Lorsqu'elle passe dans la constellation des Voiles, les Nuages de Magellan ne sont pas très éloignés, un peu au dessus d'elle. Sirius, l'étoile la plus brillante du Ciel permet de repérer le départ de la Voie lactée pour un observateur Méditerranéen.

Une myriade d'étoiles

Arago rapporte plusieurs opinions des Anciens sur la Voie lactée, mais il en retient³⁴⁹ "*c'est une raison de plus d'insister sur ce que la pensée de Démocrite, reproduite et éclaircie par Manilius, offre de subtil, d'ingénieux, de difficile à trouver. Suivant ces philosophes, si la Voie lactée brille d'un vif éclat, c'est que les étoiles y sont trop pressées, vu leur prodigieuse distance, pour qu'on puisse les distinguer une à une ; c'est que les images de tant d'astres fortement condensés se confondent.*"

Cette opinion fut renforcée par Galilée avec ses premières observations avec une lunette, en 1610³⁵⁰. Il put voir que la Voie lactée était un nuage très dense d'étoiles. "*Le baudrier et l'épée d'Orion, où les astronomes grecs et arabes n'étaient parvenus à compter que 8 de ces astres, en laissèrent voir plus de 80. Les Pléiades en offrirent 36 au lieu des 6 à 7 des Anciens.*"³⁵¹

³⁴⁹ F.Arago. *Astronomie populaire*, II, 5. Gide Paris, 1858.

³⁵⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9e

³⁵¹ F.Arago. *O.cit.* p.6

L'Univers-île

Avec les grandes expéditions de la Renaissance, les Atlas célestes furent complétés dans l'hémisphère austral. Kepler fut le premier à remarquer dans son *Epitome*³⁵² que la Voie lactée formait à un grand cercle sur la voûte céleste et que le Soleil devait en faire partie.

Les idées de Kepler furent reprises, d'abord en 1750 par l'anglais Thomas Wright, puis par Emmanuel Kant (1755) et par Jean-Henri Lambert. Kant appela la Voie lactée *le Monde des Mondes*³⁵³. Les trois savants placèrent le Soleil près du centre de cet *Univers-île*, terme utilisé par Alexandre von Humboldt dans son livre *Kosmos*. Kant développa ainsi une cosmologie (appelée à l'époque cosmogonie) basée sur cette structuration de l'Univers³⁵⁴.

Aujourd'hui le terme galaxie remplace universellement cette dénomination d'Univers-île. La Galaxie étant celle contenant le Soleil.

Le Modèle d'Herschel

William Herschel (1738-1822) fut d'abord un musicien, puis un opticien avant de devenir l'un des plus grands astronomes de tout les temps³⁵⁵. Ses grandes qualités d'opticien l'ont conduit à construire les plus grands instruments de son époque. Il construisit, en autres, un télescope d'1m26 de diamètre et de 12m de longueur. Ses découvertes, et celles de sa sœur Caroline et de son fils John, renouvelèrent profondément les connaissances astronomiques de son temps.

Les comptages d'étoiles effectués dans la Voie lactée l'ont conduit en 1785 à proposer un modèle de la Galaxie, dans laquelle le Soleil est près du centre. Cette perception a été considérée comme un renouveau du géocentrisme, car cette observation donnait, indirectement, une place privilégiée à l'Homme.

Le Modèle de Kapteyn

L'astronome hollandais Jacob Kapteyn (1851-1922) développa un programme intensif d'observations photographiques, en particulier dans l'hémisphère austral. Après analyse des mesures obtenues, il proposa un modèle de la Galaxie dans laquelle le Soleil était toujours placé au centre d'une structure en forme d'ellipsoïde³⁵⁶.

Ce modèle tenait compte de propriétés des étoiles telles qu'elles étaient connues au début du 20^e siècle.

La seconde révolution copernicienne

L'astronome américain Harlow Shapley³⁵⁷ (1885-1972) apporta en 1918 un nouvel éclairage sur la structure de la Galaxie en analysant la distribution d'une de composantes, les amas globulaires. La relation période luminosité des étoiles périodiques, qui venait d'être mise en évidence sur les Nuages de Magellan, lui permit de placer dans l'espace ces objets et de montrer qu'ils étaient distribués de manière quasi isotrope autour d'un point situé dans la

³⁵² F.Arago. O. cit. p.7

³⁵³ F.Arago. O. cit. p.7-9

³⁵⁴ http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_18e/ha-kant-univers-iles-1.html

³⁵⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/William_Herschel

³⁵⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Jacobus_Kapteyn

³⁵⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Harlow_Shapley

constellation du Sagittaire, centre éloigné du Soleil de plusieurs dizaines de milliers d'années lumière.

Il y a alors une contradiction profonde entre cette analyse et les travaux de Kapteyn. À cette époque se situe aussi le Grand débat entre Shapley qui propose que les nébuleuses spirales, comme celle d'Andromède, font partie de notre Galaxie et Edwin Hubble qui soutient la nature extragalactique de ces nébuleuses. Ce grand débat est clos vers par la détermination de la distance d'Andromède par Hubble³⁵⁸. Mais il faudra attendre 1930 pour comprendre l'origine des désaccords sur la structure de la Galaxie, grâce aux travaux de Robert Trumpler³⁵⁹. Cet astronome mit en évidence l'existence d'une absorption interstellaire faussant l'interprétation des comptages de Kapteyn³⁶⁰.

On attribue à Harlow Shapley d'avoir effectué cette seconde révolution copernicienne. Notre Soleil est une étoile quelconque de notre Galaxie, qui elle-même fait partie d'un groupe de galaxies sans grande spécificité. Ce groupe est lié au superamas de la Vierge, qui lui même fait partie d'un ensemble plus vaste, etc.

2. Le monde des étoiles

Les étoiles forment la composante principale de la Galaxie. Le dernier recensement, déduit des observations obtenues avec la mission Kepler, est d'environ 100 milliards, très en retrait par rapport aux estimations précédentes, autour de 200 à 400 milliards³⁶¹. Rappelons qu'à l'œil nu, nous ne percevons qu'environ 5000 étoiles, dans les meilleures conditions.

Depuis l'Antiquité, les astronomes ont réparti spatialement les étoiles en constellation. Cette structuration est apparue arbitraire, et généralement cela n'a aucune signification physique.

Jusqu'au milieu du 19^e siècle, les étoiles étaient des points lumineux sur la voûte céleste et l'on avait qu'une idée très imprécise sur leur distance, de leur dimension et de leur luminosité réelle. On ne connaissait que le mouvement propre de quelques étoiles, découvert par Halley en 1718³⁶². On doit à Friedrich Wilhelm Bessel d'avoir mesuré la première distance d'une étoile (61 Cygni) en 1838³⁶³. Progressivement, et grâce aussi au développement de la spectrographie, le monde des étoiles a été de mieux en mieux compris par les astronomes.

Classifications photométriques

Elles sont basées sur les flux lumineux mesurés dans différentes couleurs (bandes spectrales). Cela permet d'établir le diagramme d' Hertzsprung-Russell³⁶⁴. Dans ce diagramme (Figure 49) l'abscisse d'une étoile correspond à sa température de surface, déterminée à partir de sa couleur. L'ordonnée est la luminosité intrinsèque, estimée par sa magnitude et sa distance.

³⁵⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Grand_D%C3%A9bat_%28astronomie%29

³⁵⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Julius_Trumpler

³⁶⁰ R.J. Trumpler, 1930. Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters. Lick Obs. Bull. Vol XIV, No. 420 (1930) 154-188. Table 16 is the Trumpler catalog of open clusters, referred to as "Trumpler (or Tr) 1-37.

³⁶¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9e

³⁶² http://fr.wikipedia.org/wiki/Mouvement_propre

³⁶³ http://fr.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Wilhelm_Bessel

³⁶⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Hertzsprung-Russell

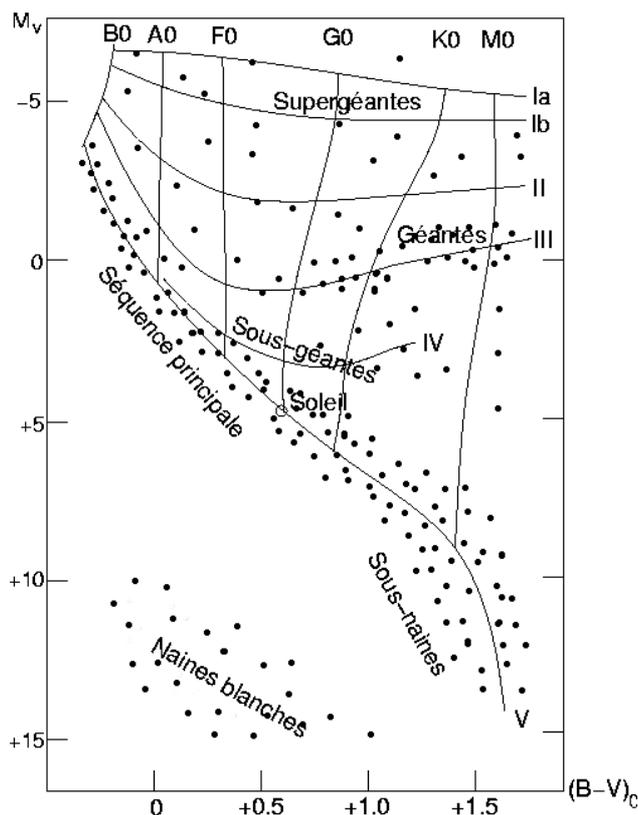


Figure 49 Diagramme d'Hertzsprung-Russell des étoiles.

Classifications spectrales

À la fin du 19e siècle le Père Secchi a introduit une classification des étoiles basée sur les raies spectrales, mises en évidence avec un spectroscopie. Aujourd'hui 7 classes spectrales ont été définies³⁶⁵. Des subdivisions ont été définies pour tenir compte de la précision des observations. Sur la Figure 50, nous avons porté le tableau associant un spectre stellaire à une classe spectrale. La gravité de surface, liée à la luminosité de l'objet, modifie l'apparence des raies. Les principaux types sont:

- O : étoiles dont la température de surface est de 30000°K
- B : température de l'ordre de 15 à 20000°K
- A : température autour de 8000°K
- F : température près de 7000°K
- G : entre 5000 et 6000°K
- K : de l'ordre de 4000°K
- M : moins de 3500°K

³⁶⁵ https://media4.obspm.fr/public/FSU/pages_classification-spectrale/impression.html

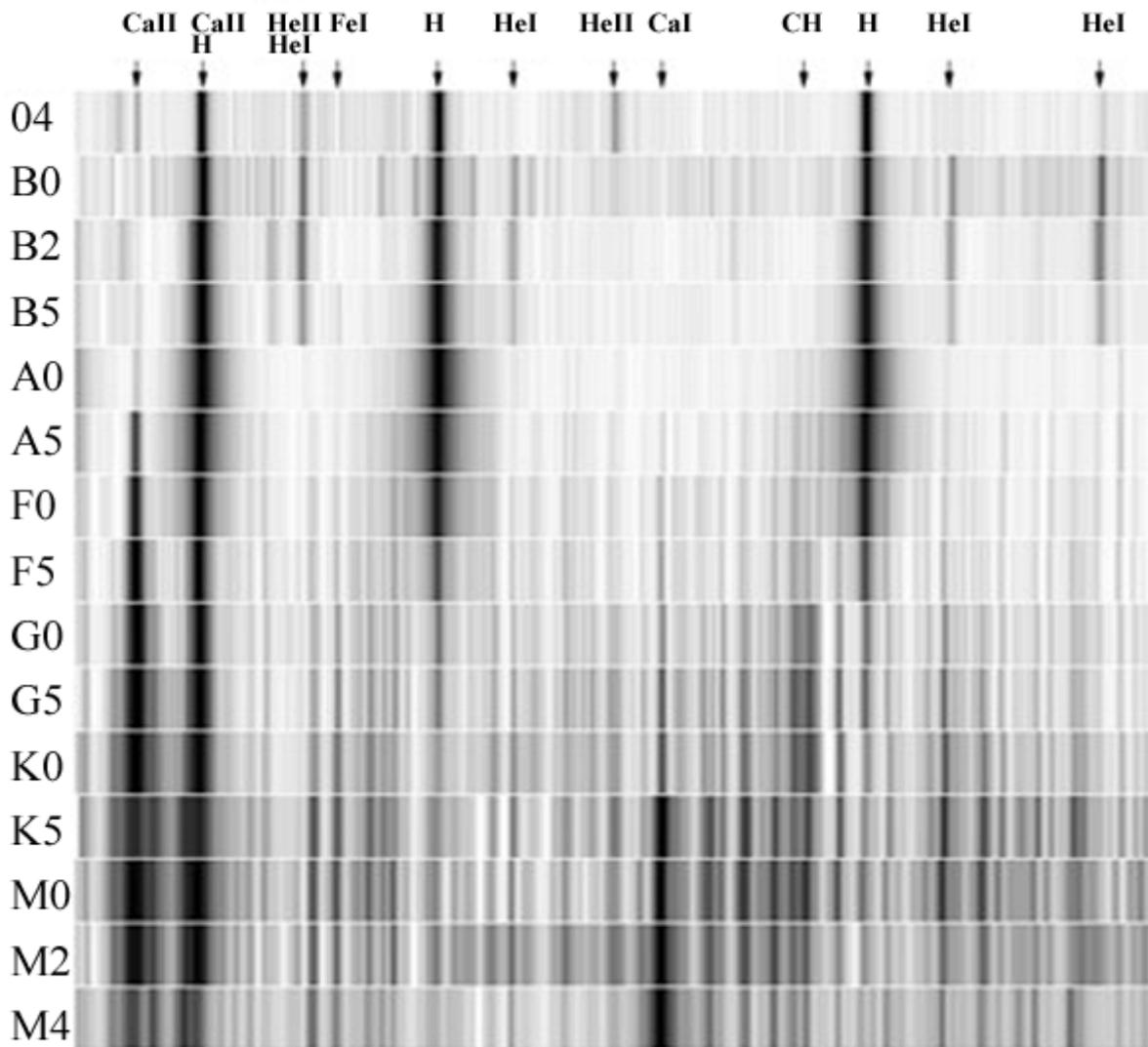


Figure 50 Classification spectrale des étoiles.

Autres classifications

D'autres critères sont utilisés pour classer, comme la variabilité lumineuse de l'étoile ou sa multiplicité. Un pourcentage important des étoiles est sous forme d'étoiles doubles. L'environnement contribue aussi dans la manière de classer les étoiles: présence de planètes, d'un disque de poussière, existence d'une enveloppe gazeuse, jet lumineux, etc.

Les étoiles sont caractérisées par différents paramètres:

- Ceux dérivés de l'analyse spectroscopique, comme la température effective, la gravité de surface, l'abondance relative des éléments, la vitesse de rotation, etc.
- Ceux obtenus après modélisation, compte tenu des paramètres précédents, ou d'observations complémentaires : la luminosité, le rayon, la masse, le moment angulaire, l'âge, etc.

L'analyse des données sur une étoile permet d'obtenir aussi des informations sur la matière interstellaire située sur la ligne de visée. Cette détermination est nécessaire pour obtenir des paramètres physiques réduits des effets de cette traversée.

3. Les amas stellaires

Les amas galactiques

Dès l'Antiquité, les astronomes ont construit des constellations, en imaginant un lien entre les étoiles les composant. L'observation a montré ultérieurement qu'il n'y a pas, en général, de structures physiques associées. Néanmoins quelques objets identifiés dès l'Antiquité se sont révélés des amas stellaires. C'est le cas des Pléiades (Figure 51) et des Hyades dans la constellation du Taureau. Depuis, les Astronomes ont mis en évidence des centaines d'amas d'étoiles, pouvant contenant, des centaines ou beaucoup plus d'étoiles.



Figure 51 Image de l'amas des Pléiades (M45) avec le télescope spatial Hubble³⁶⁶.

Les amas dits galactiques, ou ouverts, sont les plus jeunes, souvent associés à des nébuleuses gazeuses³⁶⁷. Ces amas sont très proches du plan de la Galaxie.

Les amas globulaires

Les amas globulaires sont beaucoup plus dense, avec typiquement une centaine de milliers d'étoiles. Ils sont composés essentiellement d'étoiles vieilles. À ce jour, on en compte 150, mais plusieurs d'entre eux pourraient être cachés par la région centrale de la Galaxie³⁶⁸. Ils forment une population isotrope autour du centre galactique. On pense que ces objets ont été

³⁶⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A9iades_%28astronomie%29#mediaviewer/Fichier:Pleiades_large.jpg

³⁶⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Amas_ouvert

³⁶⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Amas_globulaire

formés à l'origine de la Galaxie. L'amas M13 de la constellation d'Hercule en est un exemple emblématique (Figure 52).



Figure 52 Amas M13 dans la constellation d'Hercule³⁶⁹.

Autres groupes stellaires

Les amas sont les cas les plus évidents de la nature grégaire des étoiles. Plusieurs autres structures d'objets liés ont été mis en évidence tels que:

- *Les associations d'étoiles.* On a remarqué les étoiles O et les étoiles T pouvaient former des structures instables, en voie de dissociation.
- *Les courants stellaires.* L'examen de la distribution des étoiles dans l'espace des phases permet de mettre en évidence des groupes très dispersés dans l'espace, mais ayant une bonne corrélation dans le mouvement de leurs étoiles
- *Les courants de marée.* On a mis en évidence des courants stellaires associés à l'effet d'une marée gravitationnelle de la Galaxie sur une autre composante (amas globulaire, galaxies en voie de cannibalisation).

4. Le milieu interstellaire

Une partie de la masse de la Galaxie est sous forme de la matière interstellaire. Cette matière a été mise en évidence par William Huggins en 1864 par la spectrographie de la nébuleuse d'Orion.

Les nébuleuses gazeuses (ou régions HII)

Il semble que ce soit l'astronome français Fabri de Peiresc qui découvrit le premier, en 1610, l'existence dans le firmament d'une nébuleuse diffuse, en l'occurrence la nébuleuse d'Orion³⁷⁰. Cette nébuleuse (Figure 53) est l'archétype des nébuleuses dites en émission³⁷¹, ou régions

³⁶⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Amas_d%27Hercule

³⁷⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gion_HII

³⁷¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_en_%C3%A9mission

III. Ce sont des nuages de gaz interstellaire, ionisé par la lumière ultra-violette émise par des étoiles chaudes internes à ces régions. L'énergie est en partie réémise sous forme de lumière à des plus grandes longueurs d'onde, principalement dans des raies comme celles de l'hydrogène ou de l'oxygène.

Grâce à la photographie les astronomes ont identifiées de nombreuses régions. Une galaxie spirale peut en contenir des milliers.



Figure 53 Image prise avec le télescope spatial Hubble de la nébuleuse d'Orion (M42)³⁷².

Les nébuleuses par réflexion

Sur la Figure 51, nous distinguons clairement des nébulosités autour des étoiles brillantes des Pléiades. Ce sont de nébuleuses dites par réflexion³⁷³. La poussière autour des étoiles rediffuse la lumière d'une manière anisotrope. Elles sont souvent associées à des étoiles jeunes ou en formation.

Les nuages moléculaires

Les nuages moléculaires sont des nébuleuses de grande taille et suffisamment denses pour permettre la formation de la molécule H₂, l'hydrogène moléculaire³⁷⁴. Avec les connaissances actuelles on pense que la formation des étoiles ne s'effectue que dans ces structures. Les observations en Infrarouge et dans les ondes millimétriques ont permis de mettre en évidence la structure réelle de ces objets, qui peuvent faire des millions de masse solaire. Sur la Figure 54 nous avons porté l'image d'un nuage faisant partie de la nébuleuse de la Carène. Des étoiles se forment aujourd'hui dans cette structure.

³⁷² http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_d%27Orion#mediaviewer/Fichier:Orion_Nebula_-_Hubble_2006_mosaic_18000.jpg

³⁷³ http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_par_r%C3%A9flexion

³⁷⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage_mol%C3%A9culaire



Figure 54 Nuage faisant partie de la Nébuleuse de la Carène. Dans son voisinage, on peut percevoir des étoiles récemment formées. La dimension de l'image, obtenue avec le HST, est de 2 années lumière³⁷⁵.

Les nébuleuses obscures

On aperçoit souvent sur les images de nébuleuses gazeuses ou par réflexion des nébuleuses sombres³⁷⁶. C'est le cas de la Tête de cheval dans la nébuleuse éponyme (Figure 55). Ce sont des régions denses de gaz et de poussière, à la structure souvent très irrégulière.



Figure 55 Nébuleuse obscure dite de la Tête de cheval observée par le télescope spatial Hubble³⁷⁷.

Les nébuleuses planétaires

Les nébuleuses planétaires sont des objets de petite dimension, le plus souvent ayant l'allure d'un disque³⁷⁸. Elle s'agit de nébuleuses en émission formant une coquille autour d'une étoile. L'étoile est en fin de vie et la matière a été éjectée par les vents stellaires. Elle terminera sa vie sous la forme d'une naine blanche. Le nébuleuse Hélix en est l'une des plus proches du Soleil, et l'une des plus caractéristiques (Figure 56).

³⁷⁵

http://fr.wikipedia.org/wiki/Nuage_mol%C3%A9culaire#mediaviewer/Fichier:Molecular.cloud.arp.750pix.jpg

³⁷⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_obscur

³⁷⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_obscur#mediaviewer/Fichier:Horsehead-Hubble.jpg

³⁷⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_plan%C3%A9taire



Figure 56 La nébuleuse planétaire Hélix observée par le télescope spatial Hubble³⁷⁹.

Les restes de supernovae

La nature de quelques nébuleuses n'a pu être interprétée qu'au cours du 20^e siècle, comme due à l'explosion d'une étoile. Elles sont les restes ou les rémanents de supernovae³⁸⁰. La nébuleuse de la constellation du Crabe M1 en est la plus connue (Figure 57). Elle provient de l'explosion de la supernova de 1054, consignée par les Chinois comme l'étoile invitée.

Les bulles interstellaires

Autour d'un amas stellaire on observe parfois une coquille gazeuse en expansion³⁸¹. Cette bulle interstellaire résulte des vents stellaires et de l'explosion des supernovae de l'amas. Une telle bulle a été mise en évidence autour du Soleil³⁸². Elle aurait un diamètre de l'ordre de 600 al, avec une forme de sablier (Figure 58). Cette bulle aurait pour origine l'explosion d'une ou de plusieurs supernovae proches il y a quelques millions d'années.

Dans cet esprit on a mis en évidence une structure de dimension bien plus grande, de 3000 al de diamètre, la Ceinture de Gould³⁸³. Contenant des étoiles jeunes de type O et B, elle se serait formée il y a 30 à 50 millions d'années.

³⁷⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9buleuse_plan%C3%A9taire#mediaviewer/Fichier:NGC_7293.jpg

³⁸⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9manent_de_supernova

³⁸¹ F.Combes, J.Lequeux. La Voie lactée, p.16. EDP Sciences, Paris, 2013.

³⁸² B.Y. Welsh, R. Lallement, J.L. Vergely & S. Raymond. Astronomy & Astrophysics 510, A54, 2010

³⁸³ http://fr.wikipedia.org/wiki/Ceinture_de_Gould

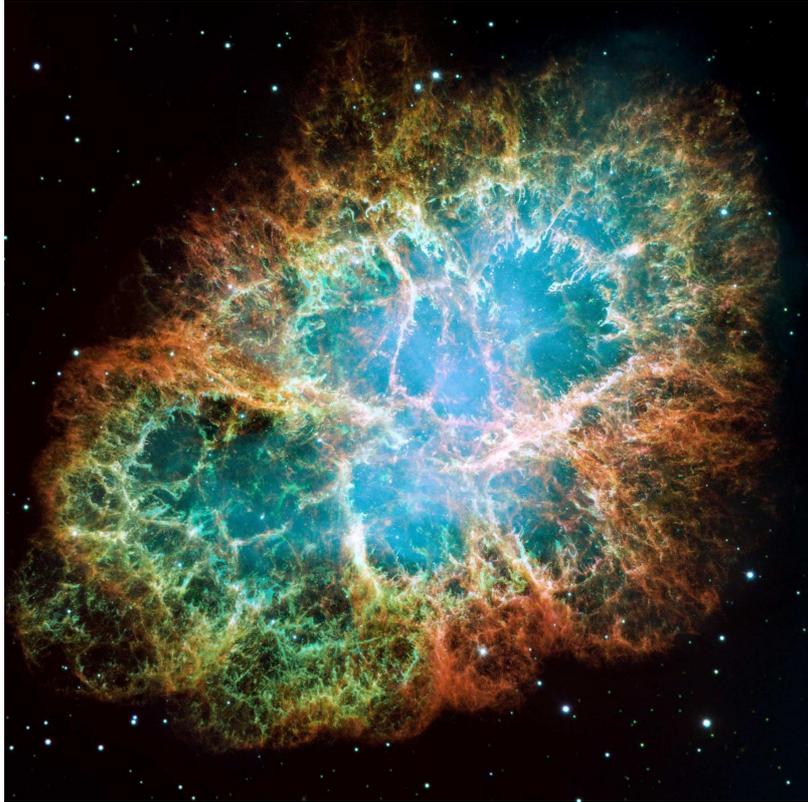


Figure 57 Image prise par le télescope spatial Hubble de la nébuleuse du Crabe, reste de la supernova de 1054³⁸⁴.

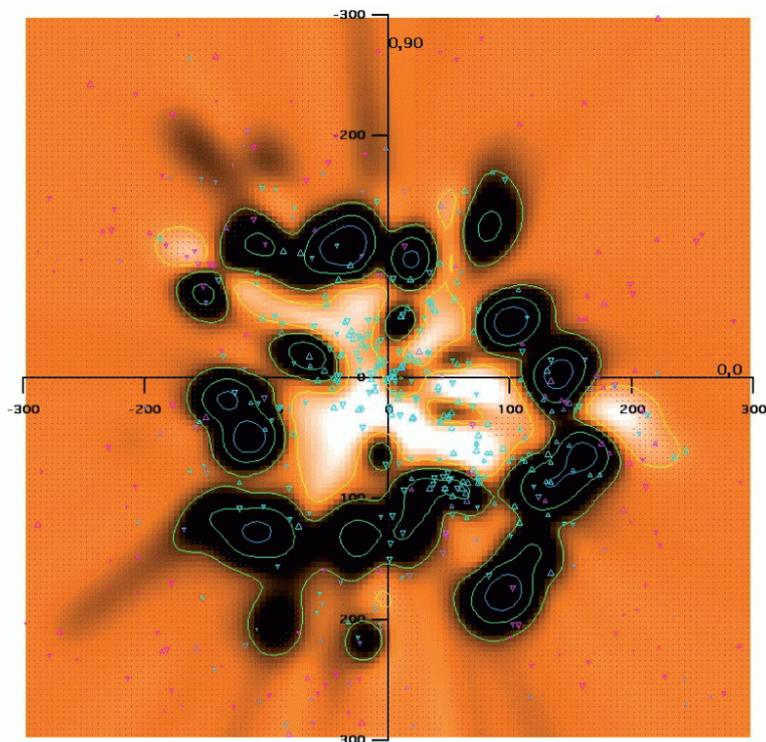


Figure 58 Carte des nuages interstellaires à moins de 300 pc dans le plan galactique. La bulle est la zone blanche entourant le Soleil à environ 80 pc³⁸⁵.

³⁸⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9manent_de_supernova#mediaviewer/Fichier:Crab_Nebula.jpg

Les Régions d'hydrogène neutre (HI)

En 1944 l'astrophysicien hollandais Hendrik van de Hulst prédisait l'existence d'une raie émise par l'atome neutre de l'hydrogène à 21 cm, en raison du changement de spin de l'électron par rapport à celui du proton³⁸⁶. Les radioastronomes l'ont découvert en 1951. Ceci permis d'établir l'existence de grandes régions d'hydrogène neutre (HI) et de les cartographier. Sur la Figure 59, nous avons porté la carte d'émission dans la raie 21 cm obtenue par Oort et al. en 1958, montrant en évidence, pour la première fois, les bras spiraux³⁸⁷.

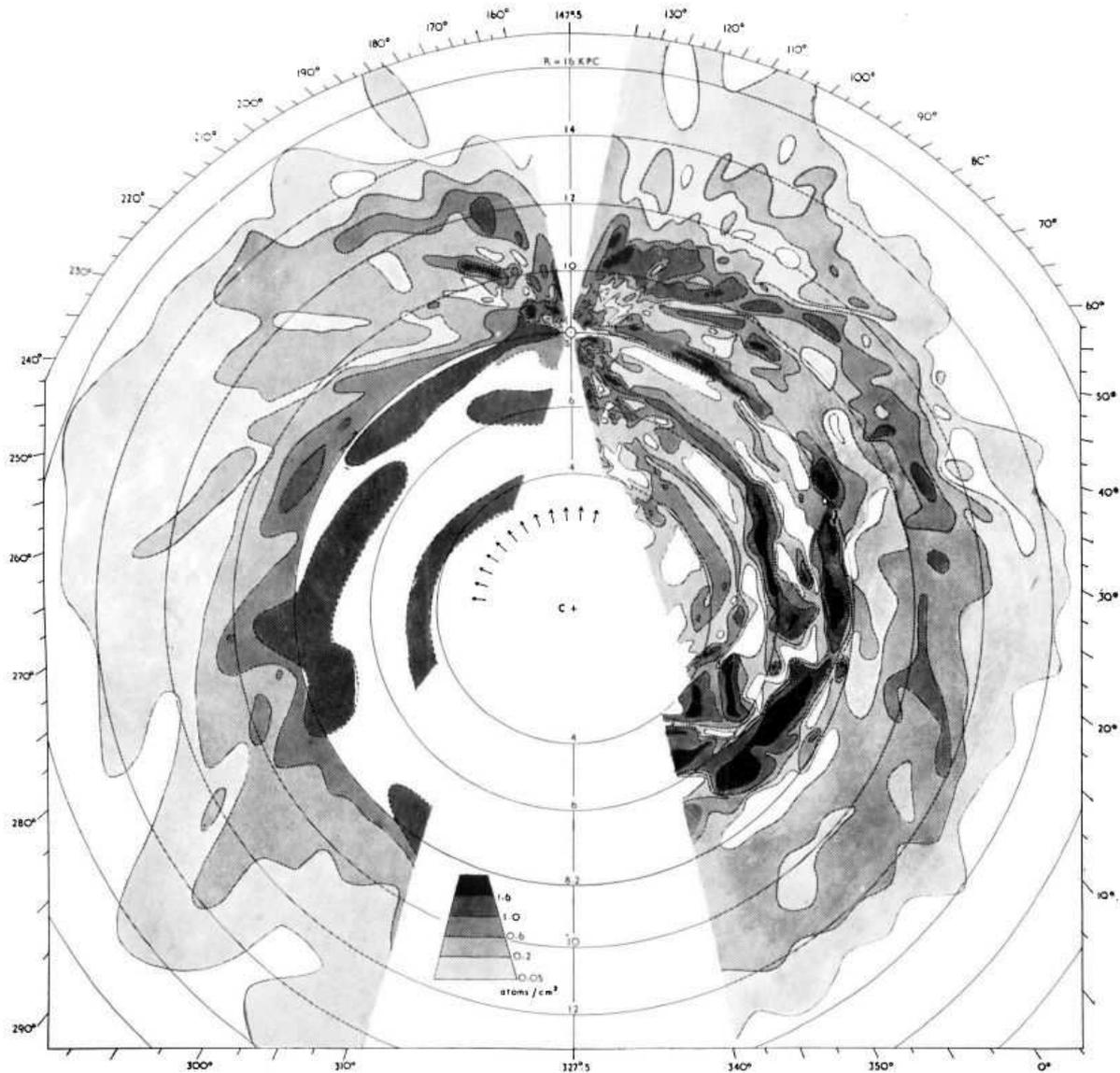


Figure 59 Distribution de l'hydrogène neutre dans la Galaxie obtenue en 1958 par Oort et al.

³⁸⁵ <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astronomie-carte-precise-nuages-interstellaires-autour-soleil-22600/>

³⁸⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_line

³⁸⁷ J.H. Oort, F.J. Kerr et G. Westerhout. The galactic system as a spiral nebula. Monthly Notices of the Royal Astron. Soc. 118, 379, 1958.

3. La Structure de la Galaxie

Les structures stellaires

Les étoiles constituent, en masse, la majeure partie de la Galaxie. Elles ne forment pas une structure uniforme. Les astronomes ont identifiées plusieurs structures différentes dans leur forme, leur dynamique et leur distribution. La compréhension de la nature, de la formation et de l'évolution de ces structures constitue l'un des principaux objectifs des recherches sur la Galaxies.

Sur la Figure 60 on a reporté le schéma des structures stellaires de la Galaxie telles qu'elles ont été tracées par F. Combes et J. Lequeux dans leur ouvrage *La Voie lactée*³⁸⁸.

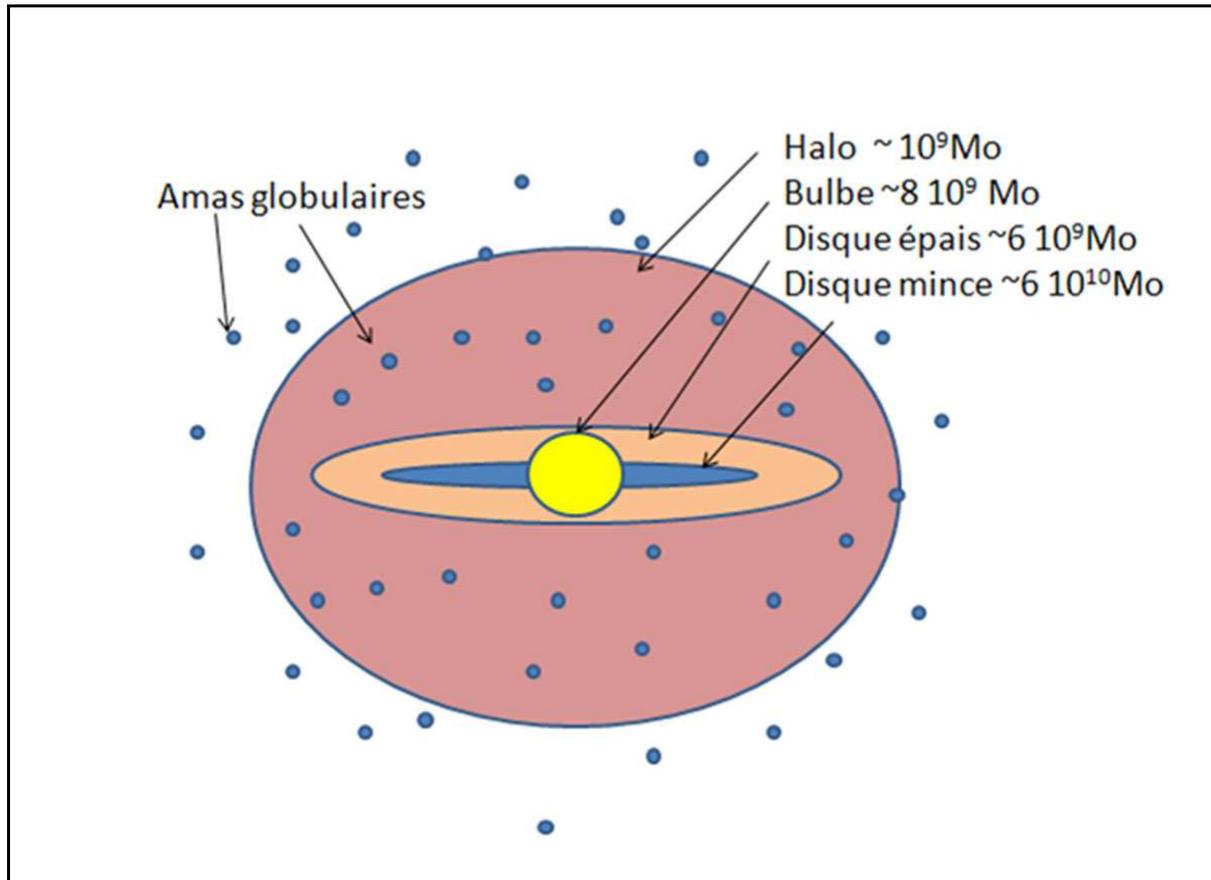


Figure 60 Structures formées par les étoiles de la Galaxie.

On considère aujourd'hui les structures suivantes:

- *Le halo galactique.* C'est une structure hétérogène, contenant essentiellement des étoiles vieilles. Il est parcouru par des courants stellaires, dus à des queues de marée. Ces courants sont associés à la cannibalisation de galaxies naines ou à l'effet du passage des amas globulaires dans le plan galactique. Le halo peut s'étendre de près de 250000 al.
- *Le disque mince.* C'est la structure stellaire principale. Elle peut s'étendre jusqu'à 50000 al du centre. Elle est formée essentiellement des étoiles jeunes.

³⁸⁸ F. Combes, J. Lequeux. *La Voie lactée*, p. 50, EDP Sciences, Paris 2013.

- *Le disque épais.* On a pu mettre en évidence vers 1990, à partir du voisinage solaire; qu'il y avait une séparation structurale entre les étoiles jeunes et les étoiles vieilles, celles-ci formant un disque épais. Son origine reste très discutée.
- *Le bulbe galactique.* La Figure 44 est centrée sur la région centrale de la Voie lactée. On perçoit nettement un élargissement dû à l'existence d'un bulbe, à l'instar des galaxies spirales. La population de ce bulbe est très mélangée en âge et on s'interroge aujourd'hui sur sa formation et son évolution.
- *La barre.* Il a fallu attendre les observations de la mission COBE pour confirmer l'existence d'une barre dans la région centrale. Cette structure était suspectée afin de comprendre la stabilité de la structure spirale.

Structures et matière interstellaire

La matière interstellaire est généralement distribuée dans le disque mince de la Galaxie. Les régions HI sont beaucoup plus étendues en rayon que les étoiles. On a aussi mis en évidence des nuages HI au dessus, et au dessous, de la Voie lactée, tombant à grande vitesse. C'est cette matière qui permet le renouvellement en étoiles de la Galaxie.

La structure spirale

Avec les premières photographies profondes du ciel à la fin du 19^e siècle on s'est aperçu que quelques nébuleuses avaient une forme spirale. Ultérieurement, Edwin Hubble après avoir identifié la nature extragalactique de ces nébuleuses, les nomma galaxies spirales³⁸⁹.

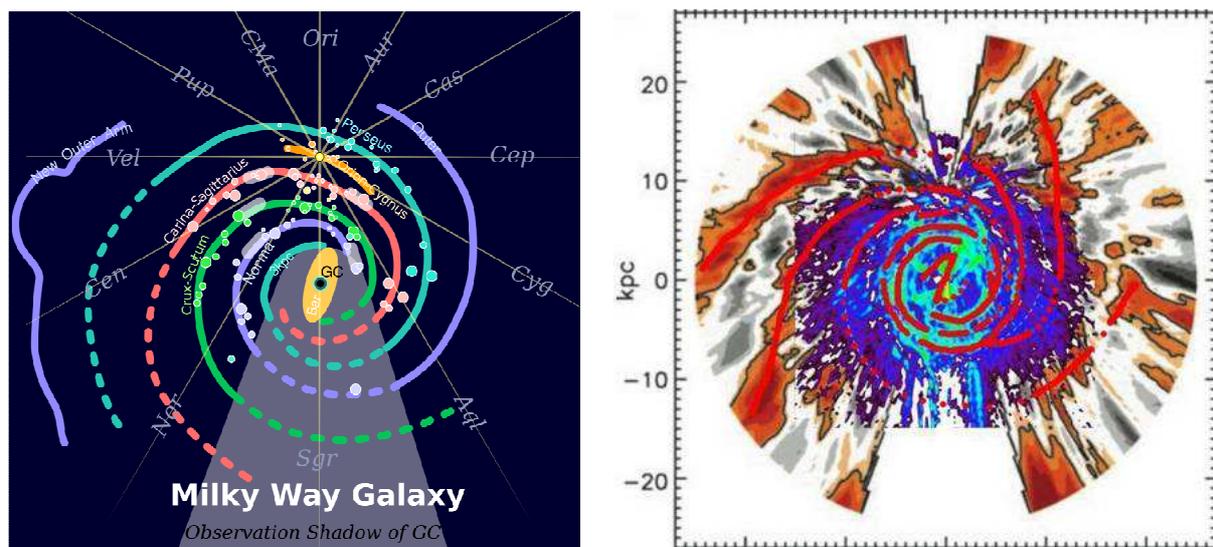


Figure 61 À gauche, dessin des bras spiraux³⁹⁰ d'après Momani et al. 2006³⁹¹ 392 À droite, plus récent dessin proposé par Martin Pohl et al. 2014³⁹³ 394.

³⁸⁹ E.P. Hubble. The realm of nebulae. Yale University Press, New Haven, 1936

³⁹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way

³⁹¹ Y. Momany et al. Outer structure of the Galaxy warp and flare: explaining the Canis Major over-density, Astron. Astroph. 451, 515-538, 2006.

³⁹² http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9#mediaviewer/Fichier:Milky_Way_Arms.svg

³⁹³ M. Pohl, P. Englmaier & N. Bissantz. Three-dimensional distribution of Molecular gas in the barred Milky way, Astroph. J., 677, 293, 2008.

Comme nous l'avons vu précédemment c'est par la radioastronomie qu'on a pu mettre en évidence la structure spirale de la Galaxie. Elle a été ultérieurement confirmée par des observations dans les régions HII³⁹⁵. Les étoiles elles-mêmes ne tracent pas une structure spirale précise. Sur la Figure 61, nous avons reporté deux tracés de la structure spirale de la Galaxie obtenues à partir des données actuelles. En particulier, celle de droite a été obtenue avec les données millimétriques et correspondent aux zones moléculaires.

On remarque l'existence de quatre bras spiraux et de la barre. Le type de spirale (a, b ou c selon le degré d'ouverture des bras) est lui aussi difficile à déterminer du fait que nous n'avons pas de vue externe de notre galaxie. Divers arguments favorisent des bras plutôt fermés (b) ou plutôt ouverts (c), aussi son type est-il considéré comme étant S(B)bc.

La rotation de la Galaxie

L'étude des vitesses stellaires montre que l'ensemble de notre galaxie est en rotation autour de son centre de masse, appelé centre galactique³⁹⁶. Les vitesses des différents objets se décomposent en une vitesse de rotation circulaire autour du centre galactique, qui ne dépend que de la distance au centre galactique (Figure 62) et une vitesse de mouvement propre. La vitesse particulière du Soleil est considérée par rapport à un ensemble d'étoiles voisines, appelé centre local des vitesses : elle est de 19,5 km/s vers la constellation d'Hercule ($\alpha=18h$, $\delta=30^\circ$).

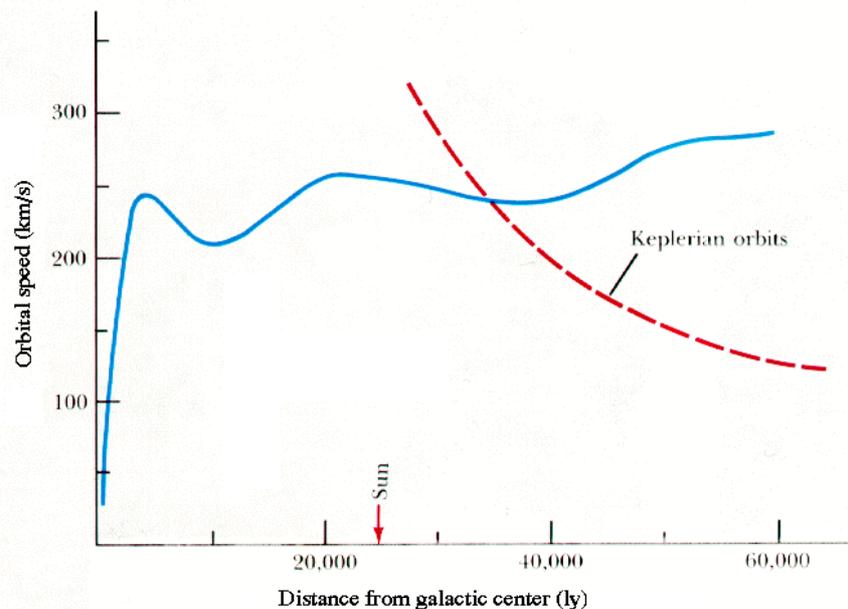


Figure 62 Courbe de rotation de la Galaxie³⁹⁷.

³⁹⁴ <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astronomie-nouveau-visage-voie-lactee-17931/>

³⁹⁵ Y.M. Georgelin, Y.P. Georgelin. The spiral structure of our Galaxy determined from H II regions. *Astron. Astroph.*, 49, 57, 1976.

³⁹⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9e#Rotation_galactique

³⁹⁷ <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec16.html>

Les objets du halo ont une rotation lente et des orbites excentriques, alors que ceux du disque tournent rapidement. La partie située à moins de 2 000 al (600 pc) du centre galactique semble même tourner de façon solidaire à une vitesse angulaire uniforme, donc avec une vitesse linéaire proportionnelle à la distance du centre de notre galaxie.

Dans le reste du disque, où se trouve le Soleil, la vitesse angulaire des objets décroît tellement vite que la vitesse linéaire de rotation reste quasiment égale à 220 km/s depuis 3 200 al (1 kpc) du centre jusqu'à 50 000 al (15 kpc) (Figure 62).

Ainsi, si la période de révolution galactique du Soleil, situé à 28 000 al (8,6 kpc) du centre galactique, est évaluée à 226 millions d'années, une étoile située à 3 200 al (1 kpc) fera le tour de notre galaxie en 26 millions d'années seulement. Le Système solaire aurait donc effectué entre 20 et 21 révolutions galactiques depuis sa formation voici 4,55 milliards d'années.

Il semblerait qu'on ait sous-estimé la vitesse de rotation de notre galaxie. Les résultats publiés en 2009 d'un suivi des étoiles les plus brillantes de notre galaxie par un réseau de 10 radiotélescopes, laissent penser qu'au niveau du soleil, la galaxie tourne à une vitesse de 254 km/s, soit 15 % de plus que l'estimation précédente, ce qui pourrait signifier que la masse de la galaxie puisse aussi être revue à la hausse (peut-être de 50 %).

Le fait que la vitesse de rotation ne décroît pas avec la distance, contrairement au résultat attendu avec des orbites képlériennes, a conduit les astrophysiciens à postulé l'existence d'une matière noire. Cette matière constituerait environ le quart de l'énergie de l'Univers. Aujourd'hui (2014), aucune expérience de physique n'a pu mettre en évidence directement l'existence de cette matière³⁹⁸.

Origine de la structure spirale

La théorie des ondes de densité de Charles Lin et Frank Shu, sur une idée de Bertil Lindblad, a conduit à la première interprétation claire de l'existence des bras spiraux dans une galaxie³⁹⁹⁴⁰⁰. Il s'agit d'une augmentation locale de la densité qui se propage avec une vitesse plus lente que les étoiles et le gaz. Cette surdensité conduit à la formation d'étoiles massives. Ces étoiles, très brillantes et évoluent très vite. Cela crée une sur-luminosité, conduisant à la perception de ces ondes sous la forme de bras.

On trouve donc dans les bras des étoiles chaudes (O et B), en associations ou dans des amas. Elles illuminent le gaz environnant, conduisant aux régions HII. L'onde passant, ces étoiles évoluant rapidement, il ne reste plus que les étoiles de plus faible masse, plus rouges et moins lumineuses. Compte tenu que la vitesse plus faible des bras par rapport à ces étoiles, les étoiles sembleront traverser les bras.

4. Le centre galactique

La Barre

Nous avons mentionné l'existence de cette structure. La barre a dans sa plus grande dimension 4 kpc, en faisant un angle de 20° par rapport à la ligne de vue.

³⁹⁸ http://fr.wikipedia.org/wiki/Mati%C3%A8re_noire

³⁹⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Spiral_arm#Spiral_arms

⁴⁰⁰ Lin, C. C.; Shu, F. H. (August 1964). "On the spiral structure of disk galaxies". *The Astrophysical Journal* **140**: 646–655

Une barre secondaire de dimension 150 pc a été mise en évidence. Elle est entourée d'un anneau de gaz moléculaire de 200 pc de rayon.

La barre joue un rôle essentiel dans la formation des ondes spirales. À l'extrémité de la barre, les étoiles et le gaz sont en co-rotation avec le bras. On devrait s'attendre à deux bras spiraux prenant naissance à l'extrémité de la barre. L'existence de quatre bras spiraux, et de bifurcations dans les bras a conduit à une théorie plus complexe de la formation en introduisant de la contamination d'étoiles formées sur des nuages moléculaires⁴⁰¹.

L'environnement central



Figure 63 L'anneau circumnucléaire de la Voie lactée observées par le télescope spatial Hubble et l'instrument stratosphérique SOFIA en Infrarouge⁴⁰².

Au fur et à mesure qu'on se rapproche du Centre galactique, la morphologie des objets observés devient de plus en plus complexe. Sur la Figure 63 on a porté les résultats obtenus dans la région centrale, appelée anneau circumnucléaire, de diamètre de 20 al. Les images ont été obtenues avec le télescope spatial Hubble (caméra NICMOS en infrarouge) et l'instrument stratosphérique SOFIA/NICMOS en lointain infrarouge. En combinant les images, les astronomes ont séparés d'une part la partie stellaire présentant une forte concentration vers le centre, d'autre part le gaz ionisant montrant une structure en T inversée, non interprétée et la poussière chaude, avec le même T inversé et un anneau plus contrasté. On trouvera une description et une analyse plus complète dans l'article de Katia Ferrière en référence⁴⁰³.

Le trou noir central

Le centre galactique est d'abord le centre de rotation de la Galaxie⁴⁰⁴. Il se situe à environ 26000 al du Soleil dans la direction du Sagittaire. Il n'est pas observable des rayons X au

⁴⁰¹ F. Combes, J. Lequeux. La Voie lactée, p. 106. EDP Sciences, 2013.

⁴⁰² <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a030000/a030400/a030497/>

⁴⁰³ K. Ferrière. Interstellar gas within ~10 pc of Saggittarius A*. Astron. Astroph. 540, A50, 2012.

⁴⁰⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_galactique

rouge. Il a fallu attendre le progrès des détecteurs dans l'infrarouge et en radioastronomie pour l'identifier. Il est aussi visible dans les rayons X durs et les rayons gamma.

La source radio Sagittaire A a été identifiée comme la région centrale⁴⁰⁵. À l'intérieur de ce complexe, la source quasi ponctuelle Sagittaire A^{*}⁴⁰⁶ est considérée aujourd'hui comme le centre de la galaxie. On a pu mesurer le diamètre de cet objet en radioastronomie (VLBI). On a obtenu environ 37 microsecondes d'arc à la longueur d'onde de 1,3 mm⁴⁰⁷. Une mesure de 1 microseconde d'arc a été reportée pour la longueur d'onde de 7mm⁴⁰⁸. Cela conduirait à un objet dont la taille est de l'ordre de l'orbite terrestre.

La masse de Sagittaire A^{*} a été estimée grâce au mouvement d'une trentaine d'étoiles orbitant autour, avec une période d'une quinzaine d'années. La valeur admise aujourd'hui est autour de 4,3 millions de masse du Soleil⁴⁰⁹. On estime que, compte tenu de la limite de diamètre obtenu, le centre serait un trou noir massif. Ces objets sont caractérisés par un horizon en-deçà duquel la lumière, comme toute matière, ne peut sortir⁴¹⁰.

Le rayon de Schwarzschild définit l'horizon. Il ne dépend que de la masse:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Il serait de 13,3 millions de km pour le trou noir central. On ne peut donc pas détecter de l'énergie émise en-deçà de ce rayon. Néanmoins si de la matière est à proximité, elle est attirée par le trou noir central et finirait par y disparaître. L'*Inner Stable Circular Orbit* est le rayon de la dernière orbite stable. Il vaut 3 fois le rayon de Schwarzschild. Pour Sgr A^{*}, il est inférieur à la limite de résolution. Les mesures effectuées du diamètre ne concerne donc pas celles du trou noir, mais de la matière orbitant autour.

L'activité du noyau

Sgr A^{*} n'est pas un noyau actif comme on peut le voir dans bon nombre de galaxies, le plus souvent très lointaines⁴¹¹. Ces objets (*Active Galaxy Nuclei* ou AGN) sont souvent présents au centre d'une galaxie. On pense qu'il s'agit d'un trou noir central accrétant de la matière contenue dans un disque qui l'entoure. Lors de cette accrétion, de la lumière est émise dans les grandes énergies (X et gamma). Une partie de l'énergie est réémise par un jet perpendiculaire au disque. Cette énergie provient de la lumière synchrotron émise par les électrons du jet. La lumière synchrotron a un spectre très caractéristique, dans tous les domaines d'énergie.

L'activité du noyau dépend de l'alimentation du trou noir. On constate d'ailleurs que les quasars (objets emblématiques de cette classe d'astres) sont des objets très variables en luminosité.

⁴⁰⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A

⁴⁰⁶ en.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*, http://fr.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*

⁴⁰⁷ S.S. Doeleman et al. Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre. *Nature*, 455, 78-80, 2008.

⁴⁰⁸ Z.Q. Shen et al. A size of ~ 1 AU for the radio source Sgr A^{*} at the centre of the Milky way. *Nature*, 438, 62-64, 2005.

⁴⁰⁹ S. Gillessen et al. Monitoring stellar orbits around the massive black hole in the galactic center. *Astroph. J.* 692, p. 1075-1109, 2009.

⁴¹⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/Trou_noir

⁴¹¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Galaxie_active

Si Sgr A* n'est pas actif, c'est qu'il n'est pas alimenté par l'accrétion d'étoiles ou de matière interstellaire. Un nuage de gaz (G2) a été détecté dans son environnement⁴¹², mais il est passé trop loin du rayon de Schwarzschild pour être accrété⁴¹³.

L'observation du centre galactique est trop récent pour avoir une idée sérieuse de l'histoire des accrétions de Sgr A* depuis la naissance de la Terre et sur son influence sur la vie terrestre.

5. L'environnement de la Galaxie

Le Groupe local

La Galaxie n'est pas un objet isolé, mais appartient à un petit groupe de galaxies, appelé le Groupe local. Edwin Hubble avait introduit cette structure dans son ouvrage *The realm of nebulae* en 1936⁴¹⁴. Alors qu'il avait indiqué une douzaine de galaxies dans ce groupe, aujourd'hui on en compte une quarantaine.

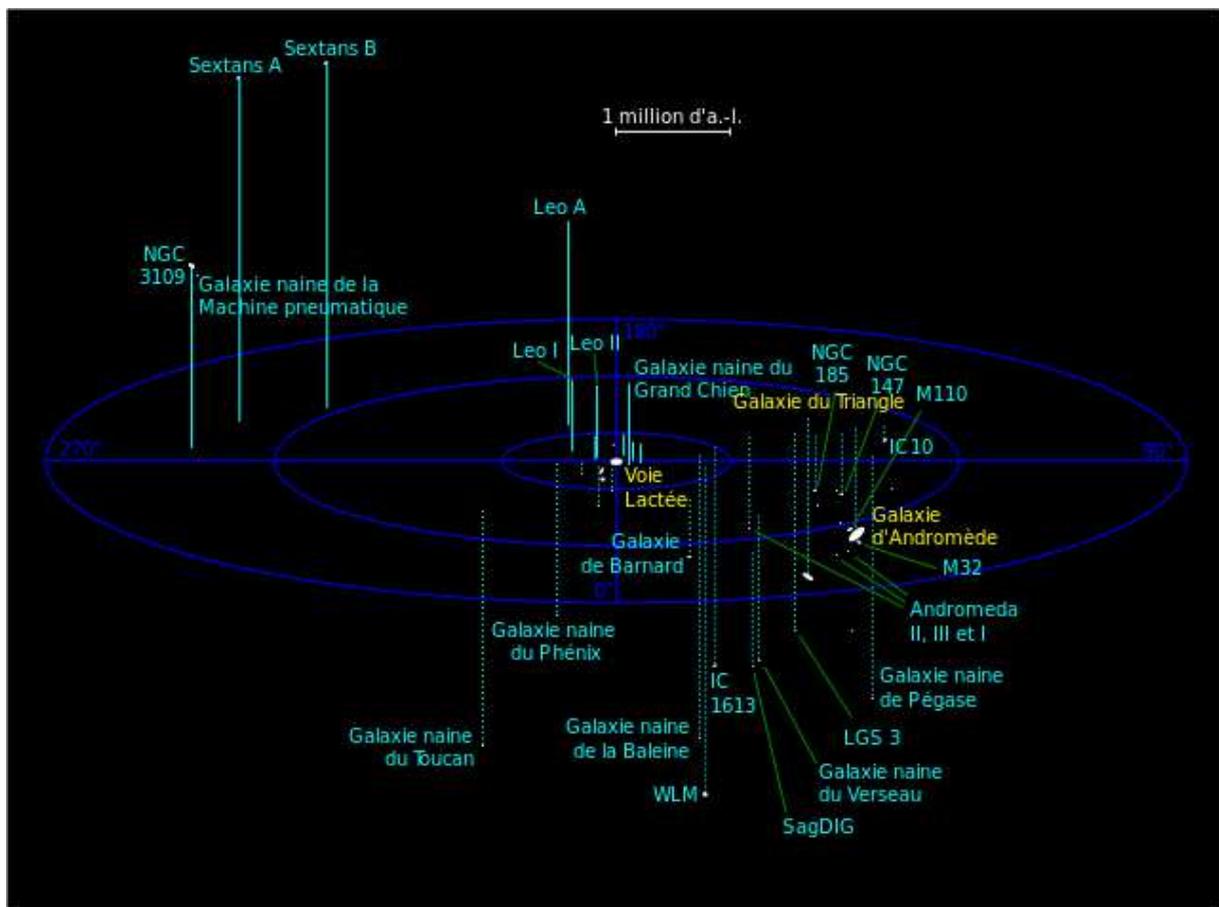


Figure 64 Les galaxies principales du Groupe local⁴¹⁵.

⁴¹² S. Gillesen et al. A gas cloud on its way towards the supermassive black hole at the Galactic centre. *Nature*, 481, 51-54, 2012.

⁴¹³ A.M. Ghez et al. Detection of Galactic center source G2 at 3.8 micron during periape passage around the central passage. *The astronomer's telegram*, 2 May 2014.

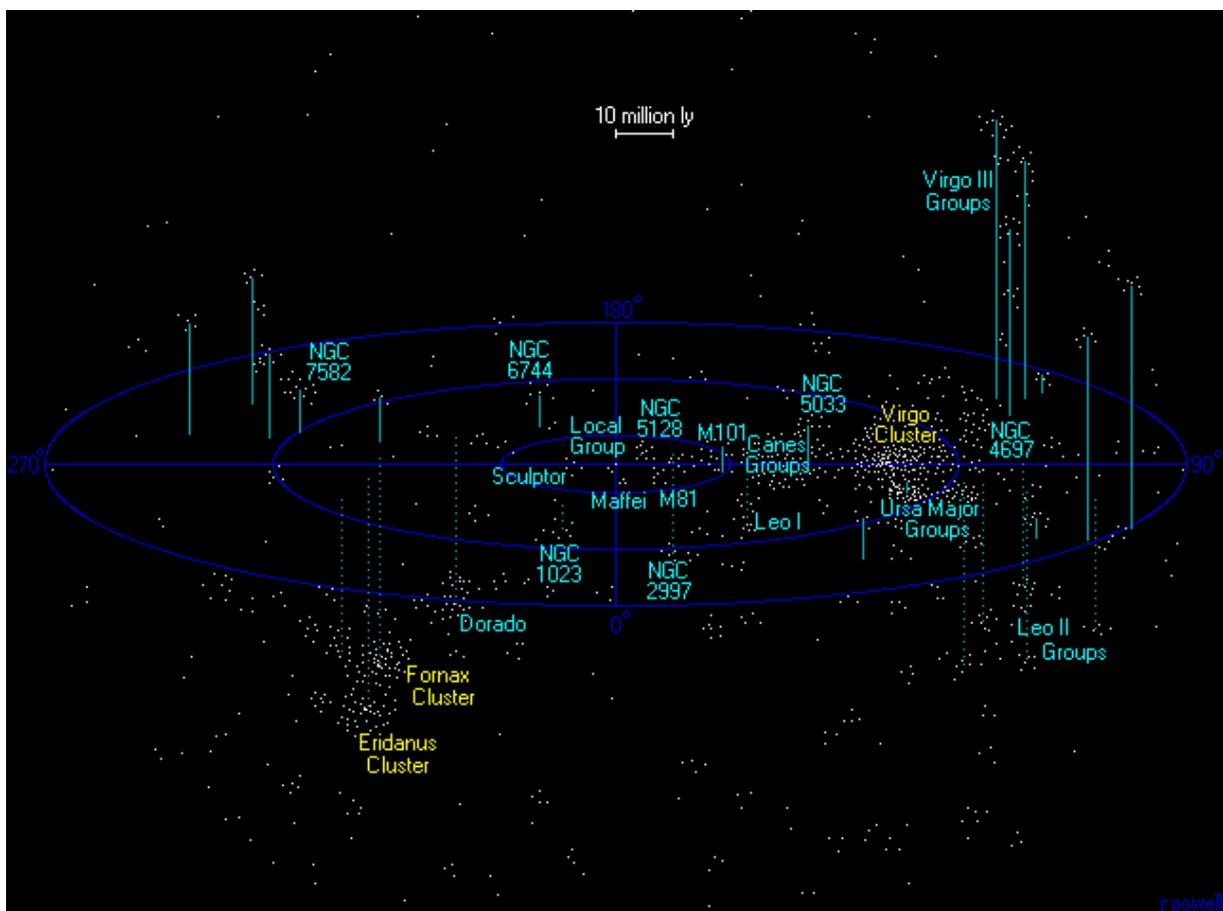
⁴¹⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_local

⁴¹⁵ http://fr.wikipedia.org/wiki/Groupe_local

Sur la Figure 64 les galaxies principales du Groupe local ont été reportées. La taille de ce groupe est de l'ordre de 3 Mpc, soit environ 10 millions d'al. La Voie lactée et la galaxie d'Andromède (M31) en sont les plus massifs. Plusieurs objets sont des satellites de notre galaxie (les nuages de Magellan), d'autres de M31 (M32). D'autres ne sont liés que par le groupe.

Cette structure a évolué depuis la création de la Galaxie. On a cru longtemps que les Nuages de Magellan avait été accrétés par notre Galaxie et qu'ils avaient fait plusieurs tours. Des observations récentes, obtenues avec le télescope spatial Hubble contredisent cette hypothèse⁴¹⁶.

La galaxie naine du Sagittaire⁴¹⁷ a été découverte en 1994⁴¹⁸. On ne sait pas si elle a commencé à être absorbée par notre galaxie. Elle est susceptible de pénétrer dans le disque galactique dans 100 millions d'années. La galaxie naine du Grand Chien, découverte en 2003⁴¹⁹, est encore plus proche⁴²⁰. Elle a déjà été partiellement détruite par les effets de marée de la Galaxie.



⁴¹⁶ <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astronomie-revelation-nuages-magellan-ils-ne-seraient-pas-satellites-voie-lactee-12910/>

⁴¹⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Sagittaire_%28galaxie_naine%29

⁴¹⁸ Rodrigo Ibata, M. Irwin & G. Gilmore, A Dwarf Satellite Galaxy in Sagittarius, *Nature*, 370, 194-196 (1994)

⁴¹⁹ N. F. Martin et al., A dwarf galaxy remnant in Canis Major: the fossil of an in-plane accretion onto the Milky Way, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 348, 12-23 (2004)

⁴²⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/Grand_chien_%28galaxie_naine%29

Figure 65 Le superamas de la Vierge en coordonnées supergalactiques.

L'observation des courants d'étoiles dans le halo a montré l'importance de la cannibalisation de petites galaxies pour expliquer l'évolution de la Galaxie⁴²¹.

Le superamas de la Vierge

Le Groupe local n'est pas la structure la plus grande formée par les galaxies auxquelles la Voie lactée appartient. Il est contenu dans un ensemble de plus grande échelle, le superamas de la Vierge, ou superamas local⁴²² (Figure 65). Cette ensemble d'une centaine de groupes ou d'amas a un diamètre de 33 Mpc, soit environ 110 millions d'al. Il est dominé par l'amas de la Vierge, au centre de laquelle se trouve la galaxie M87, caractérisée par un curieux jet optique.

Structure à plus grande échelle

Plus récemment une équipe autour B.R.Tully a présenté des reconstructions de la densité basées sur les vitesses des galaxies conduisant à l'existence d'une très grande structure, contenant le superamas de Virgo, et qu'ils ont appelé le superamas Laniakea⁴²³ (Figure 66). Cette structure aurait une dimension d'un demi-milliard d'al.

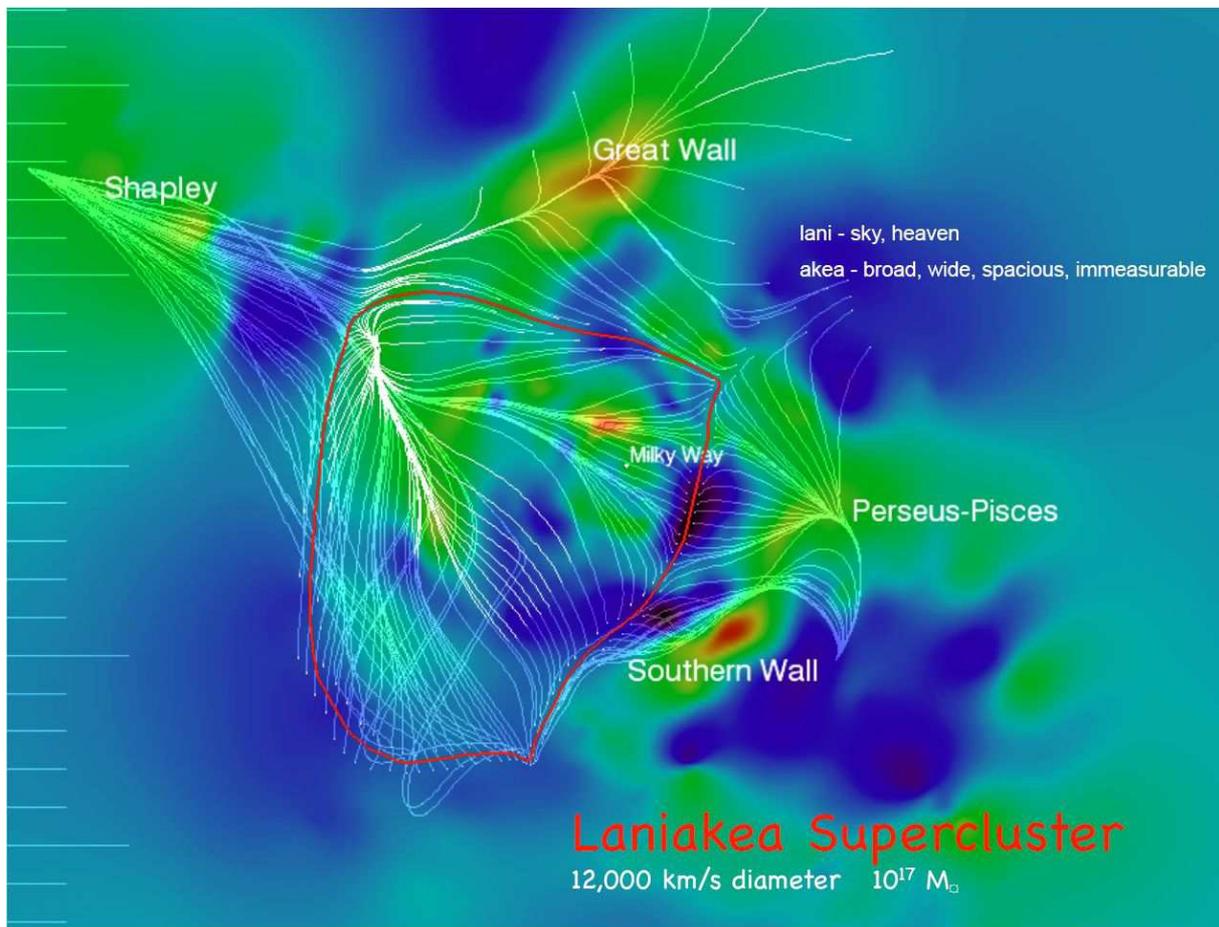


Figure 66 Flot de vitesse et densité de galaxies dans le superamas Laniakea (d'après Tully et al.).

⁴²¹ F. Combes, J. Lequeux. La Voie lactée, p. 150. EDP Sciences, Paris, 2013.

⁴²² http://en.wikipedia.org/wiki/Virgo_Supercluster

⁴²³ <http://www.iap.fr/activites/seminaires/IAP/2014/presentations/Tully.pdf>

6. Le Soleil dans la Galaxie

Position du Soleil

Le Soleil se trouve à environ 27 000 al du centre galactique, mais à seulement 50 al du plan équatorial.

C'est la position actuelle, mais depuis la formation du Système solaire, il a sans doute beaucoup voyagé dans la Galaxie, le Soleil ayant une vitesse particulière par rapport aux étoiles jeunes et aux nuages d'hydrogène, considérés comme les marqueurs du mouvement de la Galaxie.

Les bras spiraux

La rotation de la Galaxie est déterminée par le mouvement des étoiles jeunes et des nuages d'hydrogènes. Les bras spiraux contiennent ces objets, mais cette composante est une structure en évolution, formées par les étoiles à leur naissance et les nébuleuses associées. Comme nous l'avons vu, en 1964 C.C. Lin et Frank Shu ont apporté une explication claire, les bras sont formés en raison de la propagation dans le disque galactique d'ondes de densité⁴²⁴
425

Ces ondes créent une surdensité locale. Ceci conduit à l'effondrement de la matière interstellaire sous la forme d'étoiles, ou de groupes d'étoiles. Les étoiles les plus massives se forment d'abord. Leur luminosité est intense, avec une part notable de lumière ultra-violette. Celle-ci ionise la matière interstellaire proche. Tout se conjugue pour que les ondes de densité soient visibles par une sur-luminosité, accentuée dans l'Ultra-violet ou dans les raies excitées de l'OII ou en lumière Halpha, de l'hydrogène ionisé.

Le mouvement des bras spiraux

Ce mouvement ne peut être directement mesuré sur les spectres par effet Doppler. C'est seulement par simulation de la dynamique de la Galaxie qu'on peut déduire la vitesse angulaire du bras à une distance donnée du centre galactique. Elles montrent que⁴²⁶:

- Les bras semblent tourner sans se déformer à l'échelle de 200 millions d'années, entre deux points correspondant aux résonances de Lindblad interne et externe (ILR et OLR). Cette échelle de temps dépend du contenu en gaz.
- Pour notre galaxie, ILR se situe à 200 pc du centre, c'est-à-dire à la distance de l'anneau moléculaire. OLR situe au delà du Soleil à près de 10 kpc.
- Les bras tournent à la vitesse angulaire de l'extrémité de la barre. Autrement dit, le point de corotation est à cette distance du centre.

Le mouvement des étoiles à l'extérieur de la barre est donc plus rapide, en vitesse angulaire que les bras spiraux.

Modèle de Gies et Helsel

En 2005, D.E.Gies et J.W.Helsel ont modélisé le mouvement du Soleil par rapport aux bras spiraux, en utilisant les données astrométriques de la mission Hipparcos de l'ESA⁴²⁷.

⁴²⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Density_wave_theory

⁴²⁵ Lin, C.C.; Shu, F.H. (1964). "On the spiral structure of disk galaxies". *Astrophysical Journal* 140: 646–655.

⁴²⁶ F. Combes, J. Lequeux. *La Voie lactée*, chapitre 5. EDP Sciences, Paris, 2013.

Plusieurs choix de vitesse des bras ont été plus ou moins arbitrairement choisis, pour ajuster au mieux les passages dans les bras avec des événements

Les résultats du modèle

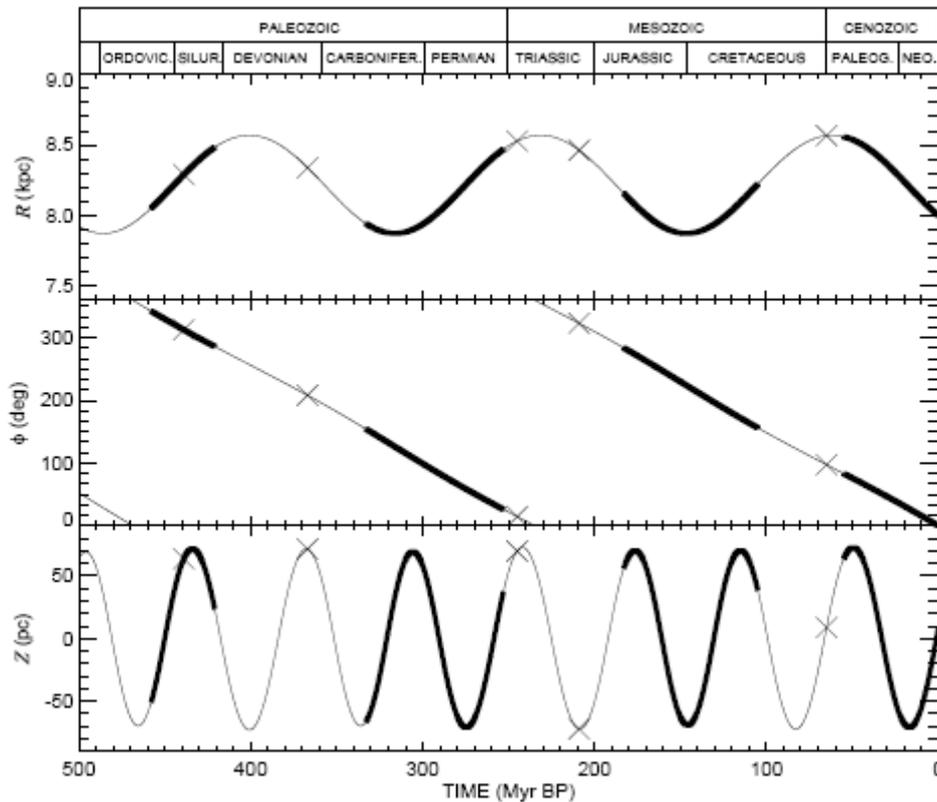


Figure 67 Position du Soleil ces 500 dernières années dans la Galaxie. R est la distance au centre, Φ la position azimutale et Z la hauteur au dessus du plan galactique. Les croix correspondent aux 5 principales extinctions massives. En gras les auteurs ont porté les grandes phases d'âges glaciaires.

La Figure 67 et la Figure 68 montrent clairement qu'il n'y a pas une évidente corrélation entre les extinctions massives et la traversée des bras de la Galaxie par le Système solaire. Cela marche bien pour la dernière extinction, la K-T. Le Soleil sortait alors du bras Sagittaire-Carène. Les trois suivantes sont hors des bras. Par contre, la dernière, celle de l'Ordovicien-Silurien se situe lors d'un passage dans le bras de Persée. La traversée des bras semble bien corrélée avec les grandes périodes glaciaires.

On sait que les périodes glaciaires du Quaternaire sont liées à variations de l'inclinaison de l'axe polaire et de l'excentricité de l'orbite terrestre. Les passages par les bras correspondent à des périodes de glaciation de beaucoup plus grande période.

Bien qu'il n'y ait pas une grande évidence entre les extinctions massives et l'orbite du Soleil par rapport aux bras, nous allons examiner les différents effets pouvant conduire à un lien entre les pérégrinations du Soleil et l'évolution des espèces.

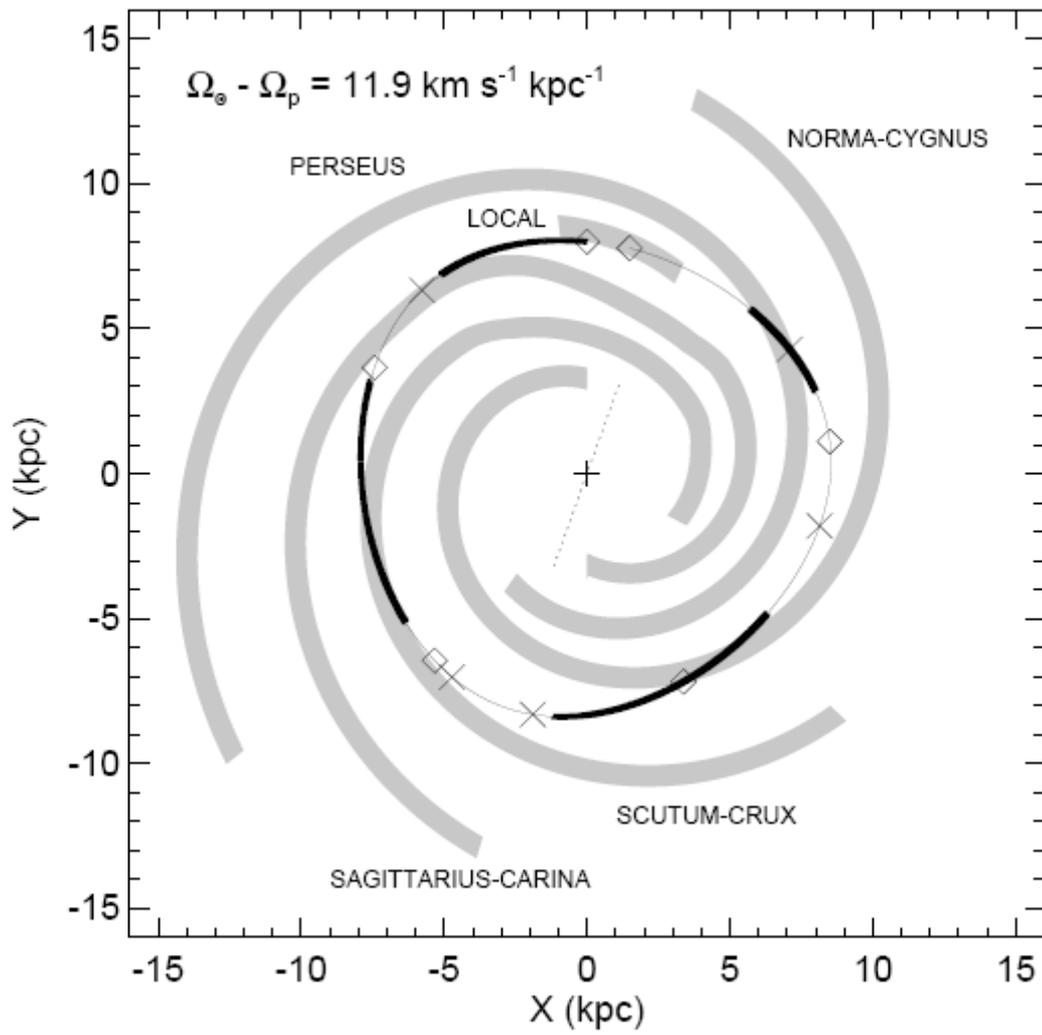


Figure 68 du Soleil par rapport aux bras spiraux, dans l'hypothèse d'une vitesse des bras spiraux de 14,4 km/s/kpc. Les losanges correspondent à des positions du Soleil tous les 100 Ma.

Chapitre 6 : la Galaxie et l'évolution des espèces

1. Extinctions massives et passages dans les bras

Influence de la Galaxie sur le nuage de Oort

Cette influence pourrait être de trois types :

- Un effet de marée, créant une petite force dans la direction du centre galactique
- Une perturbation gravitationnelle par une structure dense, comme un Grand Nuage Moléculaire
- Le passage très proche d'une étoile.

Ces éventualités avaient envisagées par Clube & Napier en 1982⁴²⁸, puis par de nombreux auteurs.

On peut remarquer la période trouvée par Rohde & Muller est de 62 Ma est proche de la période de 65 Ma d'oscillation du Soleil par rapport au plan galactique.

Celle de 27 Ma ne correspond à aucune particularité du mouvement. On aurait pu imaginer que ce soit la première harmonique du mouvement précédent, mais l'écart de 5 Ma est au-delà des barres d'erreur.

Celle de 140 Ma est proche à la fois de celle correspondant à la variation de la distance du Soleil par rapport au centre de la Galaxie et de la période entre deux traversées des bras spiraux. Curieusement les extinctions semblent s'être produites lors d'une distance importante par rapport au centre galactique.

Passages proches

Des calculs ont été effectués pour vérifier si une étoile aujourd'hui située au voisinage du Soleil s'en était approchée significativement dans le passé ou allait s'en rapprocher dans un futur proche. Une étude menée en 1999 a montré que l'étoile la plus susceptible d'avoir causé des perturbations dans le Nuage d'Oort suite à un passage rapproché du Soleil a été Algol, il y a 7,3 millions d'années⁴²⁹.

La perturbation la plus importante, calculée sur une période de 10 millions d'années, est celle causée par Gliese 710, qui se trouvera dans 1,4 million d'années dans le Nuage d'Oort. Lors de ce passage rapproché, elle causera un excès estimé d'une comète par an, plongeant vers le Système Solaire interne, ce qui représente une augmentation du taux de comètes relativement modeste et n'ayant pas de probabilité notable de produire un événement catastrophique conduisant à une extinction. Il n'est par contre pas possible d'effectuer la même analyse pour des époques plus anciennes car les mesures des mouvements propres et parallaxes des étoiles concernées, beaucoup plus distantes sont trop imprécises à l'heure actuelle.

⁴²⁸ Victor Clube and Bill Napier, *The Cosmic Serpent*, Publ. 1982 Faber and Faber

⁴²⁹ Joan García-Sánchez et al., « Stellar encounters with the Oort cloud based on Hipparcos data », *The Astronomical Journal*, vol. 117, p. 1042-1055 (1999)

L'analyse des données d'HIPPARCOS montre que l'étoile HIP 23641 passera de 146 al à 4-5 al dans 750000 ans! Elle devrait être aussi proche que Proxima Centauri (Figure 69⁴³⁰).

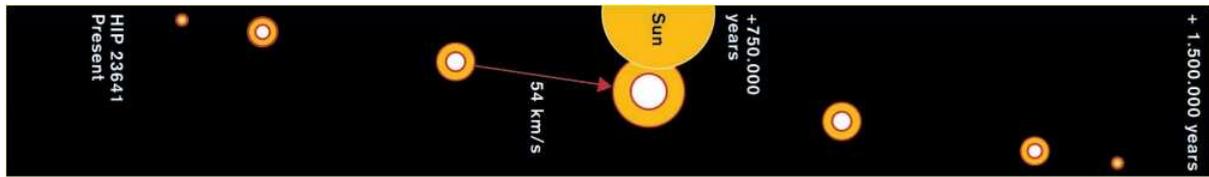


Figure 69 Passage de HIP 23461 près du Soleil d'après les données de la mission HIPPARCOS.

Pourrait-il y avoir des passages plus proches ? Ceci conduirait à une forte interaction avec le nuage de Oort. La statistique indique que cette occurrence devrait être plutôt importante lors des passages du Soleil dans le disque galactique.

La mission Gaia de l'ESA doit effectuer une cartographie de la Galaxie pour les étoiles jusqu'à la magnitude 20. Ceci permettra de préciser la distribution des étoiles avec leur position précise dans la Galaxie et leur vitesse. Par spectro-photométrie il sera possible de déterminer le type de chaque étoile. Cela permettra d'améliorer sensiblement le modèle de la dynamique de la Galaxie. Une meilleure connaissance du mouvement du Soleil dans la Galaxie en sera déduite.

Némésis pour des étoiles proches

Igor Yu. Potemine vient de publier un article sur ces éventualités de passages proches pour quelques étoiles⁴³¹. Il a utilisé les données HIPPARCOS suffisamment précises pour prédire ces mouvements.

Ainsi β et γ Virginis devront passer de 2,7 à 0,1 pc ; 61 Cygni – χ 1 Orionis de 10,2 à 0,1 pc.

Quatre autres exemples autour de 0,1 pc sont indiqués.

Collision entre étoiles

V838 Monocerotis (ou V838 Mon) est une étoile de la constellation de la Licorne⁴³². Le 6 janvier 2002, elle a produit un éclat très intense, devenant l'étoile la plus brillante de la galaxie. Ce flash stellaire illumine progressivement le nuage de poussières qui l'entoure, donnant l'impression d'éjecter une coquille de poussières. Cette illumination a été détectée en infrarouge grâce au télescope de 8 m Gemini à Hawaï.

Depuis cette date, l'astre est suivi de près par les scientifiques, notamment grâce au télescope spatial Hubble, car le phénomène qui a provoqué l'augmentation soudaine de sa luminosité était encore mal compris⁴³³. De récentes observations menées depuis 2008 suggèrent que cette brusque augmentation de luminosité serait la conséquence d'un fait extrêmement rare dans l'univers : la collision entre deux étoiles. Ce résultat devra être étayé par des observations supplémentaires.

⁴³⁰ <http://www.rssd.esa.int/SA/HIPPARCOS/include/education-extra.html>

⁴³¹ <http://arxiv.org/pdf/1302.3827.pdf>

⁴³² http://fr.wikipedia.org/wiki/V838_Monocerotis

⁴³³ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:V838_Monocerotis_expansion.jpg

2. Collision avec de Grands Nuages Moléculaires

Les Grands Nuages Moléculaires (GNM)⁴³⁴

Les nuages moléculaires sont des nébuleuses interstellaires qui ont une densité et une taille suffisante pour permettre la formation de l'hydrogène moléculaire. Comme il est difficile de détecter cette molécule, la molécule la plus employée pour tracer les molécules de H₂ est le monoxyde de carbone CO. Le rapport entre la luminosité du CO et la masse de H₂ est presque constant, bien qu'il y ait des raisons de douter de cette constante lors de l'observation de certaines autres galaxies.

Dans la Voie lactée, les nuages moléculaires représentent approximativement la moitié de toute la masse de gaz dans la région dans l'orbite du Soleil, faisant d'eux un composant significatif du disque galactique. Les catalogues des nuages montrent que la majeure partie de la masse moléculaire est concentrée dans l'objet le plus massif, qui comporte plusieurs millions de masses solaires.

Ils sont situés dans un plan d'environ 50-75 parsecs, beaucoup plus mince que les autres composants gazeux comme l'hydrogène atomique et ionisé. On pense qu'ils se trouvent principalement dans les bras en spirale, mais il est difficile de le vérifier, dans notre galaxie en raison de la difficulté d'estimer les distances, et dans d'autres galaxies parce que les observations à haute résolution (qui peuvent montrer clairement les bras en spirale) ne sont pas sensibles à un fond uniforme d'émission de CO.

Selon les connaissances actuelles, la création des étoiles aujourd'hui se produit exclusivement dans les nuages moléculaires. C'est une conséquence normale de leurs basses températures, de leurs densités relativement élevées et de l'observation que les grands nuages où se forment les étoiles sont fortement confinés par leur propre gravité (comme les étoiles, les planètes et les galaxies) plutôt que par une pression externe (comme les nuages dans le ciel). La preuve vient du fait que les vitesses des turbulences déduites par la largeur des raies de CO varient de la même manière que leur vitesse orbitale (cf. théorème du viriel).

La physique des nuages moléculaires est mal comprise et fortement débattue. Leurs mouvements internes sont régis par la turbulence dans un gaz froid et magnétisé dans lequel la vitesse des turbulences est fortement supersonique mais comparable aux vitesses des perturbations magnétiques. Cet état perd rapidement son énergie, exigeant soit un effondrement global soit une réinjection régulière d'énergie. En même temps, on sait que ces nuages sont perturbés par un certain processus, très probablement les effets provenant des étoiles massives proches, avant qu'une fraction significative de leur masse soit devenue des étoiles.

Les GNM et les extinctions massives

En 1998 Leicht & Vasisht, astronomes au Caltech, annoncent dans *New Astronomy*⁴³⁵ qu'il y a une forte corrélation entre deux extinctions massives et le passage dans les bras spiraux. L'événement K-T est associé à au passage dans le bras Sagittaire-Carène alors que la fin du Permien serait lié au passage dans le bras Ecu-Croix. Le travail de Gies et Heisel a confirmé ces occurrences.

⁴³⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_cloud

⁴³⁵ Leicht, G. Vasisht, "Mass Extinctions and the Sun's Encounters with Spiral Arms," *New Astronomy* 3 (1998), 51-56

L'idée que des extinctions pouvaient être liées à une interaction entre des Grands Nuages Moléculaires, de plusieurs milliers de masses solaires avec le Système solaire est apparue pertinente.

Napier en 2006 avait montré que l'âge des grands cratères (> 40 km) semblait obéir à une loi quasi périodique⁴³⁶. Avec Wickramasinghe il a montré en 2008 que l'interaction du Système solaire avec un GNM amplifiait considérablement le nombre d'impacts cométaires⁴³⁷.

Les GNM et l'interaction non gravitationnelle

Le dernier travail ne donne qu'une réponse partielle à l'origine des extinctions massives.

L'interaction avec les GNM n'est pas que gravitationnelle. Les GNM sont les fabriques des étoiles. Les étoiles massives, les premières formées, émettent une partie notable dans le domaine Ultra-violet. Nous en sommes protégés grâce à la couche d'ozone. Que se passerait-il si elle venait à disparaître ? Ceci est possible si le rayonnement cosmique devient trop intense.

Cette situation peut se produire à proximité des étoiles très chaudes ou dans l'environnement d'une supernova.

Grâce à l'analyse des météorites on peut déterminer le flux du rayonnement cosmique (CRF) avec le temps. Cela a conduit à un surprenant résultat.

3. Validité statistique des analyses

En Mars 2013 Feng et Bailer-Jones ont soumis un article examinant la validité de l'hypothèse de l'influence de l'orbite solaire sur la biodiversité terrestre⁴³⁸. Des analyses statistiques très sophistiquées ont été effectuées pour infirmer ou raffermir cette hypothèse.

Les résultats sont négatifs, les auteurs indiquent qu'avec les données disponibles il est possible de considérer que la distribution des extinctions est statistiquement uniforme.

On doit noter que cette étude n'examine que les extinctions massives. Par contre, les variations périodiques correspondent à l'analyse de l'ensemble des variations soit des populations soit des taux d'extinction.

4. Le rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique⁴³⁹ est le flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie (c'est-à-dire relativistes) qui circulent dans le vide interstellaire. On désigne également aujourd'hui les « rayons cosmiques » sous le nom d'astroparticules. Certaines de ces particules, de sources solaires, galactiques ou extragalactiques peuvent nous traverser, interférer avec l'ADN, traverser la roche et les bâtiments et profondément pénétrer les sols et les sous-sols planétaires.

⁴³⁶ W. M. Napier Evidence for cometary bombardment episodes MNRAS. 366, 977–982 (2006)

⁴³⁷ Wickramasinghe J.T. & Napier, W.M., "Impact cratering and the Oort Cloud", Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 387, 153, 2008.

⁴³⁸ F.Feng, C.Bailer-Jones. Assessing the influence of the solar orbit on terrestrial biodiversity. ArXiv: 1303.6121v1.pdf

⁴³⁹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayon_cosmique

Historique

Son histoire commence en 1900, lorsque Charles Thomson Rees Wilson découvre que l'atmosphère est continuellement ionisée. Il pense alors que c'est dû au rayonnement naturel de la Terre. Ses recherches sur l'électricité atmosphérique, l'ionisation et la condensation le conduisent à concevoir la première chambre à brouillard. Mais rapidement, les scientifiques de l'époque sont intrigués par l'excès d'ions par rapport à la quantité normalement due au rayonnement naturel du sol. En 1912, le physicien autrichien Victor Franz Hess mesure le taux d'ionisation en fonction de l'altitude avec un électromètre à feuille d'or embarqué dans un ballon. L'ionisation décroît jusqu'à 700 m, puis croît au-delà. Il y a peu de différences entre le jour et la nuit. Hess en conclut à l'origine cosmique (c'est-à-dire en dehors du système solaire) de ce rayonnement. Ces résultats sont confirmés par Robert Millikan qui travaille à l'aide de ballons sondes. Hess pense également que ces rayons sont électriquement neutres. Cette affirmation est démentie dès 1928 où l'on montre que l'essentiel du rayonnement atteignant la surface de la Terre est constitué de particules chargées. Millikan suppose alors que ces dernières résultent de l'interaction entre les rayons neutres de l'espace (rayonnement gamma) et les molécules de l'atmosphère. Arthur Compton démontre que le rayonnement est en fait variable suivant la latitude où il est mesuré (plus faible à l'équateur qu'aux pôles) du fait de l'influence du champ magnétique terrestre, prouvant par cela même qu'il s'agit de particules chargées.

En 1938, l'astronome français Pierre Auger découvre que ces particules forment des gerbes atmosphériques. Ces particules sont dites « secondaires », par opposition aux particules « primaires » constituant le flux avant interaction avec l'atmosphère.

Le rayonnement cosmique est pour sa partie chargée principalement de protons (entre 85 et 90 %) et de noyaux d'hélium (de 9 à 14 %), le reste étant constitué d'électrons, de différents nucléons (noyaux d'atomes) ainsi que de quantités infimes d'antimatière légère (antiprotons et positrons). La partie neutre est quant à elle constituée de rayons gamma ainsi que de neutrinos. Cette dernière n'est pas toujours décomptée dans le rayonnement cosmique.

Les particules primaires (arrivant sur l'atmosphère) ont une énergie qui peut atteindre 10^{20} eV. En dehors des neutrinos, les particules détectées au sol sont essentiellement des particules secondaires issues de gerbes atmosphériques, d'énergie bien inférieure.

La particule la plus abondante au niveau de la mer est le muon, car celui-ci interagit peu avec la matière : on en dénombre en moyenne un par centimètre carré par minute. Malgré sa durée de vie de $2,2 \mu\text{s}$, qui correspond à une distance maximale de 660 m à la vitesse de la lumière, le muon parcourt des distances beaucoup plus grandes grâce à l'effet de dilatation du temps prédit par la relativité restreinte.

Les basses énergies viennent surtout du soleil, les énergies intermédiaires des rayons cosmiques galactiques, et les plus hautes énergies sont extragalactiques

Son spectre est manifestement « non-thermique », c'est-à-dire qu'il ne résulte pas de l'émission d'un corps à une température donnée (spectre de corps noir). La pente de la droite montre que le flux décroît rapidement selon une loi de puissance. L'exposant de la loi de puissance est appelé l'indice spectral. Sa valeur globale est de 2,8.

Il existe toutefois deux ruptures de pente remarquables:

- La première, à 5.10^{15} eV est surnommée le « genou » (flux : 1 particule/m²/ans). L'indice spectral passe d'environ 2,7 à 3,0.
- La seconde, située à 4.10^{19} eV est surnommée la « cheville » (flux : 1 particule/km²/an) l'indice spectral passe à 3,3.

Origine

Les particules les plus énergétiques proviennent de l'espace interstellaire et intergalactique. Une partie de ces particules est déviée par le vent solaire qui apporte pour sa part essentiellement des ions et des électrons.

Les connaissances actuelles permettent d'expliquer l'accélération des particules jusqu'au niveau du « genou » par des processus astrophysiques violents. Elles auraient pour origine l'explosion de supernovas, selon l'hypothèse émise en 1949 par le physicien italien Enrico Fermi, mais cela n'est pas confirmé actuellement. D'autres sources sont pressenties, qui font appel aux phénomènes astronomiques les plus énergétiques connus dans la nature : noyau actif de galaxie, sursaut gamma, trou noir, hypernovas, etc. En poussant ces modèles, il est possible de trouver une explication à l'accélération de particules jusqu'à 10^{20} eV. Cependant, le manque d'information sur les rayons cosmiques à de si hautes énergies ne permet pas de contraindre ces modèles.

Ainsi, leur provenance est encore en partie un mystère, mais qui devrait bientôt s'éclaircir avec la mise en service depuis 2004 de l'Observatoire Pierre Auger à Malargüe en Argentine. Pour les particules les plus énergétiques, les zêta-particules, au-delà de la cheville (4.10^{19} eV) les observations restent encore très peu nombreuses (moins d'une gerbe par an dans des observatoires très spécialisés comme le Fly's Eye de l'Université de l'Utah ou l'Akeno Giant Air Shower Array (Réseau d'Akeno pour les Cascades Géantes Atmosphériques).

Périodicité dans le flux de rayonnement cosmique

Dans un article fondamental Nir Shaviv⁴⁴⁰ a introduit l'idée que le rayonnement cosmique était à l'origine des grandes périodes glaciaires. Pour cela, il a analysé les données isotopiques du potassium de 40 météorites et il a pu en déduire que ce rayonnement était variable, avec une période bien marquée (contraste de 3 entre le minimum et le maximum) de 143 Ma.

Il a bien sûr fait le lien entre cette périodicité et l'orbite du Soleil dans la galaxie, avec les passages dans les bras spiraux, fournissant une théorie cohérente du lien entre le mouvement du Soleil et les grandes périodes d'âge glaciaire.

Il est bien évident que la coïncidence entre la périodicité de 143 Ma trouvée par Shaviv et la périodicité de 140 Ma trouvée dans la variation du taux d'extinction des espèces marine obtenue par Rohde et Muller ne semble pas fortuites ; d'autant plus, que cette périodicité correspond à celle de la variation de la distance du Soleil au centre de la Galaxie, mais aussi à la périodicité du passage du Soleil dans les bras spiraux.

En outre les maxima du CRF correspondent, à un petit décalage près expliqué dans son article, à la traversée du Soleil dans les bras spiraux.

Cette relation peut s'expliquer dans le cadre de la Cosmoclimatologie.

⁴⁴⁰ Nir Shaviv (2003), "The Spiral Structure of the Milky Way, Cosmic-Rays and Ice-Age Epochs on Earth", *New Astronomy* **8**: 39-77, [arXiv:astro-ph/0209252](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0209252)

5. La Cosmoclimateologie⁴⁴¹

Lien entre le climat et le rayonnement cosmique

En 1959, E.P. Nay a suggéré que les rayons cosmiques pouvaient, par leur action ionisante, avoir une influence météorologique. Mais ce sont les Danois Henrik Svensmark et Friis-Christensen qui ont apporté en 1997 des premiers éléments pour étayer cette thèse.

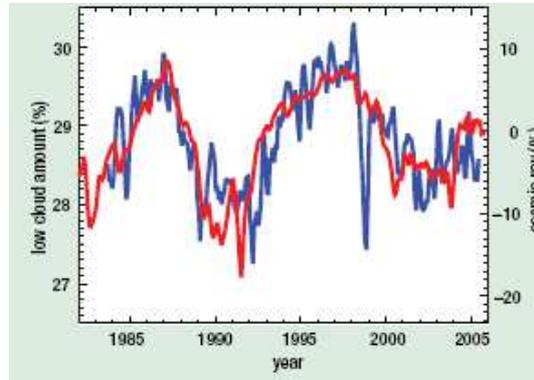


Figure 70 Comparaison du taux de couverture nuageuse à basses altitudes (moins de 2 km) avec les variations du taux de rayonnement cosmique.

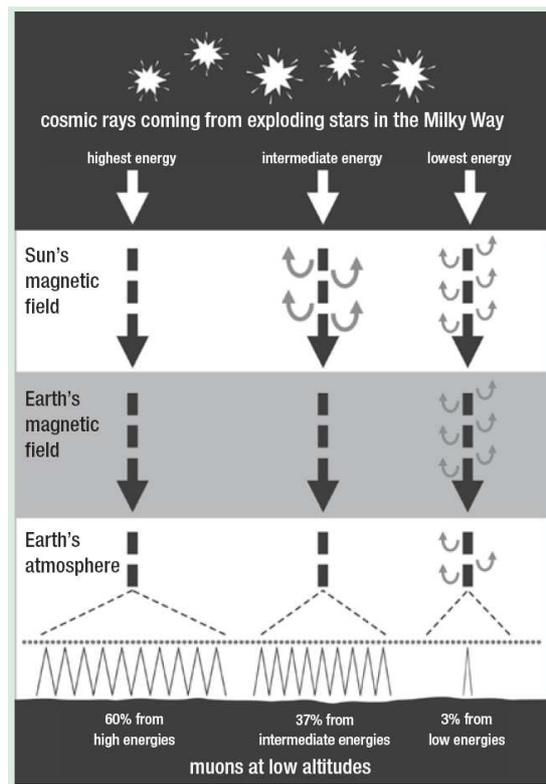


Figure 71 Mécanisme de formation des nuages à partir du rayonnement cosmique d'après Svensmark (2007).

⁴⁴¹ Henrik Svensmark (2007). "Astronomy & Geophysics Cosmoclimateologie: a new theory emerges". Astronomy & Geophysics 48 (1): 1.18–1.24.

Sur la Figure 70 on peut voir en bleu le taux de couverture nuageuse à basse altitude (moins de 2 km) et, en rouge, les variations du taux de rayon cosmique (Svensmark, A&G, 2007, 48, 1.18-1.24). La corrélation semble excellente.

Cette corrélation est expliquée physiquement par la pénétration des particules jusque dans les basses atmosphères (Figure 71).

Les particules cosmiques les plus énergétiques sont des muons qui proviennent des étoiles (majoritairement supernovae). Pour elles, le bouclier magnétique terrestre est insuffisant. De ce fait, ils arrivent jusqu'à la basse atmosphère ionisant l'atmosphère. Ce qui conduit à la formation de gouttelettes qui se condensent en nuages.

Interprétation du climat lors du minimum de Maunder

Sur la Figure 72 les variations du nombre de taches depuis 1600 ont été reportées. La courbe noire représente le nombre moyen de taches par cycle. Le minimum apparu au milieu du 17^e siècle et qui s'est poursuivi jusqu'au début du 18^e, apparaît clairement.

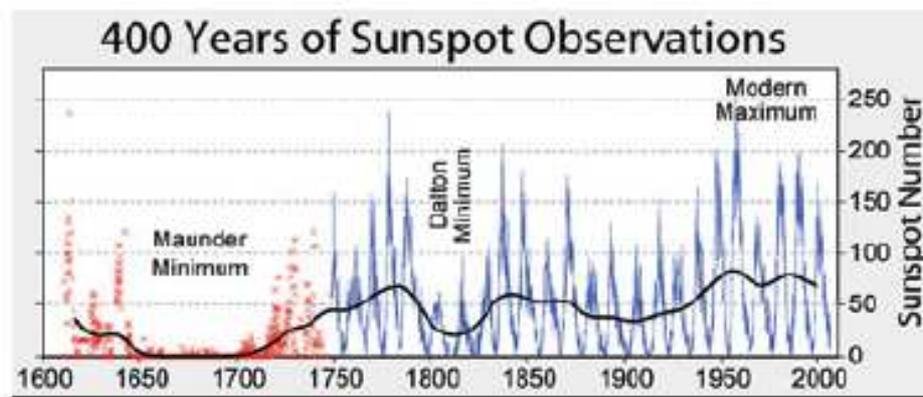


Figure 72 Variation de l'activité solaire à partir du compte de taches depuis 1600.

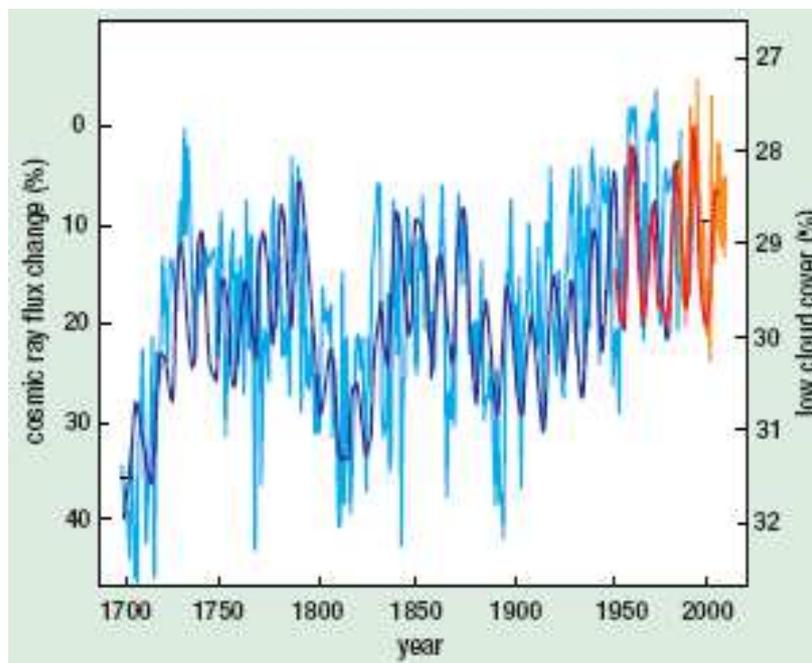


Figure 73 Variations dans le flux de rayons cosmiques galactiques depuis 1700.

Svensmark a déduit le flux de rayons cosmiques par deux procédés indépendants et il a comparé à la couverture nuageuse pour les périodes connues (1953-2005).

Sur la Figure 73 les courbes en bleu correspondent au flux de rayon cosmique galactique, alors qu'en orange les variations de la courbe nuageuses sont tracées après normalisation. Cette normalisation est effectuée grâce à une base de données sur les flux de rayonnement cosmique (climax, courbe rouge). Notons que les variations sont tracées avec l'échelle vers le bas.

Cette étude montre que le refroidissement lors du minimum de Maunder pourrait être dû à un excès de rayonnement cosmique, ayant conduit à une augmentation globale de la couverture nuageuse, donc à une réduction du réchauffement de la surface de la Terre par le Soleil.

Cet excès de CRF n'aurait pas son origine dans une variation intrinsèque du CRF galactique, mais dans une réduction de la protection du bouclier formé par le vent solaire, en raison du minimum d'activité solaire.

Ainsi le climat très froid lors du minimum de Maunder ne s'expliquerait pas par une diminution de la constante solaire, énergie reçue par la Terre, mais par une réduction de la protection magnétique de notre planète.

On peut noter le lien entre d'autres périodes climatiques froides, fin du 18^e siècle ou début du 20^e siècle.

Application au changement global du climat

Svensmark a aussi appliqué sa théorie pour interpréter le réchauffement global de la Terre depuis le début du 20^e siècle. Cela le conduit à un excès de 0,5° en un siècle. Cette thèse a conduit à une très forte controverse, l'explication développée par le GIEC étant basée sur le développement de l'effet de serre lié à l'activité humaine.

Svensmark l'étaye sur les résultats de l'expérience CLOUD qu'il a proposée au CERN sur la formation de nuages à partir des muons⁴⁴², résultats (Kirkby et al. 2011)⁴⁴³ qui semblent bien en accord avec sa théorie.

Dans *Surveys in Geophysics* Mike Lockwood a examiné en 2012 cette thèse avec beaucoup de rigueur⁴⁴⁴. Sans nier la possibilité d'un tel lien entre le CRF et le climat, les résultats actuels semble infirmer l'existence d'une corrélation très étroite.

Température de la mer et du CRF

Sur la Figure 74 les variations de la température de la mer et du CRF depuis le Cambrien ont été reportées (Svensmark 2007, d'après Shaviv & Veizer 2003).

La concordance est frappante. Les minima de température correspondent au passage dans les bras spiraux.

Lors de ces passages, le flux cosmique augmente de manière très sensible. Selon la théorie de Svensmark, cela augmente la formation de nuages et conduit à refroidir la planète, et la mer.

⁴⁴² <http://home.web.cern.ch/about/experiments/cloud>

⁴⁴³⁴⁴³ [The Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation](#) CERN Press Release 20 JUL 2011

⁴⁴⁴ Lockwood, M. (2012) Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics*, 33 (3-4). pp. 503-534.

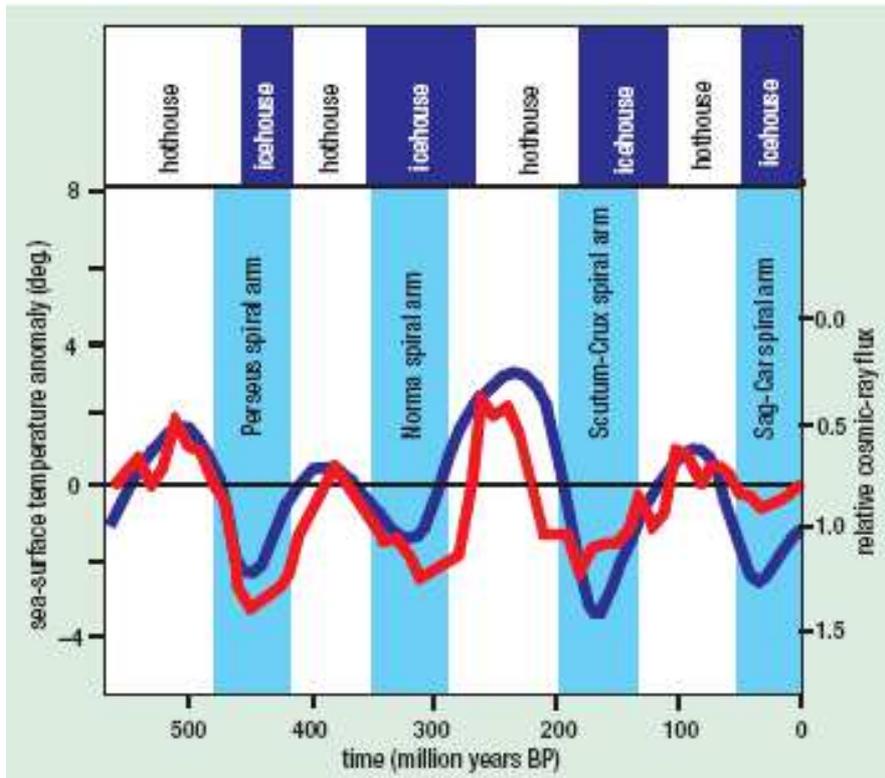


Figure 74 En bleu, variations de la température de la mer dans les zones tropicales, en rouge variations du CRF.

6. CRF et évolution des espèces

CRF et supernovae

On pense aujourd'hui que l'essentiel du rayonnement cosmique galactique provient de l'explosion de Supernovae. Ce sont des étoiles jeunes et massives qui explosent à la fin de leurs vies, libérant une partie de leur énergie sous la forme de particules très énergétiques.

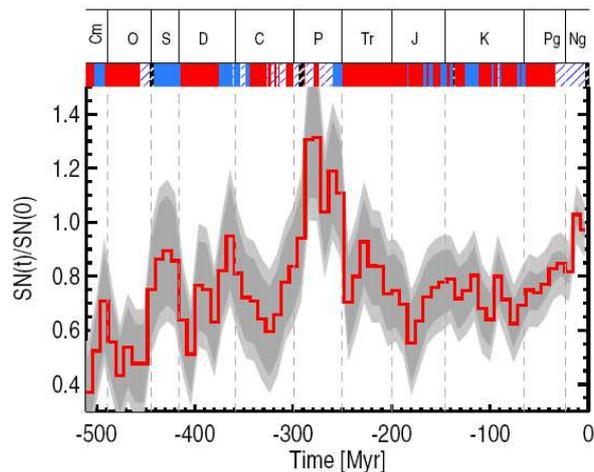


Figure 75 Variations reconstruites du taux de supernovae avec les époques géologiques.

En Avril 2012, Svensmark a publié un article de 21 pages dans les Monthly Notices of the Royal Astronomical Society sur le lien entre les supernovae et le climat⁴⁴⁵. Pour cette étude il s'est appuyé sur la connaissance actuelle sur les amas stellaires, milieux dans lesquels les étoiles massives se forment. En utilisant la base WEBDA des amas ouverts, il a pu construire les taux de supernovae dans le voisinage solaire au cours du temps (Figure 75). Ce taux est en bonne harmonie avec le CRF déterminé indépendamment par Shaviv.

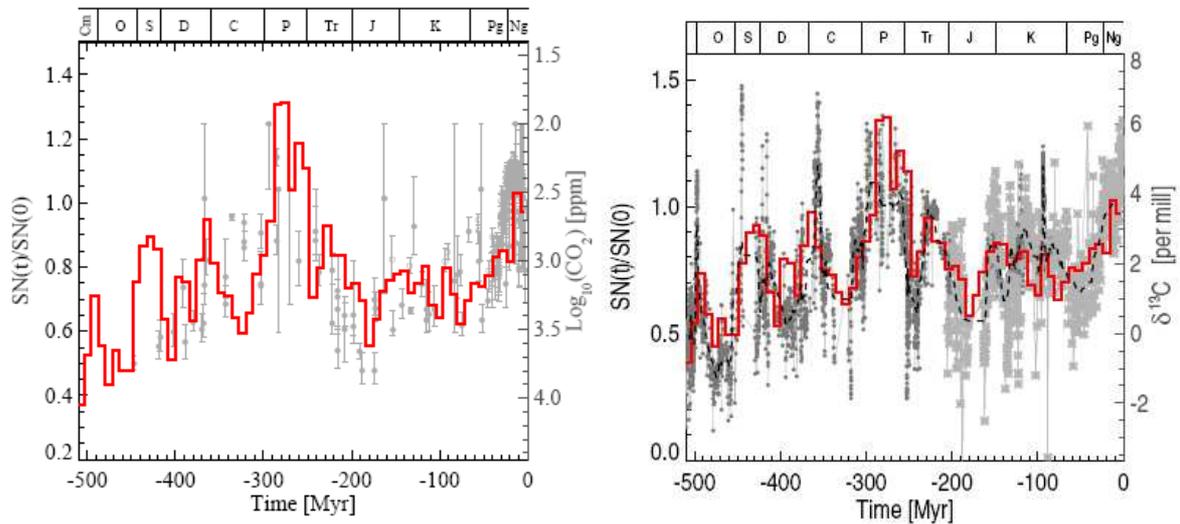


Figure 76 À gauche variations du taux de CO₂ comparées à au taux de SN. À droite taux de ¹³C comparé au taux de SN.

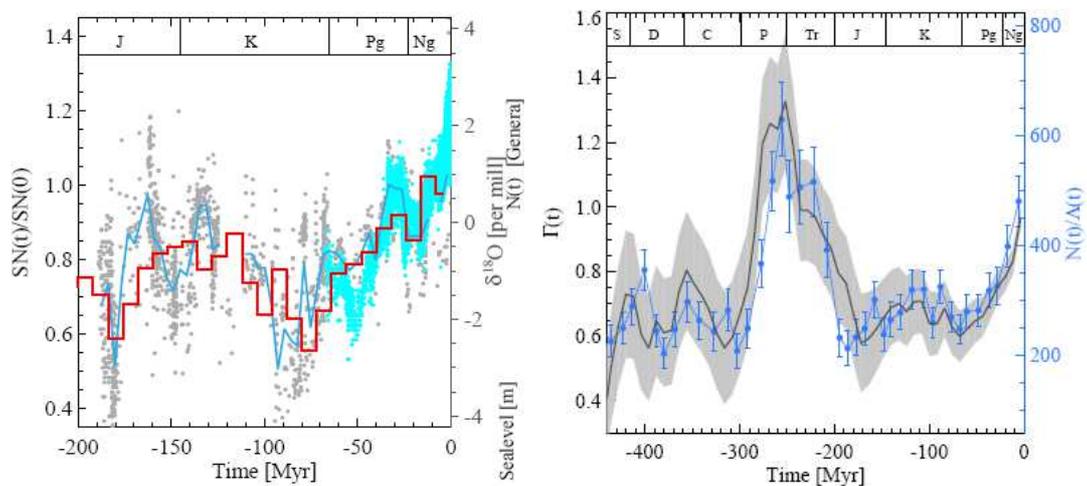


Figure 77 À gauche, variations de O¹⁸ comparées au taux de supernovae. À droite, Relation entre le taux de Supernovae et un taux d'invertébrés marins.

Il examine ensuite l'extinction des espèces marines, en enlevant qui est attribuable à la tectonique des plaques (d'après Haq & Schutter 2008⁴⁴⁶). L'accord est absolument remarquable.

⁴⁴⁵ Evidence of nearby supernovae affecting life on Earth", H. Svensmark, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Avril 2012.

⁴⁴⁶ Haq B. U., Schutter S. R., 2008, Science, 322, 64

La correspondance entre les taux de CO_2 et de C^{13} est aussi remarquable (Figure 76). Par contre l'accord avec les variations de O^{18} est moins bon aux époques anciennes (Figure 77, à gauche). Ceci montre clairement l'importance du rôle des supernovae dans l'environnement proche du Soleil avec le temps (Figure 77, à droite).

Ce travail n'explique pas tout. L'événement K-T n'est y expliqué, ni par les supernovae, ni par la régression marine. Néanmoins ce travail a établi une connexion claire entre le voisinage du Soleil dans la Galaxie et la biosphère.

Les futures données de Gaia devraient permettre d'apporter des informations essentielles pour préciser ce modèle.

7. Extinction massive directe par une explosion stellaire

Les sursauts gamma⁴⁴⁷

Les sursauts gamma sont des bouffées de photons gamma qui apparaissent aléatoirement dans le ciel. Ils sont situés à de très grandes distances de la Terre, et sont de ce fait les événements les plus lumineux de l'Univers, après le Big Bang.

Historique

Les premières détections de sursauts gamma (alors identifiées comme empreintes d'armes nucléaires) ont eu lieu le 2 juillet 1967 à 14:19 UTC par le satellite militaire américain Vela mis en orbite en 1963, chargé de contrôler l'application du traité portant sur l'interdiction des tests atomiques atmosphériques. Ce n'est qu'en 1973 que cette information a été rendue publique, ouvrant un nouveau champ de recherche astronomique. Jusqu'à la fin des années 1980, on n'a su que très peu de choses de ces phénomènes : ils sont imprévisibles, leur éclat est très variable et leur spectre non thermique. Ce sont les expériences françaises PHEBUS et américaine BATSE qui ont apporté la première grande avancée majeure : les sursauts gamma se répartissent en deux groupes distincts. La classification proposée se base sur la durée de l'évènement et ses propriétés spectrales : des sursauts courts (dont le maximum d'émission est à très haute énergie) et des sursauts longs (qui ont un maximum spectral à plus basse énergie, typiquement vers 100 keV). Si la durée des premiers ne dépasse pas deux secondes (elle est visible dans le ciel pendant quelques secondes, voire quelques minutes. Les plus longs ne sont cependant observables que pendant une vingtaine de minutes, ce qui explique la grande difficulté de leur localisation précise. Ils se répartissent de façon isotrope sur la sphère céleste, ce qui favorise une origine extragalactique.

La seconde grande découverte fut le fait de BeppoSAX, un satellite italo-hollandais équipé d'un détecteur de rayonnement gamma mais aussi d'un détecteur de rayons X avec une résolution spatiale plus grande, permettant ainsi de « pointer » vers la source gamma supposée. Ce satellite observa pour la première fois une émission rémanente (c'est-à-dire une imagerie spatiale beaucoup plus prolongée de la source sur d'autres longueurs d'ondes que celle du rayonnement gamma) aux sursauts gamma le 28 février 1997. C'est grâce à ces observations et aux suivantes (BeppoSAX a observé plusieurs dizaines de sursauts gamma) que notre compréhension du phénomène des sursauts gamma a progressé.

Depuis la fin de la mission de BeppoSAX, d'autres satellites ont été lancés : HETE-2, et Swift. Lancé en 2004, ce dernier est équipé d'une roue à inertie qui permet un pointage très rapide de ses deux instruments d'imagerie X et optique. Il permet de ce fait d'observer

⁴⁴⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Sursaut_gamma

l'émission rémanente du sursaut dans les premières minutes alors que le délai était sensiblement plus long avec les méthodes jusqu'alors utilisées. Le comportement de cette émission rémanente a pu être ainsi précisé : après une première phase de décroissance rapide, existe un plateau, puis une nouvelle décroissance au bout de quelques heures. L'interprétation de cette évolution en trois phases reste problématique.

Origine

Les sursauts gamma sont liés aux stades ultimes de l'évolution stellaire et aux trous noirs. Les disparités observées entre les sursauts longs et les sursauts courts ont conduit depuis longtemps à penser que l'astre à l'origine du sursaut gamma, le progéniteur, devait être en fait de deux natures différentes.

On pense depuis 1998 que les sursauts longs (les plus étudiés) sont liés à la mort d'étoiles massives. Ce fait a été confirmé par l'observation de plusieurs sursauts gamma associés à des supernovae de type Ib/c en 2003. Si on ne sait pas encore clairement pourquoi toutes les étoiles massives ne produisent pas de sursaut gamma, on est certain en revanche que certaines étoiles massives produisent des sursauts gamma, et que ces sursauts nous sont visibles uniquement parce que nous nous trouvons dans la ligne de visée d'un jet de matière éjectée à des vitesses fantastiques (de l'ordre de 99,995 pour cent de la vitesse de la lumière). C'est le choc de cette matière avec le milieu interstellaire qui produit l'émission rémanente. On suppose que ces jets sont produits par un trou noir en formation lors de la mort de l'étoile massive.

La nature des sursauts courts a été plus mystérieuse pendant longtemps. C'est finalement en 2005, grâce à des observations de HETE-2 que la position précise d'un sursaut court a pu être obtenue. Grâce à elle, il a été possible de montrer que les caractéristiques des galaxies contenant les sursauts gamma courts sont très différentes de celles des galaxies contenant les sursauts gamma longs. Ceci a privilégié l'hypothèse que le progéniteur des sursauts courts n'est pas une étoile massive mais une étoile binaire contenant des objets compacts (étoile à neutrons ou trou noir). Ces binaires rayonnent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles et peu à peu se rapprochent. Lorsqu'ils deviennent trop proches l'un de l'autre, les objets compacts fusionnent, donnant naissance à un trou noir. C'est cette naissance qui serait annoncée à travers l'Univers par un bref flash de photons gamma.

L'extinction Ordovicien/Silurien

En 2003, une équipe de l'Université du Kansas dirigée par Alan Melott a publié dans une revue d'Astrobiologie une étude sur la possibilité que cette extinction fût causée par l'explosion d'une étoile associée à sursaut gamma (Gamma Ray Burst, GRB)⁴⁴⁸.

Cette équipe a simulé ce qui se produirait si un sursaut gamma avait eu lieu dans un rayon de 6500 al autour du système solaire. Le premier effet consisterait à une réduction sensible de la couche d'ozone. L'effet des rayons ultra-violet du soleil serait très dommageable pour les organismes vivants, sur la terre ferme. Le climat dominé par des pluies acides et une forte couverture nuageuse entraînerait une période glaciaire intense. La mer se retire, d'où un taux élevé d'extinctions des espèces marines. Ce scénario est très controversé.

⁴⁴⁸ Melott, A.L. et al. (2004). "Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?". *International Journal of Astrobiology* 3: 55–61. [arXiv:astro-ph/0309415](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309415)

8. GRB, Amas globulaires et extinctions massives

Dans un article diffusé en Mars 2013, W. Domainko, C.A.L. Bailer-Jones et F. Feng proposent une approche des extinctions massives basée non pas sur une explosion, mais sur l'effet cumulatif de plusieurs GRB situées dans des amas globulaires passant à proximité du Soleil⁴⁴⁹.

Les amas globulaires

Un amas globulaire est un amas stellaire très dense, contenant typiquement une centaine de milliers d'étoiles distribuées dans une sphère dont la taille varie de 20 à quelques centaines d'années-lumière. Leur densité est ainsi nettement plus élevée que celle des amas ouverts. Les étoiles les plus lumineuses de ces amas sont généralement des géantes rouges.

On compte 150 amas globulaires dans notre Galaxie. Mais il en existe sans doute d'autres, indétectables car masqués par le centre galactique.

Les amas globulaires font partie du halo galactique, ils orbitent autour du centre galactique à une distance variant de 1 à 100 kpc⁴⁵⁰. C'est par leur étude que Harlow Shapley, en 1918, a pu déterminer la position du Soleil au sein de la Galaxie. Comme les amas globulaires contiennent les étoiles les plus âgées d'une galaxie, ils contribuent également de façon importante à l'étude de l'évolution des étoiles et des galaxies.

Les binaires dans les amas globulaires

En raison de la densité en étoiles, les amas globulaires sont des objets dans lesquels une population de binaires en forte interaction dynamique existe⁴⁵¹. Ceci est à mettre en relation avec l'observation de variables cataclysmiques, de pulsars millisecondes et de binaires X à faible masse.

Ces binaires seraient susceptibles de fusionner en provoquant une GRB de courte durée (short GRB)⁴⁵².

Histoire du flux GRB venant des amas globulaires galactiques

Domainko et al. ont examiné l'effet cumulatif des différents GRB ayant pu apparaître dans les amas globulaires, en tenant compte de leur distance au Soleil. Pour cela ils ont déterminé les orbites des amas en tenant d'un modèle classique du potentiel galactique.

Sur la Figure 78 le flux GRB prédit par ce modèle est tracé de nos jours jusqu'au Cambrien. L'unité de flux est arbitraire. Les auteurs ont reporté en traits verticaux les époques des 18 extinctions massives identifiées par Bambach⁴⁵³. On peut noter 3 coïncidences :

- À 70 Ma, approximativement la date de l'extinction K-T
- À 180 Ma pour une extinction à 179-186 Ma

⁴⁴⁹ W. Domainko, C.A.L. Bailer-Jones, F. Feng: A history of the gamma-ray burst flux at the Earth from Galactic globular clusters, <http://arxiv.org/pdf/1303.3105v1.pdf>

⁴⁵⁰ Halton C. Arp, Globular Clusters, dans Galactic Structure, 1965, p. 401

⁴⁵¹ Matthew J. Benacquista, Relativistic Binaries in Globular Clusters, Living Rev. Relativity 9 (2006), 2, <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-2/download/lrr-2006-2Color.pdf>

⁴⁵² Grindlay, J., Portegies Zwart, S. & McMillan, S. 2006, NatPh, 2, 116

⁴⁵³ Bambach R.K., 2006, Ann. Rev. Earth Planet. Science 34, 127

- À 340 Ma pour une extinction à 359-364 Ma

Les deux dernières extinctions ne sont pas dans la liste des extinctions principales.

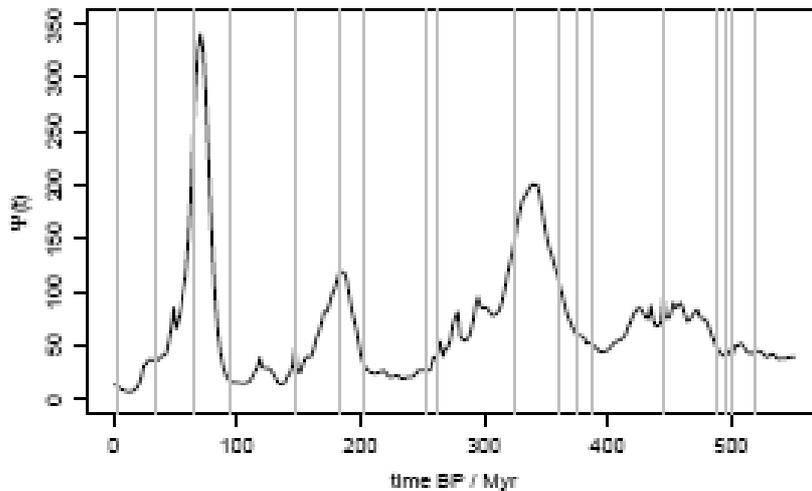


Figure 78 Flux GRB prédit en unités arbitraires depuis nos jours jusqu'au Cambrien. Les traits verticaux correspondent aux époques de 18 extinctions massives évaluées par Bambach (2006).

Les auteurs indiquent que ces trois pics sont dus à une rencontre proche du Soleil avec l'amas globulaire 47 Tucanae.

*L'amas globulaire 47 Tucanae*⁴⁵⁴

47 Tucanae, ou NGC 104 est un amas globulaire situé dans la constellation du Toucan. Il fait partie des plus gros amas globulaire de notre Galaxie, et des plus lumineux vu depuis la Terre, sa magnitude apparente étant située entre 4 et 5, ce qui en fait un objet aisément observable à l'œil nu. Néanmoins, sa découverte par les astronomes européens n'a eu lieu que tardivement, en 1751 par le français Nicolas Louis de Lacaille lors de son voyage dans l'hémisphère sud. 47 Tuc est situé très près en direction du Petit Nuage de Magellan, son alignement avec cette galaxie satellite de la nôtre étant fortuit.

47 Tuc est un amas globulaire compact, d'environ 120 années-lumière de diamètre. Situé à environ 15 000 années lumière de la Terre, son diamètre apparent atteint un demi-degré, soit le diamètre apparent de la Lune. 47 Tuc est un amas extrêmement riche. Il a donc été l'objet de nombreuses études de recensement de populations stellaires. Il est ainsi l'amas globulaire possédant le plus grand nombre de pulsars connus (plus d'une vingtaine), dont une majorité de pulsars millisecondes, comme attendu pour un amas âgé, dont les étoiles jeune sont mortes depuis longtemps. On y trouve également un nombre élevé de *blue stragglers*, dont l'abondance atteste que ces objets se forment à la suite d'interaction rapprochée, voire de collision avec d'autres étoiles. On y a identifié des centaines de sources en rayons X. C'est aussi un émetteur en rayons gamma, détectés par le satellite Fermi.

⁴⁵⁴ http://fr.wikipedia.org/wiki/47_Tucanae

9. Autres étoiles explosives

*Les supernovae*⁴⁵⁵

Une supernova est l'ensemble des phénomènes consécutifs à l'explosion d'une étoile, qui s'accompagne d'une augmentation brève mais fantastiquement grande de sa luminosité. Vue depuis la Terre, une supernova apparaît donc souvent comme une étoile nouvelle, alors qu'elle correspond en réalité à la disparition d'une étoile.

Les supernovas sont des événements rares à l'échelle humaine : leur taux est estimé à environ une à trois par siècle dans notre Voie lactée.

Il est à noter qu'à notre époque aucune supernova n'a été observée dans notre galaxie, la Voie Lactée, depuis l'invention du télescope. La plus rapprochée observée depuis est SN 1987A, survenue dans une galaxie voisine.

Elles ont eu et jouent encore un rôle essentiel dans l'histoire de l'Univers, car c'est lors de son explosion en supernova que l'étoile libère les éléments chimiques qu'elle a synthétisés au cours de son existence — et pendant l'explosion même —, pour être diffusés dans le milieu interstellaire. De plus, l'onde de choc de la supernova favorise la formation de nouvelles étoiles en initiant ou en accélérant la contraction de régions du milieu interstellaire.

Le processus initiant une supernova est extrêmement bref : il dure quelques millisecondes. Quant au phénomène de la supernova elle-même, il peut durer plusieurs mois. Au maximum de luminosité de l'explosion, la magnitude absolue de l'astre peut atteindre -19, ce qui en fait un objet plus lumineux de plusieurs ordres de grandeur que les étoiles les plus brillantes : pendant cette période, la supernova peut « rayonner plus d'énergie » (et donc avoir une puissance plus grande) qu'une, voire plusieurs galaxies entières. C'est la raison pour laquelle une supernova se produisant dans notre propre galaxie, voire une galaxie proche, est souvent visible à l'œil nu, même en plein jour. Plusieurs supernovas historiques ont été décrites à des époques parfois très anciennes ; on interprète aujourd'hui ces apparitions d'« étoiles nouvelles » comme étant des supernovas.

Il existe deux mécanismes en réalité assez distincts qui produisent une supernova : le premier résulte de l'explosion thermonucléaire d'un cadavre d'étoile appelé naine blanche, le second de l'implosion d'une étoile massive qui est encore le siège de réactions nucléaires au moment de l'implosion. Cette implosion est responsable de la dislocation des couches externes de l'étoile. Le premier mécanisme est appelé supernova thermonucléaire, le second, supernova à effondrement de cœur. Un troisième mécanisme, encore incertain, mais s'apparentant au second, est susceptible de se produire au sein des étoiles les plus massives. Il est appelé supernova par production de paires. Historiquement, les supernovas étaient classifiées suivant leurs caractéristiques spectroscopiques. Cette classification est peu pertinente d'un point de vue physique. Seules les supernovas dites de type Ia sont thermonucléaires, toutes les autres étant à effondrement de cœur.

La matière expulsée par une supernova s'étend dans l'espace, formant un type de nébuleuse appelé rémanent de supernova. La durée de vie de ce type de nébuleuse est relativement limitée, la matière étant éjectée à très grande vitesse (plusieurs milliers de kilomètres par seconde), le rémanent se dissipe relativement vite à l'échelle astronomique, en quelques centaines de milliers d'années. La nébuleuse de Gum ou les dentelles du Cygne sont des exemples de rémanents de supernova dans cet état très avancé de dilution dans le milieu

⁴⁵⁵ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova>

interstellaire. La nébuleuse du Crabe est un exemple de rémanent jeune : l'éclat de l'explosion qui lui a donné naissance a atteint la Terre, il y a moins de mille ans.

Les progéniteurs

Les étoiles Wolf-Rayet⁴⁵⁶ (souvent abrégé en étoiles WR) font partie des progéniteurs des supernovae.

Ce sont des étoiles chaudes, massives et évoluées présentant un taux de perte de masse très élevé. Elles furent découvertes en 1867 par Charles Wolf et Georges Rayet, de l'Observatoire de Paris¹. Wolf et Rayet avaient observé, dans 3 étoiles de la constellation du Cygne, d'étranges raies en émission d'origine alors inconnue. On pense aujourd'hui que les étoiles Wolf-Rayet sont les descendantes des étoiles de type spectral O ou B, c'est-à-dire les étoiles les plus massives des populations stellaires (qui ont une masse comprise entre 9 et 80-150 masses solaires). On parle d'une « étoile Wolf-Rayet » pour dire une étoile « de type Wolf-Rayet », plutôt qu'une « étoile de Wolf-Rayet » (comme on parle de l'« étoile de Barnard »).

Les étoiles Wolf-Rayet sont des étoiles qui ne sont, en grande majorité, plus sur la séquence principale, c'est-à-dire que la combustion qui se déroule dans leur cœur est la combustion de l'hélium (puis plus tard celle du carbone, puis de l'oxygène etc.), et non plus celle de l'hydrogène (comme c'est le cas des étoiles sur la séquence principale justement — voir le diagramme de Hertzsprung-Russell). En fait, on parle plus souvent du stade (évolutif) Wolf-Rayet, ou d'une étoile montrant des caractéristiques Wolf-Rayet. Dû au fait que l'étoile possède un vent stellaire important, tellement important que le vent est optiquement épais, cela n'a pas de sens de parler de surface (hydrostatique) de l'étoile comme c'est le cas d'étoiles « normales », de plus faible masse, comme le Soleil.

Evolution des Wolf-Rayet

Les étoiles Wolf-Rayet ont comme progéniteurs les étoiles initialement les plus massives, les étoiles O. Des étoiles moins massives ne forment pas d'étoiles Wolf-Rayet puisqu'elles ne peuvent pas atteindre le stade de la combustion de l'hélium dans le cœur. Bien que la masse initiale minimum pour former une étoile Wolf-Rayet soit connue (environ 15–25 masses solaires — cela dépend de la métallicité ambiante), on ne sait pas du tout jusqu'à quelle limite supérieure la masse initiale peut aller, s'il y en a une. Une fois que la combustion de l'hydrogène est terminée (fin de la séquence principale), le cœur se contracte, l'enveloppe se dilate et l'étoile passe par un stade intermédiaire qui peut soit être stable (RSG — supergéante rouge) soit instable (LBV). Il se peut que la combustion en couche de l'hydrogène se fasse pendant ce stade.

Ensuite, si l'étoile est suffisamment massive, la combustion de l'hélium dans le cœur démarre. Puisque cette combustion est largement plus puissante que celle de l'hydrogène, elle dégage beaucoup plus d'énergie, et est à l'origine d'un vent opaque et dense. Puisque le vent est opaque (ou optiquement épais) il n'est plus possible de distinguer la surface, et l'étoile est une Wolf-Rayet. Le vent d'une Wolf-Rayet est si fort (jusqu'à 10^{-5} masses solaires par an) qu'il enlève petit à petit toutes les couches supérieures (riches en hydrogène) de l'étoile. Tant que l'étoile possède encore de l'hydrogène dans le vent, elle apparaît comme une WNL. Une fois que l'hydrogène a disparu, elle devient une WNE.

Les produits de la combustion de l'hélium sont principalement le carbone et l'oxygène. Puisque les couches supérieures de l'étoile disparaissent, le carbone devient visible, et l'étoile

⁴⁵⁶ http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile_Wolf-Rayet

devient une WC. Une fois que la combustion de l'hélium dans le cœur est terminée, c'est la combustion du carbone qui commence, dont le produit est principalement l'oxygène. Puis il s'ensuit la combustion de l'oxygène en silicium, et ainsi de suite, jusqu'au fer. La stabilité du fer est telle qu'une fois le cœur de fer atteint, la température dans le noyau de l'étoile n'est pas suffisante pour entamer la combustion de cet élément. L'étoile s'effondre donc sur elle-même et explose en supernova.

Êta carinae, une future GRB ?

Eta Carinae (η Car) est une étoile hypergéante variable bleue, se trouvant entre 7 000 et 10 000 années-lumière de la Terre⁴⁵⁷. Située dans la constellation de la Carène, c'est une des plus fameuses étoiles du ciel austral. Sa luminosité est environ quatre millions de fois supérieure à celle du soleil, et sa masse estimée est d'environ 100 à 150 masses solaires. Cette étoile est l'une des étoiles les plus massives actuellement connues.

Elle a subi une énorme explosion il y a entre 7 000 et 10 000 ans, qui n'a été observable qu'il y a 150 ans, le temps que la lumière voyage jusqu'à la Terre. Cela a donc produit un gigantesque nébuleuse, désormais de la taille du système solaire. Cette nébuleuse s'appelle l'Homuncule (ou Homunculus) à cause de sa forme comportant deux lobes symétriques.

Bien que son spectre ressemble à celui d'une étoile Wolf-Rayet, il est probable qu'Eta Carinae soit toujours dans la phase de combustion de l'hydrogène (mais dans les couches supérieures et non plus dans le cœur).

On pense en raison de sa masse qu'elle deviendra une étoile Wolf-Rayet ou une supernova par la suite.

Son explosion, qui relâcha l'équivalent de quelque 10 masses solaires en quelques années dans l'espace, est certainement due au fait qu'elle a dépassé la limite de Humphreys-Davidson en raison de sa masse et de sa vitesse de rotation. La masse d'Eta Carinae et son statut d'étoile binaire sont incertains, et il est même possible qu'Eta Carinae ait en fait été constituée de trois étoiles.

Selon le physicien israélien Arnon Dar (La Thuille 2009)⁴⁵⁸ son explosion pourrait conduire à une possible extinction des espèces terrestres.

Si le modèle du canon est correct, l'énergie dissipée au cours de l'explosion sera émise dans un faisceau très collimaté, avec une ouverture de faisceau de quelques degrés. Compte-tenu de son orientation le faisceau n'atteindrait pas la Terre.

Mais si l'angle du faisceau est supérieur à 8°, on est dans un modèle de la boule de feu, et la Terre sera atteinte par le rayonnement gamma émis par l'explosion.

Êta Carinae étant située à près de 10 000 al, l'explosion a peut-être déjà eu lieu. Une bouffée de rayons gamma très énergétiques est peut-être sur le chemin de la Terre, comme les quatre cavaliers de l'Apocalypse, prête à détruire une grande partie de la vie terrestre.

⁴⁵⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Eta_Carinae

⁴⁵⁸ A. Dar, 'High Energy Phenomena In The Universe' Summary talk at the 44th Rencontre De Moriond on High Energy Phenomena In La Thuile, Italy, February 1-8, 2009 To be published in the proceedings (arXiv:0906.0973).

Conclusion

Les paléontologues ont mis en évidence l'existence de plusieurs périodes d'extinction massive de la vie sur notre planète. Elles émergent du cadre du renouvellement progressif des espèces. L'analyse des données et la recherche d'une explication cohérente a conduit à en rechercher des causes extra-terrestres. Comme nous l'avons vu, celles-ci peuvent être de différentes natures :

- L'effet d'un impact majeur par un météoroïde. C'est ce qu'on privilégie pour les extinctions K-T et P-T. Pour le premier cas, il est probable que le bombardement a été multiple. La nature de l'objet n'est pas clairement établie, entre comète ou astéroïde. La statistique des géocroiseurs privilégierait ce deuxième type d'objets. Ces deux cataclysmes se sont produits après la sortie du Soleil d'un bras galactique. Cela suggère que le décrochage d'objets du nuage de Oort pourrait être la cause initiale. L'origine des extinctions serait donc une interaction gravitationnelle entre la Galaxie et le système solaire ;
- L'extinction par un flash de rayons gamma. C'est l'hypothèse avancée pour l'extinction de l'Ordovicien/Silurien. Même si cette hypothèse est très controversée, elle ne peut être écartée. Pour l'étayer, il faut remonter dans l'histoire de la Galaxie et retrouver quel était l'environnement du Soleil à l'époque de cette catastrophe ;
- L'existence des périodes de 140 Ma et de 62 Ma dans les taux d'extinction des espèces semble bien corrélée au mouvement du système solaire dans la galaxie. L'étude du flux de rayonnement cosmique a conduit à mettre en évidence les mêmes périodes dans la variation de ce flux. Dans le cadre de la cosmoclimatologie, on interprète les variations climatiques par les variations du CRF. Ce flux proviendrait des supernovae ayant explosé dans les bras spiraux traversés par le Soleil. Une évaluation plus précise résultera de l'analyse des données de Gaia, en particulier grâce à une meilleure connaissance des amas stellaires ;
- Une période de 25 Ma d'années apparaît dans les travaux sur les supernovae dans l'environnement solaire. Cela aurait pour effet de provoquer des pics de glaciation à ce rythme, conduisant à une oscillation tectonique de l'ordre de 25 m, suffisant pour faire disparaître et renouveler les espèces.

Dans le cadre ainsi tracé, l'acquisition de données plus précises sur notre Galaxie est donc nécessaire pour préciser chacun de ses points. Ce sera le rôle de la mission Gaia de l'Agence Spatiale Européenne, dont le lancement a effectué le 19 décembre 2013. Cette mission permettra d'obtenir une cartographie précise du monde stellaire, en position et en vitesse. La dynamique de la Galaxie et des différentes composantes pourra être précisée. On pourra ainsi mieux remonter le temps et comprendre les différentes interactions entre le Soleil et la Galaxie.

Annexe : Glossaire ordonné

Dans le cadre de ce document j'ai introduit un gros nombre de termes et de notions peu familiers à un grand nombre de lecteurs. La nécessité de faire un glossaire est devenue rapidement évidente. Je l'ai ordonné en fonction des grandes thématiques afin de simplifier sa consultation. Pour l'établir je suis allé presque exclusivement aux pages Wikipédia associées. Si un lecteur souhaite avoir un approfondissement sur un mot ou un concept je lui recommande de consulter cette encyclopédie ou toute autre encyclopédie assez riche pour développer les idées.

1. Physique

Physique des Particules

Bosons: Particules d'échange associées aux interactions entre particules

Photon : boson associé à l'interaction électromagnétique

Gluon : boson associé à l'interaction forte liant les protons et les neutrons dans le noyau atomique

Fermions: seconde famille des particules élémentaires

Lepton : particules non soumis à l'interaction forte

Électron : composant de l'atome avec le proton et le neutron

Muon : lepton présent dans les rayons cosmiques

Tauon : troisième lepton élémentaire, le plus lourd

Neutrino : particule très légère associée aux leptons

Hadron : composé de particules soumis à l'interaction forte

Quark : brique de base des hadrons

Proton : composant de l'atome

Neutron : composant de l'atome

Rayons cosmiques : flux de particules de haute énergie circulant dans le vide interstellaire.

Zêta-particules : particules dont l'énergie estimée est de l'ordre de 10^{21} eV, soit environ 100J.

Expérience CLOUD : expérience au CERN pour étudier le lien entre les rayons cosmiques et la formation des nuages

Forces

Gravitation : force d'attraction entre des corps massifs.

Rayon de Schwarzschild : rayon au-deçà duquel la lumière ne peut échapper

Trou noir : objet dont le champ de gravitation est si grand que toute forme d'énergie ne peut s'en échapper.

Force électromagnétique (ou de Lorentz) est la force subie par une particule chargée (comme l'électron ou le proton) dans un champ électromagnétique.

Interaction faible : interaction associée à la radioactivité bêta. Elle lie l'électron et le proton pour former le neutron.

Interaction forte : force nucléaire liant les hadrons. Elle est impliquée dans la radioactivité alpha.

Force électrofaible : force reliant les forces électromagnétiques et d'interaction faible dans le cadre de la théorie quantique des champs.

GUT : théorie de la grande unification reliant les forces électromagnétiques et d'interaction faible et forte.

Mécanique & thermodynamique

Mécanique

Théorème du viriel : dans un système en équilibre dynamique, l'énergie cinétique est égale à la moitié de l'énergie potentielle (Clausius 1870).

Onde de densité : propagation dans un milieu d'une variation de la densité.

Onde gravitationnelle : propagation de la variation de la courbure de l'espace-temps.

Système dynamique : système évoluant au cours du temps de façon causale et déterministe.

Attracteur : ensemble vers lequel évolue un système de manière irréversible en l'absence de perturbations.

Auto-organisation : phénomène de mise en ordre croissant, allant en sens inverse de l'augmentation de l'entropie

Criticalité auto-organisée : propriété de systèmes dynamiques ayant comme attracteur un point critique.

Indice spectral : exposant de la variation de l'énergie spectrale avec la fréquence.

Thermodynamique

Entropie : degré d'organisation d'un système.

Second principe de la thermodynamique : toute transformation d'un système s'effectue avec une augmentation de l'entropie globale, incluant les entropies du système et de l'extérieur.

Structure dissipative : système opérant dans un environnement avec échange de matière et d'énergie.

Effet de serre : processus naturel dû à l'atmosphère associé à l'échange de flux thermique entre le sol et l'espace. L'énergie solaire, dans le domaine des longueurs d'onde visibles, est transmise par l'atmosphère et absorbée par le sol. Celui-ci renvoie dans l'espace de l'énergie dans l'infrarouge qui est absorbée par l'atmosphère. De ce fait une grande partie de l'énergie solaire est absorbée par la Terre. Par contre, en cas de nuages, l'atmosphère rejette une grande partie de l'énergie solaire, et la Terre se refroidit.

Spectroscopie

Raie spectrale : ligne sombre ou lumineuse dans un spectre électromagnétique. Elles proviennent de l'interaction des atomes ou des molécules avec le rayonnement électromagnétique.

Raie 21 cm : raie spectrale à la longueur d'onde de 21 cm émise par les grands nuages d'hydrogène neutre. La raie provient de la transition atomique entre les deux sous-niveaux de la structure hyperfine de l'atome d'hydrogène.

Effet Doppler : décalage en fréquence d'une onde entre l'émission et la transmission dû à la variation de distance entre le récepteur et l'émetteur.

2. Astrophysique

Les Constellations

Nous avons mentionnées plusieurs constellations. Elles peuvent être repérées sur la carte de la Figure 79 à partir de leur abréviation indiquée dans le tableau suivant.

Tableau 1 Liste des 88 Constellations avec leur nom latin et leur abréviation.

<u>L'Aigle</u>	Aquila	Aql
<u>Andromède</u>	Andromeda	And
<u>L'Autel</u>	Ara	Ara
La Balance	Libra	Lib
La Baleine	Cetus	Cet
Le Bélier	Aries	Ari
La Boussole	Pyxis	Pyx
Le Bouvier	Bootes	Boo
Le Burin	Caelum	Cae
Le Caméléon	Chamaeeon	Cha
Le Cancer	Cancer	Cnc
Le Capricorne	Capricornus	Cap
<u>La Carène</u>	Carina	Car
<u>Cassiopée</u>	Cassiopeia	Cas
<u>Le Centaure</u>	Centaurus	Cen
<u>Céphée</u>	Cepheus	Cep
La Chevelure de Bérénice	Coma Berenices	Com
Les Chiens de chasse	Canes Venatici	CVn
<u>Le Cocher</u>	Auriga	Aur
La Colombe	Columba	Col
<u>Le Compas</u>	Circinus	Cir
Le Corbeau	Corvus	Crv
La Coupe	Crater	Crt
<u>La Couronne australe</u>	Corona Australis	CrA

La Couronne Boréale	Corona Borealis	CrB
<u>La Croix du Sud</u>	Crux	Cru
<u>Le Cygne</u>	Cygnus	Cyg
Le Dauphin	Delphinus	Del
La Dorade	Dorado	Dor
Le Dragon	Draco	Dra
<u>L'Écu de Sobieski</u>	Scutum	Sct
L'Éridan	Eridanus	Eri
<u>La Flèche</u>	Sagitta	Sge
Le Fourneau	Fornax	For
<u>Les Gémeaux</u>	Gemini	Gem
La Girafe	Camelopardalis	Cam
<u>Le Grand Chien</u>	Canis Major	CMA
La Grande Ourse	Ursa Major	UMa
La Grue	Grus	Gru
<u>Hercule</u>	Hercules	Her
L'Horloge	Horologium	Hor
L'Hydre	Hydra	Hya
L'Hydre mâle	Hydrus	Hyi
L'Indien	Indus	Ind
Le Lézard	Lacerta	Lac
<u>La Licorne</u>	Monoceros	Mon
Le Lièvre	Lepus	Lep
Le Lion	Leo	Leo
<u>Le Loup</u>	Lupus	Lup
Le Lynx	Lynx	Lyn

<u>La Lyre</u>	Lyra	Lyr
La Machine pneumatique	Antlia	Ant
Le Microscope	Microscopium	Mic
<u>La Mouche</u>	Musca	Mus
L'Octant	Octans	Oct
L'Oiseau de paradis	Apus	Aps
<u>Ophiucus</u>	Ophiucus	Oph
<u>Orion</u>	Orion	Ori
La Paon	Pavo	Pav
Pégase	Pegasus	Peg
Le Peintre	Pictor	Pic
<u>Persée</u>	Perseus	Per
Le Petit Cheval	Equuleus	Equ
Le Petit Chien	Canis Minor	CMi
Le Petit Lion	Leo Minor	LMi
Le Petit Renard	Vulpecula	Vul
La Petite Ourse	Ursa Minor	UMi
Le Phénix	Phoenix	Phe
Le Poisson austral	Piscis Austrinus	PsA
Le Poisson volant	Volans	Vol
Les Poissons	Pisces	PsC
La Poupe	Puppis	Pup
<u>La Règle</u>	Norma	Nor
Le Réticule	Reticulum	Ret
<u>Le Sagittaire</u>	Sagittarius	Sgr
<u>Le Scorpion</u>	Scorpius	Sco

Le Sculpteur	Sculptor	Scl
<u>Le Serpent</u>	Serpens	Ser
Le Sextant	Sextans	Sex
La Table	Mensa	Men
<u>Le Taureau</u>	Taurus	Tau
Le Télescope	Telescopium	Tel
Le Toucan	Tucana	Tuc
Le Triangle	Triangulum	Tri
<u>Le Triangle austral</u>	Triangulum australis	TrA
Le Verseau	Aquarius	Apr
<u>La Vierge</u>	Virgo	Vir
<u>Les Voiles</u>	Vela	Vel

Systeme solaire

Théories

Disque protoplanétaire : disque autour des étoiles naissantes qui va donner naissance aux planètes.

Grand Tack est un scénario concernant l'évolution initiale du Système solaire interne.

Grand Bombardement Tardif est une période théorique entre 4,1 et 3,9 milliards d'années durant laquelle il y aurait eu une forte augmentation des impacts météoriques ou cométaires sur les planètes telluriques.

Le modèle de Nice de formation du Système solaire explique ce grand bombardement par la migration des planètes géantes. Cette migration aurait produit des résonances déstabilisant les ceintures d'astéroïdes présentes à cette époque.

Théia est un objet hypothétique, de la taille de Mars, qui aurait eu une collision avec la Terre pour former la Lune.

Némésis est l'hypothétique compagnon du Soleil, formant un système binaire de très longue période.

Objets

Ganymède, la plus grande lune du Système solaire, est un satellite de Jupiter,

Astéroïdes (Ceinture principale) est située entre les orbites de Mars et de Jupiter. Elle contient la majeure partie des astéroïdes.

(8) Flore est un gros astéroïde de la ceinture principale. Son diamètre est de 139,5 km. Il est membre d'une famille importante.

(298) Baptistina est un astéroïde faisant partie d'une famille éponyme, peut-être à l'origine de l'extinction Crétacé-Paléogène.

Géocroiseurs (classification) : ils évoluent à proximité de l'orbite terrestre.

Les PHA (Potentially Hazardous Asteroid) sont ceux qui peuvent présenter une menace de collision.

L'échelle de Turin permet de catégoriser le risque d'impact d'un géocroiseur. Elle tient compte de la probabilité d'impact et de l'effet éventuel en cas d'impact.

Les Amors, nommés d'après (1221 Amor) frôlent extérieurement l'orbite terrestre.

Les Apollos, nommés d'après (1862) Apollon ont une orbite croisant l'orbite terrestre. Ce sont les plus dangereux

Les Atens, nommés d'après (2062) Aten, ont aussi une orbite croisant celle de la Terre. Ils sont proches que les Apollos du Soleil.

Les Atiras, nommés d'après (163693) Atiras, ont une orbite totalement interne à celle de la Terre. Ils ne sont pas dangereux, mais pourraient le devenir s'ils sont perturbés.

Géocroiseurs (objets)

(433) Eros est un astéroïde de la famille des Amors de 33 km de long. Il est passé à plusieurs reprises en un siècle à une vingtaine de millions de km de la Terre.

(1566) Icare : objet Apollon (PHA) de 1,4 km.

(1862) Apollon, découvert en 1932, fait 1,7 km. Il croise aussi l'orbite de Vénus et de Mars.

(4179) Toutatis est un astéroïde en forme de cylindre de 4,5 km de long et de 2km de diamètre, qui croise l'orbite de la Terre et de Mars. Les risques d'impacts dans les prochaines décennies sont nuls.

(4581) Asclepios est passé à 700000 km de la Terre en 1989. Le prochain passage proche n'aura pas lieu avant 2189.

(29075) 1950 DA est l'objet géocroiseur ayant eu la plus forte probabilité d'impact avec la Terre. En 2014, on considère que le risque est nul à échelle de l'année 2880.

(89959) 2002 NT7 est un Apollo potentiellement dangereux, présenté comme candidat à la collision le 1er Février 2019. Ce risque a été écarté.

2007 VK184 est un astéroïde de type Apollon de 130 m de long. Il a une probabilité de 1/2940 de percuter la Terre le 3 Juin 2048.

2008 TC3 est le premier astéroïde ayant été détecté et suivi avant sa chute sur Terre.

(99942) Apophis a été mentionné avec une probabilité non négligeable de collision avec la Terre. On considère aujourd'hui que le risque est nul.

(367943) Duende ou 2012 DA14 est un astéroïde de 30m qui est passé à seulement 34000km du centre de la Terre le 15 Février 2013.

Ceinture de Kuiper : anneau situé au delà de Neptune, entre 30 et 55 UA, qui pourrait contenir plus de 70000 corps de plus de 100 km de diamètre. Ce serait le plus grand réservoir de comètes périodiques.

(136199) Éris est la plus grande planète naine du Système solaire. Elle a un aphélie à 97,56 UA. Son rayon est de 1163 km. Elle a été un moment surnommée la 10e planète.

(50000) Quaoar a un aphélie à 44,864 UA et un diamètre de 1170 km.

(90377) Sedna est une planète naine d'un millier de km de diamètre dont le périhélie est à 76,057 UA et l'aphélie à 935,451 UA. On pense que Sedna pourrait être un objet du nuage de Oort ayant été éjecté de ce nuage par le passage d'une étoile.

Comètes

La Comète d'Encke (2P/Encke) est la seconde comète périodique découverte. Elle a une période de 3,3 ans. Son orbite croise celle de la Terre. Elle serait à l'origine de pluies météoritiques.

La comète Shoemaker-Levy 9 s'est disloquée lors de son approche de la Terre puis elle est entrée en collision avec cette planète en Juillet 1994.

Nuage de Oort : ce serait un vaste réservoir d'objets situé entre 20000 et 30000 UA. Il pourrait aller au delà de 100000 UA. Sa taille est limitée par la frontière gravitationnelle du Système solaire à 1 al.

Météorite : résidu de corps solide ayant atteint le sol terrestre (ou d'une autre planète).

Un météoroïde est un objet se déplaçant dans le milieu interplanétaire, de taille plus petite qu'un astéroïde. En dessous de 100 μm , c'est une poussière interplanétaire, au delà de 10 m c'est un astéroïde.

Les essaims météoritiques provoquent des pluies d'étoiles filantes. Ils correspondent à des résidus de comètes ou d'astéroïdes. Les pluies arrivent lorsque la Terre croise leur orbite.

Les Léonides correspondent à une pluie d'étoiles filantes en Novembre. Elles sont causées par le passage de la comète Tempel-Tuttle d'une période de 33 ans.

Les Perséides (ou *larmes de Saint-Laurent*) est une pluie d'étoiles filantes dont le maximum est entre le 11 et le 13 Août. Elles correspondraient aux débris de la comète Swift-Tuttle.

L'achondrite est un type de météorite pierreuse. Il proviendrait de la surface d'un gros astéroïde.

Un uréilite est un type rare de météorite pierreuse, avec une teneur élevée en carbone.

Étoiles

Physique

Diagramme d' Hertzsprung-Russell: graphe dans lequel est indiquée la luminosité d'un ensemble d'étoiles en fonction de la température effective. C'est l'outil de base pour l'étude des populations.

Classifications spectrales : classification des étoiles d'après leur décomposition spectrale.

La limite de Humphreys-Davidson est une extension de la limite d'Eddington pour la luminosité d'un astre. Au delà de cette luminosité la pression de radiation prend le pas sur la gravité, conduisant à l'éjection de matière. On pense que l'étoile η Carinae a dépassé cette limite.

La nucléosynthèse est l'ensemble de processus physiques conduisant à la synthèse de noyaux atomiques.

Types

Étoiles O : très chaudes (35000 K à la surface de delta Orionis), très lumineuse et de couleur bleue.

Étoiles B : très lumineuses et chaudes (13000 K).

Étoiles A : un peu moins lumineuses et blanches (autour de 10000 K).

Étoiles F : un peu moins lumineuses (température de surface entre 6000 et 7200 K).

Étoiles G : naines jaunes (température de surface entre 5000 et 6000 K).

Étoiles K : naines orange (température de surface entre 4000 et 5000 K).

Étoiles M : naines rouges (température de surface entre 2500 et 3900 K).

Il existe aussi des étoiles de type naine brune, intermédiaires entre les étoiles et les planètes géantes, classées L, T ou Y. Les étoiles dites carbonées forment les classes R, N, S et C.

Une naine blanche est une étoile de très forte densité, résidu de l'évolution d'étoile de masse modérée. Très peu lumineuse, sa masse est de l'ordre de celle du Soleil.

Les supergéantes rouges sont des étoiles assez massives en train de terminer leur phase de séquence principale, car ayant consommé leur hydrogène dans leur cœur.

Les étoiles Wolf-Rayet (WR) sont des étoiles chaudes et massives ayant un taux de perte de masse important. Elles sont réparties en deux classes, les étoiles WN riches en azote et les étoiles WC riches en carbone. On pense que le chemin évolutif d'une étoile massive est O → Supergéante rouge → WNL (tardive) → WNE (précoce) → WC → Supernova.

Une supernova correspond à l'explosion d'une étoile. Ces étoiles sont classées en plusieurs types selon les phénomènes physiques associés. On considère qu'il y a les supernovae dites *thermonucléaires* (Ia) et celles à *effondrement de cœur* (II, Ic, Ic).

Une variable cataclysmique est une étoile binaire. La première composante est une naine blanche qui reçoit de la matière de sa compagne. Le transfert de matière n'est pas régulier ce qui conduit à des variations importantes de luminosité. Parfois, l'augmentation de luminosité peut être très élevée, conduisant à l'observation d'une nova. Au fur et à mesure la masse de la naine blanche augmente. Si elle dépasse la limite de Chandrasekhar (1,44 fois la masse du Soleil pour une naine blanche), l'étoile explose sous la forme d'une supernova de type Ia.

La supernova de l'an 1054 (SN 1054) a été observée dans la constellation du Taureau en juillet 1054 pendant deux ans. Son rémanent (reste) est la nébuleuse du Crabe.

Une hypernova désigne une explosion correspond à plus d'une centaine de supernovae. Ce phénomène, très rare, serait lié à l'effondrement d'une étoile exceptionnellement massive. Il serait associé à des sursauts gamma.

Un sursaut gamma (*gamma-ray burst*, GRB) est une bouffée de photons gamma apparaissant aléatoirement dans le ciel. On a montré qu'il était associé à un événement cataclysmique à très grande distance dans l'Univers. Les sursauts longs seraient associés à une étoile très massive, alors que les sursauts courts correspondraient à la fusion de deux objets très compacts (étoiles à neutron, trous noirs).

Une binaire X est formée d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons autour duquel orbite une étoile qui perd de la matière au projet de l'objet compact. Un rayonnement intense dans les rayons X résulte de cette accréation.

Les blue stragglers sont des étoiles occupant une place anormale dans le diagramme HR d'amas stellaires, trop lumineuses et trop bleues. Une des interprétations est qu'il s'agit d'étoiles binaires ayant fusionné ou en cours de fusion.

Objets

61 Cygni : étoile binaire (K5 V/K5 V) de magnitude 5,2-6,05. Première étoile dont on détermina la distance.

Algol : étoile variable (B8 V) à éclipse de magnitude 2,3-3,5.

Êta carinae : étoile hypergéante bleue de magnitude 6,21. Elle serait l'une des étoiles les plus massives connues.

Gliese 710 : naine orange (K5 V) s'approchant rapidement du Système solaire de magnitude 9,23. Elle pourrait pénétrer dans le nuage de Oort dans 1,4 millions d'années.

HIP 23641 (HD 33487) est une naine orange de la Constellation de la Dorade de magnitude 9,27 qui doit s'approcher du Système solaire dans 1,3 Millions d'années.

Proxima Centauri est l'étoile la plus proche du Soleil. C'est une naine rouge (M5,5 Ve) de magnitude 11,05.

Sirius est l'étoile principale de la constellation du Grand Chien. C'est une étoile blanche (A1 V) de magnitude -1,46, la plus brillante du ciel. Elle a une naine blanche pour compagne.

V838 Monocerotis est une étoile de la constellation de la Licorne qui a produit un éclat très intense le 6 Janvier 2002, devenant la plus brillante de la Galaxie. Cela aurait être la conséquence d'une collision entre deux étoiles. Sa magnitude apparente est de 15,74 avec une distance de 20000 al.

Groupements d'étoiles

Amas ouverts ou galactiques : ils groupent de l'ordre de 100 à 1000 étoiles du même âge, liées entre elles par la gravitation. Ils sont situés près du plan galactique.

Les Pléiades : amas de la constellation du Taureau, connu depuis l'Antiquité, faisant près de deux degrés de diamètre et situé à près de 360 al. Il serait âgé d'une centaine de millions d'années. 3000 étoiles y appartenant ont été dénombrées à ce jour.

Les Hyades : amas, situé aussi dans le Taureau, le plus proche. Son diamètre est de l'ordre de 5°. Il est situé à 151 al. Il serait âgé de 625 millions d'années.

Amas globulaires : amas stellaire très dense, comprenant typiquement une centaine de milliers d'étoiles. Ces objets sont distribués de manière isotrope dans le halo galactique.

47 Tucanae : amas globulaire situé dans le Toucan. Sa distance est de l'ordre de 16700 al. Son diamètre est de 31' et son âge est estimé à 13,06 milliards d'années.

M13 ou Amas d'Hercule : situé dans la constellation d'Hercule à 22200 al. Il fait 20' de diamètre et il aurait un âge de 11,65 milliards d'années.

Autres groupements stellaires

Une association stellaire est un groupement d'étoiles ayant un mouvement propre similaire. Contrairement aux amas ouverts, leurs étoiles ne sont plus liées gravitationnellement. On a défini des associations OB constituées d'étoiles chaudes,

des associations T associés aux étoiles jeunes du type T Tauri, présents près des nuages moléculaires et des associations R liées aux nébuleuses par réflexion.

Les courants stellaires sont des ensembles uniquement liés au mouvement propre. Contrairement aux associations les étoiles n'y sont pas groupées.

Les courants de marée sont des courants stellaires liés à la déformation d'un amas globulaire ou d'une galaxie naine par effet de marée galactique.

La ceinture de Gould est un anneau partiel d'étoiles de 3000 al de diamètre, comprenant de nombreuses associations OB. Le Soleil est situé à 325 al de son centre. Il serait âgé de 30-50 millions d'années.

Matière interstellaire

Les régions HI sont des nuages interstellaires composé d'hydrogène atomique neutre. Elles sont détectables à la longueur d'onde de 21 cm.

Les régions HII sont des nébuleuses en émission constituées de nuage composés principalement d'hydrogène en grande partie ionisé.

La nébuleuse de la Carène est une grande nébuleuse comprend plusieurs amas stellaires. Elle est située à près de 10000 al.

La nébuleuse d'Orion est la nébuleuse en émission la plus lumineuse, avec un diamètre angulaire autour d'un degré. Elle est à 1340 al et elle a un diamètre linéaire de 33 al.

Les nébuleuses par réflexion sont des nuages de poussières qui diffusent la lumière des étoiles voisines.

Les nébuleuses obscures sont des régions où les poussières du milieu interstellaire sont concentrées en grands nuages, obscurcissant la lumière des sources en arrière-plan.

La nébuleuse de la Tête de cheval (Barnard 33) est une nébuleuse obscure dans la constellation d'Orion. De dimension 8'x6', elle est située à 1500 al.

Les nébuleuses planétaires sont des nébuleuses en émission, constituées d'une coquille de gaz en expansion, éjecté d'une étoile en fin de vie.

Nébuleuse Hélix : située dans le Verseau à 489 al de la Terre. Son diamètre est de 25'.

L'Homoncule est la nébuleuse autour d'Éta Carinae.

Restes de supernovae : appelés aussi rémanents de supernovae. Ce sont les nébuleuses issues de la matière éjectée lors de l'explosion d'une étoile en supernova.

Dentelles du Cygne: rémanent de supernova dont l'explosion daterait d'une dizaine de milliers d'années. D'une taille angulaire de 230'x160', elle se situe à environ 1440 al.

Nébuleuse du Crabe (M1) : rémanent de SN 1054. Sa taille est de 6'x4' et elle est située à 6200 al.

Nébuleuse de Gum (Gum 12) : énorme rémanent de supernova de 40° de diamètre dans les constellations des Voiles et de la Poupe. Elle est à environ 1300 al. L'explosion a dû avoir lieu il y a un million années.

Les bulles interstellaires sont des structures nébuleuses autour d'un groupe d'étoiles formées à partir des vents stellaires et de l'explosion de supernovae.

La bulle locale est une région de quelques centaines d'al autour du Soleil émettant un surplus en rayons X. Elle aurait été engendrée par l'explosion de supernovae il y a quelques millions d'années.

Les nuages moléculaires sont des nébuleuses suffisamment denses pour permettre la formation de molécule, dont celle de l'hydrogène, H₂.

L'anneau circum-nucléaire est un anneau de gaz et de poussière tournant à proximité du centre de la Galaxie.

Galaxie

La Voie lactée désigne d'abord la grande bande lumineuse couvrant un grand cercle céleste avec une épaisseur d'une dizaine de degré, mais aussi la Galaxie contenant le Système solaire. Cette désignation ne date que du 18^e siècle.

Composantes

Barre : structure stellaire en forme d'ellipsoïde allongé centré sur le centre de la Galaxie.

Bras spiral : structure lumineuse, formée d'étoiles jeunes et de matière interstellaire, en forme de spirale autour du centre de la Galaxie

Bras Ecu-Croix : bras spiral appelé aussi bras du Centaure.

Bras Sagittaire-Carène : bras situé entre Ecu-Croix et le bras d'Orion.

Disque galactique : structure stellaire très aplatie de la Galaxie.

Bulbe galactique : partie centrale entourant le noyau en forme plus ou moins sphérique.

Halo galactique : structure très peu dense et d'un diamètre de l'ordre de 100000 al.

Centre galactique : centre de rotation de la Galaxie, situé à 27000 al du Soleil.

Sagittaire A : région située autour du noyau.

Sagittaire A* : noyau de la galaxie, probablement formé par un trou noir.

Les Résonances de Lindblad correspondent à des points de la Galaxie pour lesquels il y a un rapport simple entre les fréquences épicycliques des orbites des étoiles et de la rotation de la Galaxie. Ces résonances jouent un rôle important dans l'apparition des structures spirales.

Cosmologie & Univers extragalactique

La théorie du Big-Bang est le modèle cosmologique utilisé aujourd'hui pour décrire la formation et l'évolution de l'Univers.

Inflation (cosmologie) : modèle s'insérant dans le cadre du Big-Bang qui comprend une phase d'expansion extrêmement violente très tôt dans l'histoire de l'Univers.

Lambda-CDM : modèle avec un Univers homogène et isotrope, de courbure spatiale nulle, comprenant de la matière noire froide et de l'énergie noire. C'est le modèle standard aujourd'hui de la cosmologie basée sur le Big-Bang.

Fond diffus cosmologique (ou cosmique) est un rayonnement électromagnétique isotrope dans le domaine des ondes millimétriques, correspondant à un corps noir de 2,728 K. Il serait le rayonnement fossile du Big-Bang.

Galaxies

Les galaxies spirales sont des ensembles comprenant plusieurs de centaines de milliards d'étoiles. Elles ont une forme de disque avec un renforcement central, le bulbe. Les bras spiraux correspondent aux étoiles les plus jeunes, formées par un accroissement local de la densité

Les Nuages de Magellan sont deux galaxies naines irrégulières voisines de la Galaxie, visibles dans l'hémisphère sud.

La galaxie d'Andromède (M31 ou NGC224) est la galaxie spirale la plus proche de la Voie lactée à environ 2,54 millions d'al. Elle est visible à l'oeil nu ($m=3,4$) et fait un diamètre de $3^{\circ}18$.

M32 est une galaxie elliptique, satellite de M31.

La galaxie naine du Sagittaire est un satellite de la Voie lactée de 10000 al, située à environ 80000 al du Soleil et 50000 al du centre de la Galaxie.

La galaxie naine du Grand chien est la galaxie la plus proche de la Galaxie, à 42000 al du centre galactique et à 25000 al du Soleil.

Noyau actif de galaxie : région centrale d'une galaxie ayant un excédent d'émission d'énergie dans tous les domaines de longueur d'onde. On pense que cette émission est liée à l'accrétion de matière par un trou noir central. Une partie de l'énergie est émise dans un jet perpendiculaire au disque d'accrétion.

Un quasar est la partie centrale d'une galaxie abritant un noyau particulièrement actif. L'orientation du jet joue un rôle important dans le rehaussement de l'énergie émise par le jet par rapport au reste de la galaxie.

Groupes de galaxies

Le Groupe local est un ensemble d'une quarantaine de galaxies autour de la Voie lactée. Son diamètre est de l'ordre de 10 millions d'al.

Un amas de galaxies est un groupement de plus d'une centaine de galaxies.

Le superamas de la Vierge ou superamas local est une structure comprenant le Groupe local et d'autres amas de galaxies. L'amas de la Vierge en serait le centre. Son diamètre est de 200 millions d'al.

Le superamas Laniakea serait la plus structure dynamique contenant la Galaxie, le Groupe local et le Superamas de la Vierge. Son diamètre serait de l'ordre de 500 millions d'al.

Instruments, missions

Missions Gamma

BATSE est une expérience à bord de l'observatoire américain en rayons gamma Compton (1991-2000).

HETE est un satellite américain, avec une présence principale des japonais et des français, permettant l'observation des sursauts gamma à plusieurs longueurs d'onde (2000-2006).

SWIFT est un télescope USA/Italie/UK (2004-2010) en rayons gamma.

Le télescope spatial Fermi de la NASA est un instrument d'observation en rayons gammas lancé en 2008.

Missions X

BeppoSAX est un télescope italo-américain-hollandais (1996-2002) dans le domaine des rayons X mous (100 eV) jusqu'aux rayons gamma (300 keV).

Instruments dans le visible et le proche infrarouge

Gaia est une mission de l'agence spatiale européenne lancée en décembre 2013. Elle doit établir une carte avec une très grande précision de la Galaxie.

HIPPARCOS a été une mission de l'ESA ayant permis la mesure précise des positions, de la parallaxe et du mouvement propre de 2,5 millions d'étoiles (1989-1993).

Le télescope spatial Hubble est une mission américaine, avec une participation européenne, qui a permis d'obtenir des images avec une excellente résolution spatiale de l'Ultraviolet au proche infrarouge. Lancé en 1990, il fonctionne toujours en 2014.

Kepler est un télescope américain lancé en 2009 pour la détection des explanètes.

L'observatoire Gemini est constitué de deux télescopes de 8m, l'un à Hawaï, l'autre au Chili. Il est géré par un consortium EU, Canada, Brésil, Argentine, Chili et Australie. Le Royaume-Uni s'en est retiré.

Le Very Large Telescope est un ensemble de 4 télescopes de 8m20 et de 4 télescopes de 1m80 situé sur le Mont Paranal au Chili. C'est un projet de l'Observatoire européen austral (ESO). Il permet d'observer en mode interférométrique les étoiles (VLT), ce qui a permis d'obtenir des images à une résolution exceptionnelle.

Missions en infrarouge

SOFIA est un télescope infrarouge (1 μm à 0,655 mm) aéroporté USA (NASA) / Allemagne (DLR).

Missions en ondes millimétriques

COBE est un télescope spatial américain avec trois instruments, deux en infrarouge lointain et DMR dans les ondes millimétriques (1989-1993). Il a permis de mettre en évidence les fluctuations du fond cosmique microonde.

PLANCK est un télescope spatial ESA/NASA dans le domaine microonde qui a permis de cartographier le fond diffus cosmologique avec un gain en précision (2009-2013).

Détection des astéroïdes

Spaceguard est le programme américain global, lancé en 1992, concernant les efforts pour découvrir et suivre les géocroiseurs

Le Catalina Sky Survey est un projet américain de découverte de comètes et d'astéroïdes. Il est au 6e rang des astéroïdes numérotés.

LINEAR est un programme américain (MIT) de détection et de suivi des astéroïdes. Il est au premier rang des astéroïdes numérotés, avec 231082 découvertes dont 2423 géocroiseurs (2011/09/15).

LONEOS est un programme américain de détection et de suivi des astéroïdes. Il est au quatrième rang des astéroïdes numérotés, avec 18601 découvertes (2012/09/19).

NEAT a été un programme américain de détection et de suivi des astéroïdes (1995-2007). Il est au troisième rang des astéroïdes numérotés, avec 34183 découvertes (2012/09/19).

NEOWISE est le prolongement de la mission américaine WISE, d'exploration à grand champ en Infrarouge, pour la détection des géocroiseurs. 34000 astéroïdes ont été détectés, dont 135 géocroiseurs (2009-2011).

Pan-STARRS est un nouvel instrument américain pour la détection et le suivi des astéroïdes.

Spacewatch est un programme américain de détection et de suivi des astéroïdes.

CINEOS est un observatoire italien dédié à la détection et au suivi des astéroïdes.

ADAS est un programme italo-allemand de détection et de suivi des astéroïdes.

Bases de données

NEODyS est un site italien de suivi des géocroiseurs.

Sentry est un système automatisé de prévision de collision des astéroïdes avec la Terre.

WEBDA est un site dédié aux étoiles des amas stellaires.

3. Géophysique

Phénomènes

Un aérosol est un ensemble de particules en suspension dans un milieu gazeux. Les aérosols interviennent dans les phénomènes de pollution de l'air.

Le bouclier magnétique terrestre est un champ magnétique entourant la Terre et interagissant avec le vent solaire. Ce vent est un flux de particules ionisées et d'électrons issus de la haute atmosphère du Soleil.

La cosmoclimatologie est une thèse liant le climat au flux de rayons cosmiques.

Le flux de rayons cosmiques (Cosmic ray flux, CRF) arrivant sur Terre dépend du vent solaire, du champ magnétique terrestre et du flux de rayons cosmiques provenant de l'espace interstellaire.

Un inlandsis ou calotte polaire est un immense glacier recouvrant des terres et pouvant se prolonger jusqu'à la mer. Il en existe deux aujourd'hui, en Antarctique et au Groenland.

Le minimum de Maunder correspond à une période où le nombre de taches solaires étaient significativement plus faibles (1645-1715). Elle correspond aussi à une période de petit âge glaciaire.

Une pluie acide correspond à une forme de précipitation particulièrement acide. Il existe des origines naturelles à ces émissions (éruptions volcaniques, décomposition biologique, feux de forêts). L'activité humaine est responsable d'une partie croissante de ces pluies.

Une régression marine est un retrait durable de la mer, avec un abaissement de la ligne de côte. Plusieurs phénomènes géophysiques peuvent y conduire.

Une ride médio-océanique ou une dorsale est une frontière de divergence entre deux plaques tectoniques.

Une strate géologique est une couche de roche ayant des caractéristiques propres.

La tectonique des plaques est le paradigme actuel du fonctionnement interne de la Terre. La lithosphère (couche externe de la Terre) est découpée en plaques rigides flottant et se déplaçant sur l'asthénosphère.

Les trapps (escalier en suédois) sont des très vastes plateaux continentaux constitués d'épais dépôts basaltiques.

Un tsunami est une onde océanique, marine ou lacustre provoquée par un mouvement rapide d'un grand volume d'eau.

Impacts

Le cratère de Boltysch est situé en Ukraine. Il a une taille de 24 km, avec un âge de 65,17 millions d'années. Il serait contemporain d'autres astrobènes (cratères d'impact).

Le cratère de Chicxulub est situé dans le Yucatan. Il aurait été provoqué par la chute d'un astéroïde de 10 km de diamètre. Il est âgé de 66,038 millions d'années. Cet impact est considéré comme responsable de la disparition des dinosaures non aviens.

Le cratère Shiva est une structure géologique de 500 km de diamètre située dans l'océan indien, au large de Bombay. Il aurait pu avoir joué un rôle majeur dans l'extinction K-T, mais la plupart des géophysiciens ne le considère pas comme un cratère d'impact.

Le cratère de Silverpit est situé en Mer du Nord. Il serait contemporain de celui de Chicxulub. Il fait un diamètre de 2,4 km. On pense que l'impacteur devait avoir un diamètre de 120 m.

L'événement de la Toungouska est une explosion survenue le 30 juin 1908 en Sibérie centrale. Aucune trace n'a été trouvée, mais on pense qu'il s'agissait d'un impact avec un objet d'une cinquantaine de mètres de diamètre.

Le météorite de l'Oural a été observé à Tchelibinsk le matin du 15 février 2013. Son diamètre a été estimé entre 15 et 17 m. Son origine extraterrestre est indubitable.

Divers

Anoxie : correspond en écologie au manque d'oxygène dissous, dans un milieu aquatique ou dans un sédiment immergé.

Chimiocline : interface entre différentes couches d'eau, dans une mer ou dans un lac, qui ne se mélangent pas.

Stromatolithe : roche calcaire ou structure marine construits par des communautés bactériennes, où dominent les cyanobactéries.

Sidérophile : élément chimique fréquemment associé au fer en raison de son affinité pour cet élément à l'état liquide. Ils s'opposent aux lithophiles qui s'associent aux oxydes minéraux en raison d'une affinité pour l'oxygène.

4. Sciences de la Vie

Biochimie

La catalyse est le phénomène de modification significative de la vitesse d'une réaction chimique sous l'effet d'une autre substance, appelée catalyseur.

La lignine est l'un des principaux composants du bois

Les acides aminés sont des composés chimiques ayant à la fois un groupe carboxyle (-COOH) et un groupe amine (-NH₂). Parmi eux, les acides α-aminés ont leur groupe amine adjacent au carbone du groupe carboxyle. Ces derniers acides sont les constituants élémentaires des protéines. Ils forment les peptides en se polymérisant. Les protéines de l'ensemble des êtres vivants ne sont formées que de 22 acides aminés.

Les nucléotides sont des molécules organiques de base d'un acide nucléique (ADN ou ARN).

Classification

Un clade est un groupe d'organismes, vivants ou non, comprenant un organisme particulier et ses descendants.

La cladistique classe les êtres vivants selon leurs relations de parenté, dans un cadre évolutionniste. Cela conduit à construire des clades.

La classification phylogénétique des organismes, vivants ou disparus, tient compte du degré de parenté entre eux et permet donc de comprendre leur histoire évolutive.

Un taxon est une entité regroupant tous les organismes vivants ayant en commun des caractères définis.

Un groupe est paraphylétique s'il ne rassemble pas tous les descendants d'une espèce souche.

Le dernier ancêtre commun (DACU) ou le *last universal common ancestor* (LUCA) est le dernier ancêtre hypothétique de tous les êtres vivants, la racine de la classification phylogénétique. Cette entité reste théorique.

Botanique

Phytoplancton : ensemble des organismes végétaux vivants en suspension dans l'eau. Il produirait la moitié de l'oxygène consommé par l'ensemble des êtres vivants et par les volcans.

Un cryptogame est un organisme végétal se caractérisant par des organes reproducteurs cachés ou peu apparents. Cette notion est à opposer à phanérogame.

Les gymnospermes sont des plantes dont l'ovule est à nue, à la différence des angiospermes. La plupart des gymnospermes sont des conifères. Les Cycas sont aussi des gymnospermes. Les progymnospermes sont des plantes fossiles rappelant les gymnospermes mais ils se reproduisaient avec des spores (comme les fougères) et non des graines (comme les conifères).

Les monocotylédones sont des plantes à fleurs dont la plantule ne présente qu'un seul cotylédon sur l'embryon, le cotylédon étant une feuille primordiale constitutive de la graine. Les dicotylédones en contiennent deux, les conifères de dix à douze.

Le polype est un anthozaire, une des deux formes des cnidaires. Le corail est constitué d'une colonie de polypes.

Les tubiphytes sont un genre d'algues calcaires du Trias.

Biologie

La chorde ou notochorde est une structure embryologique cartilagineuse spécifique de l'embranchement des chordés.

L'amnios ou sac amniotique est la plus interne des enveloppes du fœtus.

Le métabolisme est l'ensemble des réactions chimiques se déroulant au sein d'un être vivant pour se maintenir en vie, se reproduire, se développer et répondre aux stimuli de son environnement.

Génétique

L'acide désoxyribonucléique (ADN) est une molécule présente dans toutes les cellules vivante, qui renferme l'ensemble des informations nécessaires au développement et au fonctionnement d'un organisme.

L'acide ribonucléique (ARN) est une molécule présente dans pratiquement tous les organismes vivants, et dans certains virus. L'ARN est très proche de l'ADN.

Divers

Le benthos est l'ensemble des organismes aquatiques (benthiques) vivant à proximité du fond des mers, des océans, des lacs et des cours d'eau. Ce terme s'oppose à pélagos pour les organismes (pélagiques) occupant du fond à la surface.

La biocénose est l'ensemble des êtres vivant dans un espace défini (biotope).

L'abiogénèse est l'ensemble des théories expliquant l'émergence de la vie à partir de matière inorganique inanimée.

La panpermie est une théorie affirmant que la Terre aurait été fécondée de l'extérieur, par des moyens extraterrestres.

5. Phénotypes mentionnés

Pour établir ce tableau des phénotypes (règnes, domaines, embranchements, classes, ordres, familles, genres) mentionnés, j'ai consulté les pages de Wikipédia correspondant à chacun. J'ai constaté plusieurs divergences entre elles. J'aurais aimé donner la classification phylogénétique, mais elle n'est pratiquement pas mentionnée dans ces pages. J'ai souvent gardé la dénomination latine, officielle pour les phénotypes.

Procaryota (domaine)

Bactéries (régne)

Cyanobactéries (division)

Archée (régne)

Eukaryota (domaine)

Animalia (régne)

Arthropoda (embranchement)

Chelicerata (sous-embranchement)

Arachnida (classe)

Trilobita (classe)

Hexapoda (sous-embranchement)

Insecta (classe)

Ptegygota (sous-classe)

Coleoptera (ordre)

Myriapoda (sous-embranchement)

Bilateria (infra-régne)

Deusterostomia (division)

Chordata (embranchement)

Vertebrata (sous-embranchement)

Conodonta (classe)

Tetrapoda (super-classe)

Amniota (clade)

Reptilia (classe obsolète)

Sphenodontia (ordre)

Sauropterygia (ordre)

Nothosauroidea (famille)

Plesiosauria (ordre)

Plesiosauridae (famille)

Plesiosaurus (genre)

Mammalia (classe, mammifères)

Plesiadapiformes (ordre)

Plesiadapidae (famille)

Plesiadapis (genre)

Prototheria (sous-classe)

Theria (sous-classe)

Placentalia (infra-classe)

Primates (ordre)

Eutheria (infra-classe)

Proboscidea (ordre)

Mammutidae (famille)

Mammut (genre, Mastodonte amér.)

Elephantidae (famille)

Mammuthus (genre)

Agnatha (classe ou super-classe)

Myxinoidea (sous-classe)

Aves (classe)

Hesperonithiformes (ordre)

Archaeopterygiforme (ordre)

Archaeopterygidae (famille)

Archaeopteryx (genre)

Chondrichthyes (classe)

Placodermi (classe)

Osteichthyes (superclasse)

Actinopterygii (classe)

Teleostei (infraclasse)

Sarcopterygii (classe)

Coelacanthiformes (ordre)

Synapsida (classe/clade)

Pelycosauria (ordre)

Therapsida (ordre)

Lystrosauridae (famille)

Cynodontia (so)

Sauropsida (classe)

Anapsida (sous-classe) (Chéloniens)

Captorhinida (ordre)

Bolosauridae (famille)

Eudibamus (genre)

Lepidosauria (super-ordre)

Ichtyosauria (ordre)

Squamata (ordre)

Sauria (sous-ordre)

Mososauridae (famille)

Diapsida (sous-classe)

Araeoscelidia (ordre)

Aphelosaurus (famille)

Archosauromorpha (infra-classe)

Therapsida (ordre)

Pterosauria (ordre)

Archosauria (non classé)

Crurotarsi (non classé)

Choristodera (ordre)

Champsauridae (famille)

Champsosaurus (genre)

Dinosauria (super-ordre)

Ornithischia (ordre)

Saurischia (ordre)

Theropoda (sous-ordre)
Coelurosauria (infra-ordre)
Tyrannosauridae (famille)
Tyrannosaurinae (sous-famille)
Tyrannosaurus (genre)
Maniraptora (clade)

Hemichordata (embranchement)

Graptolitha (classe)

Eumetazoa (sous-règne)

Cnidaria (embranchement)

Anthozoa (classe)

Corail

Actiniaria ou Anémone de mer (ordre)

Parazoa (sous-règne)

Porifera (*embranchement*)(*spongiaires*)

Demospongiae (c)

Chordata

Ambulacraria (super-embranchement)

Echinodermata (embranchement)

Crinozoa (sous-embranchement)

Crinoidea (classe)

Lophotrachozoa (sous-division)

Ectoprocta (embranchement)

Phoronozoa

Brachiopoda (embranchement)

Proarticulata (embranchement)

Dipleurozoa (classe)

Dickinsoniidae (famille)

Dickinsonia (genre)

Mollusca (embranchement)

Bivalvia (classe)

Heterodonta (sous-classe)

Hippuritoida (ordre, rudiste)

Cephalopoda (classe)

Ammonoidea (ordre)

Coleoidea (sous-classe)

Belemnoidea super-ordre

Gastropoda (classe, gastéropodes)

Chromalveolata (règne)

Rhizaria (division)

Retaria (super-embranchement)

Foraminifera (embranchement)

Stramenopiles (division)

Ochrophyta (embranchement)

Diatomeae (sous-embranchement)

Haptophyta (division)

Prymnesiophyceae (classe)

Coccosphaerales (Coccolithophoridés) (ordre)

Protostomia (rameau des bilatériens)

Plantae (régne)

Progymnospermophyta (division)

Archaeopteoidales (ordre)

Archaeopteris (genre)

Spermatophyta (division)

Spermatopsida (classe)

Bennettitales (ordre)

Tracheophyta (sous-règne)

Equisetophyta (division, sphénophytes)

Tracheobionta (sous-règne)

Coniferophyta (division)

Pinopsida (classe)

Pinales (ordre)

Podocarpaceae (famille)

Pinophyta (conifères) (division)

Cycadiphyta (Cycadées) (division)

Cycadopsida (classe)

Cycadales (ordre)

Cycadaceae (famille)

Cycas (genre)

Ginkgophyta (division)

Ginkgoopsida (classe)

Ginkgoales (ordre)

Ginkgoaceae (famille)

Magnoliophyta (division, angiospermes)

Magnoliopsida (classe, dicotylédone)

Hamamelidae (sous-classe)

Hamamelidales (ordre)

Platanaceae (famille)

Pteridophyta (division)

Filicophyta (sous-division, fougères)

Pteridospermatophyta (division)

Glossopteridales (ordre)

Glossopteridaceae (famille)

Glossopteris (genre)

Protiste (règne)

Incertain

Acritarche

6. Paléontologie

Échelle des temps géologiques

Éon : unité de l'histoire de la Terre. Cette histoire est divisée en quatre éons:

Éon Hadéen : entre -4,540 Ga et -3,8 Ga

Éon Archéen : entre -3,8 Ga et -2,5 Ga.

Éon Protérozoïque : entre -2,5 Ga et -0,542 Ga

Éon Phanérozoïque : depuis 542 Ma. Elle est aujourd'hui divisée en trois ères:

Ère paléozoïque entre -542 Ma et -252,2 Ma

Cambrien entre -542 Ma et -485,4 MA

Ordovicien entre -485, Ma et - 443,4 Ma

Silurien entre -443,4 Ma et -419,2 Ma

Dévonien entre -419,2 Ma et -358,9 Ma

Carbonifère entre -358,9 Ma et -298,9 Ma

Permien entre -298,9 Ma et -252,2 Ma

Ère mésozoïque entre -252,2 Ma et -66,0 Ma

Trias entre -252,2 Ma et -201,2 Ma
Jurassique entre -201,2 Ma et 145,0 Ma
Crétacé entre -145,0 Ma et -66,0 Ma
Ère cénozoïque depuis 66 Ma
Paléogène entre -66 Ma et -23 Ma
 Paléocène -66 Ma à -55,8 Ma
 Éocène -55,8 à -33,9 Ma
 Oligocène -33,9 Ma à -23 Ma
Néogène entre -23 Ma et -2,588 Ma
 Miocène -23 Ma à - 5,332 Ma
 Pliocène -5,332 Ma à - 2,588 Ma
Quaternaire depuis -2,588 Ma
 Pléistocène -2,588 Ma à - 0,0117 Ma
 Holocène depuis 11700 ans
 Anthropocène : période proposée à partir du 17^e siècle tenant compte de l'influence de l'homme sur le système terrestre.

Événements géologiques

Grande oxydation : crise écologique qui a eu lieu il y a 2,4 Ga, appelée aussi crise de l'oxygène.

Glaciation huronienne : période de l'histoire de la Terre entre -2,4 Ga et -2,1 Ga avec l'une des périodes glaciaires les plus longues de son histoire. Elle aurait pu résulter de la Grande oxydation.

Terre boule de neige : il s'agit d'une hypothèse selon laquelle l'ensemble de la surface de la Terre était recouverte de glace, il y a plus de 650 Ma.

Explosion du Cambrien : apparition soudaine, à l'échelle géologique, de la plupart des grands embranchements des animaux pluricellulaires (542-530 Ma). Il n'existe pas d'interprétation acceptée par tous de ce phénomène.

Extinction du Cambrien : autour de -480 Ma. 85% des espèces auraient disparues.

Extinction de l'Ordovicien-Silurien : autour de -440 Ma.

Extinction du Dévonien : se situe entre -380 à -365 Ma. 75% des espèces auraient disparu.

Extinction Permien-Trias il y a 252 Ma. 95% des espèces marines et 70% des espèces continentales ont disparu.

Extinction du Trias-Jurassique : il y a 200 Ma. 20% des espèces marines ont disparu.

Extinction du Crétacé-Paléogène (K-T) : il y a environ 66 Ma.

Grandes structures terrestres

Continents

Vaalbara est un supercontinent qui a commencé à se former il y a 3,6 Ga. Il aurait précédé le supercontinent Ur.

Ur : supercontinent qui se serait formé il y a 3 Ga. Il y a 2,8 Ga il fit partie du supercontinent Kenorland, il y a 2 Ga du supercontinent Columbia, il y a 1 Ga de Rodinia, il y a 550 Ma de Pannotia, il y a 300 Ma de la Pangée. Il y a 208 il devint des parties de Laurasia et de Gondwana. On retrouve des parties de Ur en Australie et à Madagascar.

Rodinia : supercontinent apparu il y a 1,1 Ga et disparu vers -750 Ma.

Pannotia : supercontinent qui aurait existé entre -600 et -540 Ma.

Gondwana : supercontinent forme vers -600 Ma et qui fracture vers -180 Ma. Il y a 290 Ma, il s'est intégré au supercontinent Pangée.

Laurussia est un supercontinent mineur créé au Dévonien. Il est ensuite intégré dans la Pangée.

Pangée : supercontinent qui aurait existé entre -290 Ma et -200 Ma. Il aurait rassemblé la quasi-totalité des terres émergées.

Laurasia : supercontinent issu de la Pangée vers 200-180 Ma. Il termina sa dislocation vers 55 Ma.

Océans

Mirovia : océan qui entourait la Rodinia entre 1,1 Ga et 800 Ma.

Paléothétys : océan qui séparait Gondwana et Laurussia au Paléozoïque.

Panthalassa : vaste océan qui entourait la Pangée.

Théthys est un océan qui s'est formé à travers la Pangée, séparant le Gondwana et Laurasia.

Montagnes

La chaîne hercynienne (ou varisque) s'est formé du Permien au Carbonifère lors de la collision entre le Gondwana et le Laurentia-Baltica pour former la Pangée.

Anthropologie

Néolithique : période de la Préhistoire ayant commencé au Proche-Orient vers 9000 ans avant J.-C. Il prend fin avec la généralisation de la métallurgie et l'invention de l'écriture vers 3000 avant J.-C.

Sahelanthropus tchadensis : nom donné à un ensemble de fossiles appartenant à une espèce éteinte de primate.

Toumai : premier spécimen de *Sahelanthropus tchadensis*. Son âge est estimé à 7 Ma.

7. Évolution des espèces

Concepts associés

Uniformitarisme, ou actualisme: principe de la Géologie postulant que les processus qui se sont exercés dans le passé lointain s'exerce encore de nos jours.

Gradualisme : hypothèse néo-darwinienne selon laquelle les espèces évoluent par micromutations successives.

Fitness (valeur sélective) : décrit la capacité d'un individu d'un certain phénotype à se reproduire.

Mutation : modification de l'information génétique dans le génome d'une cellule ou d'un virus.

Génétique des populations étude de la distribution et des changements de la fréquence des versions d'un gène sous l'influence des facteurs évolutifs.

Hypothèse de la Reine rouge : hypothèse proposée par Van Valen qui peut se résumer par: l'évolution permanente d'une espèce est nécessaire pour maintenir son aptitude suite aux évolutions des espèces avec lesquelles elle évolue.

Théories

Créationnisme : doctrine selon laquelle un ou plusieurs être divins sont les créateurs de la vivant.

Catastrophisme : théorie mettant en avant l'impact qu'auraient eu des catastrophes de courte durée sur l'origine du monde et l'évolution des espèces.

Fixisme : thèse selon laquelle il n'y a ni transformation ni évolution des espèces végétales ou animales. Chaque espèce serait apparue telle quelle au cours des temps.

Transformisme : théorie d'évolution des espèces (Lamarck) s'opposant au fixisme (Cuvier).

Théorie de la sélection naturelle (darwinisme) : théorie énoncée par Darwin sur l'évolution des espèces par transformation et sélection naturelle

Théorie synthétique de l'évolution (néodarwinisme) : cadre conceptuel pour l'étude de l'évolution tenant en compte les mutations, l'hérédité génétique, la sélection et la dynamique des populations.

Théorie des équilibres ponctués : développement de la théorie précédente proposée par Gould et Elredge postulant que l'évolution comprenait des longues périodes d'équilibre ou de quasi-équilibre, ponctuées par des brèves périodes de changements importants comme la spéciation ou les extinctions.

Modèles statistiques

Modèle de Van Valen : modèle d'évolution tenant compte de l'hypothèse de la reine rouge.

Modèle NK : modèle d'évolution tenant compte des interactions entre les espèces.

Modèle de Bak-Sneppen : modèle d'évolution basé sur l'interaction inter-espèces. C'est une simplification du modèle précédent. Il montre comment la criticalité auto-organisée peut conduire à des phases d'extinctions massives ou d'équilibres ponctués.

8. Personnages cités

Agassiz, Louis	Dewar, Roderick	Kepler, Johan
Alvarez, Luiz	Domainko, W.	Kirkby
Alvarez, Walter	Einstein, Albert	Kohler, M.
Arago, François	Elderedge, Niles	Kowalski, Richard
Aristote	Feng	Lamarck, Jean-Baptiste, Chevalier de
Asaro, Frank	Ferrière, Katia	Lambert, Jean-Henri
Auger, Pierre	Freese, Ralph von	Laplace, Pierre-Simon
Baade, Walter	Friis-Christensen,	Larson, Steve
Bailer-Jones, Coryn	Galilée, Galileo	Leibniz
Bak, Per	Gee, Mark	Leicht
Bambach, Richard	Gehrels, Tom	Lequeux, James
Becker, Luann	Gies, D.E.	Lin, C.C.
Bergson, Henri	Gould, Stephen Jay	Linblad, Bertil
Boltzmann	Guth, Alan	Linné
Bowell, Ted	Haldane, John	Lockwook, Mike
Brillouin, Léon	Halley	Lyell, Charles
Brunier, Serge	Helin, Eleanor	Manilius
Buffon, Georges-Louis, comte de	Helsel, J.W.	Mauray, Alain
Cairns-Smith, Graham	Herschel, Caroline	McMillan, Robert S.
Carnot, Sadi	Herschel, John	Melott, Adrian
Caroll, Lewis	Herschel, William	Mendel
Raup, David	Hertzprung	Michel, Helen
Cech, Thomas	Hess, Victor Franz	Miller, Stanley
Chapman	Hill, John G.	Millikan, Robert
Charlois, Auguste	Hoyle, Fred	Morison
Chatterjee, Sankar	Hubble, Edwin	Mulholland, Derral
Clausius, Rudolf	Huggins, William	Muller, Richard A.
Clube,	Humboldt, Alexandre von	Napier, William
Combes, Françoise	Hut, Piet	Nay, E.P.
Combes, Michel-Alain	Hutton, James	Newman
Compton, Arthur	Jaynes, Edwyn T.	Onsager, Lars
Cuvier, Georges	Jenniskens, Peter	Oort, Jan
Dar, Arnon	Kant, Emmanuel	Oparine, Alexandre
Davis, M.	Kapteyn, Jacob	Peiresc, Fabri de
Democrite	Kauffman	

Penfield, Glen
Penzias
Pollas, Christian
Potemine, Igor, Yu
Pravdo, Steven H.
Prigogine, Ilya
Rabinowitz, David
Rayet, Georges
Reeves, Hubert
Renne, Paul
Rienmuth, Karl Wilhem
Roddier, François
Rohde, Robert
Rosnay, Joël de
Russell, Bertrand

Russel
Schulte, Peter
Sepkovski, John
Shaddad, Muawia Hamid
Shannon, Claude
Shapley, Harlow
Shaviv, Neir
Shu, Frank
Smoot, George
Sneppen, Kim
Svensmark, Henrik
Urey, Harold
Trumpler, Robert
Van de Hulst, Hendrick
Van Houten, C.J.

Van Houtn-Groeneveld, I
Van Valen, Leigh
Vasisht
Verhulst, François
Whipple, Fred
Wickramasinghe,
Chandra
Wickramasinghe, Janet
Wilson
Wilson, Charles Thomson
Rees
Wirtanen, Carl A.
Witt, Gustave
Wolf, Charles
Wright, Thomas

Table des Figures

Figure 1. Représentation schématique du modèle du Big-Bang	6
Figure 2. Carte du fond cosmologique micro-onde obtenu à partir des données de la mission Planck.	8
Figure 3. De la nébuleuse primitive à la formation de la Terre.	10
Figure 4. De la formation du proto-Soleil jusqu'à la formation du couple Terre-Lune.	10
Figure 5. Arbre du vivant dans une classification linnéenne.	14
Figure 6. Arbre phylogénétique montrant la séparation entre les bactéries, les archées et les eucaryotes.	15
Figure 7. Classification phylogénétique du vivant.	16
Figure 8. Exemple de stromatolithe. Cette roche photographiée dans le Montana daterait d'un milliard d'années.	19
Figure 9. Exemple de fossile d'un Dickinsonia.	21
Figure 10. Vue d'artiste d'un fond marin du Cambrien.	22
Figure 11. Vue d'artiste d'un paysage marin de l'Ordovicien.	23
Figure 12. Vue d'artiste d'un paysage sous-marin du Silurien.	24
Figure 13. Vue d'artiste d'un paysage sous-marin du Dévonien.	24
Figure 14. Vue d'artiste d'une scène du Dévonien.	25
Figure 15. Vue d'artiste d'un paysage du Carbonifère.	26
Figure 16. Vue d'artiste d'un paysage Permien.	27
Figure 17. Vue d'artiste d'un paysage du Trias.	29
Figure 18. Vue d'artiste d'un paysage du Jurassique.	30
Figure 19. Vue d'artiste d'un paysage du Crétacé.	32
Figure 20. Vue d'artiste d'un paysage sous la mer du Crétacé.	32
Figure 21. Dessin d'artiste d'un Plésiadapis, l'ancêtre supposé des Primates.	33
Figure 22. Vue d'artiste d'un paysage du néolithique, vers -12 000 ans.	34
Figure 23. Statue de Georges Buffon au Jardin des Plantes de Paris.	42
Figure 24. Buste de Georges Cuvier au musée de Montbeliard.	42
Figure 25. Statue de Lamarck au Jardin des Plantes de Paris.	43
Figure 26. Portrait de Charles Lyell.	44
Figure 27. Portrait de Charles Darwin.	45
Figure 28. Photographie, à gauche Luiz Alvarez et à droite son fils Walter. Elle a été obtenue en 1981 devant une couche géologique associée à l'anomalie K-T à Gubbio, en Italie.	48
Figure 29. Variation avec le temps du taux d'extinction des espèces marines.	48
Figure 30 La zone d'impact de l'astéroïde du Chicxulub il y a 66 Ma.	54
Figure 31 Stratigraphie et indications schématiques des événements biotiques autour la discontinuité K-T et les liens avec les facteurs chimiques et minéralogiques.	56
Figure 32 Évolution du paramètre f pour une simulation à 100 espèces, après 50, 100, 200, 400, 800 et 1600 pas de simulations. On voit parfaitement apparaître un seuil qui progressivement monte. Lorsqu'il atteint une valeur autour de seuil, une avalanche se produit.	62
Figure 33 Evolution du modèle de Bak-Sneppen. En x les espèces, en y le temps. La couleur est relative à l'âge de l'espèce. On observe des époques pour lesquelles il va y avoir brutalement de nombreuses disparitions.	63
Figure 34 Zone de l'impact du météorite de 1908. En bleu la région pour laquelle le bruit a pu être entendu. ..	66
Figure 35 Répartition des impacts connus en 2010.	67
Figure 36 Statistique des impacts.	67
Figure 37 A gauche statistique de détection de tous les géocroiseurs, à droite statistique limitée aux objets de plus d'un kilomètre.	72
Figure 38 À gauche, statistique des géocroiseurs en fonction de la taille; à droite nombre cumulé de géocroiseurs selon la taille.	73
Figure 39 Image du géocroiseur Toutatis.	74
Figure 40 A gauche, pourcentages d'extinction utilisés pour l'analyse de Fourier ayant conduit à la figure de droite. Le pic correspond à une période de 26 Ma.	79
Figure 41 a (vert) : nombre d'espèces marines. b (noir) mêmes données après avoir soustrait des données de pauvre qualité. La ligne bleue est un polynôme du 3e degré donnant la tendance. c : la tendance est soustraite et l'ajustement sinusoïdal à 62 Ma est tracé. d : les données après soustraction du cycle de 62 Ma et le tracé de l'ajustement sinusoïdal à 140 Ma. e : le spectre de Fourier, les courbes bleue et rouge correspondent aux fonds.	80
Figure 42 À gauche, partie réelle du spectre croisé entre deux séries paléontologiques. À droite, coïncidence entre les maxima et la grille correspondant à la période de 27 Ma.	81

Figure 43 Nuage de Oort. Dimension par rapport aux autres composantes du système solaire.....	82
Figure 44 Photographie de la Voie lactée prise au Cap Palliser sur l'île nord de la Nouvelle-Zélande par l'Australien Mark Gee.	85
Figure 45 Image composite de l'ensemble de la Voie lactée obtenue en assemblant des photographies prises par Serge Brunier sur différents sites, dont principalement ceux de l'ESO au Chili sur le Mont Paranal et à la Silla.	86
Figure 46 Carte du Ciel sur laquelle a été tracée l'empreinte de la Voie lactée.	87
Figure 47 La Voie lactée dans l'hémisphère boréal.....	87
Figure 48 La Voie lactée dans l'hémisphère austral.....	88
Figure 49 Diagramme d'Hertzsprung-Russell des étoiles.....	91
Figure 50 Classification spectrale des étoiles.	92
Figure 51 Image de l'amas des Pléiades (M45) avec le télescope spatial Hubble.....	93
Figure 52 Amas M13 dans la constellation d'Hercule.	94
Figure 53 Image prise avec le télescope spatial Hubble de la nébuleuse d'Orion (M42).....	95
Figure 54 Nuage faisant partie de la Nébuleuse de la Carène. Dans son voisinage, on peut percevoir des étoiles récemment formées. La dimension de l'image, obtenue avec le HST, est de 2 années lumière.....	96
Figure 55 Nébuleuse obscure dite de la Tête de cheval observée par le télescope spatial Hubble.	96
Figure 56 La nébuleuse planétaire Hélix observée par le télescope spatial Hubble.	97
Figure 57 Image prise par le télescope spatial Hubble de la nébuleuse du Crabe, reste de la supernova de 1054.	98
Figure 58 Carte des nuages interstellaires à moins de 300 pc dans le plan galactique. La bulle est la zone blanche entourant le Soleil à environ 80 pc.....	98
Figure 59 Distribution de l'hydrogène neutre dans la Galaxie obtenue en 1958 par Oort et al.	99
Figure 60 Structures formées par les étoiles de la Galaxie.	100
Figure 61 À gauche, dessin des bras spiraux d'après Momani et al. 2006 À droite, plus récent dessin proposé par Martin Pohl et al. 2014	101
Figure 62 Courbe de rotation de la Galaxie.....	102
Figure 63 L'anneau circumnucléaire de la Voie lactée observées par le télescope spatial Hubble et l'instrument stratosphérique SOFIA en Infrarouge.....	104
Figure 64 Les galaxies principales du Groupe local.	106
Figure 65 Le superamas de la Vierge en coordonnées supergalactiques.	108
Figure 66 Flot de vitesse et densité de galaxies dans le superamas Laniakea (d'après Tully et al.).	108
Figure 67 Position du Soleil ces 500 dernières années dans la Galaxie. R est la distance au centre, Phi la position azimutale et Z la hauteur au dessus du plan galactique. Les croix correspondent aux 5 principales extinctions massives. En gras les auteurs ont porté les grandes phases d'âges glaciaires.....	110
Figure 68 du Soleil par rapport aux bras spiraux, dans l'hypothèse d'une vitesse des bras spiraux de 14,4 km/s/kpc. Les losanges correspondent à des positions du Soleil tous les 100 Ma.	111
Figure 69 Passage de HIP 23461 près du Soleil d'après les données de la mission HIPPARCOS.....	114
Figure 70 Comparaison du taux de couverture nuageuses à basses altitude (moins de 2 km) avec les variations du taux de rayon cosmique.....	119
Figure 71 Mécanisme de formation des nuages à partir du rayonnement cosmique d'après Svensmark (2007).119	119
Figure 72 Variation de l'activité solaire à partir du compte de taches depuis 1600.	120
Figure 73 Variations dans le flux de rayons cosmiques galactiques depuis 1700.....	120
Figure 74 En bleu, variations de la température de la mer dans les zones tropicales, en rouge variations du CRF.....	122
Figure 75 Variations reconstruites du taux de supernovae avec les époques géologiques.....	122
Figure 76 A gauche variations du taux de CO ₂ comparées à au taux de SN. À droite taux de ¹³ C comparé au taux de SN.....	123
Figure 77 À gauche, variations de O ¹⁸ comparées au taux de supernovae. À droite, Relation entre le taux de Supernovae et un taux d'invertébrés marins.	123
Figure 78 Flux GRB prédit en unités arbitraires depuis nos jours jusqu'au Cambrien. Les traits verticaux correspondent aux époques de 18 extinctions massives évaluées par Bambach (2006).	127
Figure 79 Localisation sur une carte du ciel des 88 constellations.....	136

Table des Matières

INTRODUCTION.....	3
CHAPITRE 1 : LA GENESE VERSION 2014.....	5
1. DU BIG-BANG A LA FORMATION DE LA TERRE.....	5
<i>La Création.....</i>	5
<i>L'Univers primordial.....</i>	5
<i>La première lumière.....</i>	7
<i>La formation de la Galaxie.....</i>	8
<i>La formation du Soleil.....</i>	9
<i>La formation de la Terre.....</i>	10
2. LA VIE TERRESTRE.....	10
<i>Qu'est-ce que la Vie?.....</i>	11
<i>L'origine de la Vie.....</i>	11
<i>Le monde à l'ARN.....</i>	12
<i>La panspermie.....</i>	12
3. LES ARBRES DE LA VIE.....	13
<i>Les premiers organismes vivants.....</i>	13
<i>La classification linnéenne.....</i>	13
<i>La classification phylogénétique.....</i>	15
4. LES QUATRE EONS.....	18
<i>L'éon Hadéen.....</i>	18
<i>L'éon Archéen.....</i>	19
<i>L'éon Protérozoïque.....</i>	19
<i>L'éon Phanérozoïque.....</i>	21
5. L'ERE PALEOZOÏQUE.....	21
<i>Le Cambrien.....</i>	21
<i>L'Ordovicien.....</i>	22
<i>Le Silurien.....</i>	23
<i>Le Dévonien.....</i>	24
<i>Le carbonifère.....</i>	25
<i>Le Permien.....</i>	26
6. L'ERE MESOZOÏQUE.....	28
<i>Le Trias.....</i>	28
<i>Le Jurassique.....</i>	30
<i>Le Crétacé.....</i>	31
7. L'ERE CENOZOÏQUE.....	33
<i>Le Paléogène.....</i>	33
<i>Le Néogène.....</i>	33
<i>Le Quaternaire.....</i>	34
8. L'EVOLUTION CREATRICE.....	35
<i>Finalité et Causalité.....</i>	35
<i>Le second principe de la thermodynamique.....</i>	35
<i>Entropie et information.....</i>	35
<i>L'auto-organisation.....</i>	36
<i>Le principe de la production maximale d'entropie.....</i>	37
<i>Chaos et Optimisation.....</i>	38
<i>Les grandes extinctions et l'évolution des espèces.....</i>	39
CHAPITRE 2 : LES EXTINCTIONS MASSIVES.....	41
1. L'EVOLUTION DES ESPECES.....	41
<i>Buffon et l'Histoire Naturelle.....</i>	41
<i>Cuvier et le Fixisme.....</i>	42
<i>Lamarck et le Transformisme.....</i>	43
<i>Lyell et l'Uniformitarisme.....</i>	44
<i>Darwin et la théorie de sélection naturelle.....</i>	45
<i>La théorie synthétique de l'évolution.....</i>	46

<i>Théorie des équilibres ponctuels</i>	46
2. LES DIFFERENTES EXTINCTIONS MASSIVES	47
<i>Le renouveau du catastrophisme</i>	47
<i>Les variations temporelles du taux d'extinction des espèces</i>	48
3. L'EXTINCTION DU CRETACE-PALEOGENE	49
<i>La signature de l'événement</i>	49
<i>Les populations disparues</i>	50
<i>Scénario possible</i>	50
<i>Les populations survivantes</i>	50
4. THEORIES CONCERNANT L'EXTINCTION K-T	51
<i>Les Trapps du Deccan</i>	52
<i>La régression marine</i>	52
<i>L'impact cosmique</i>	52
<i>Causes multiples</i>	55
<i>Scénario complet</i>	56
5. EXTINCTION DU PERMIEN-TRIAS	57
<i>Les faits</i>	57
<i>Tectonique des plaques</i>	57
<i>Activités volcaniques localisées</i>	58
<i>Anoxie localisée</i>	58
<i>Météorite</i>	58
6. LES AUTRES EXTINCTIONS MASSIVES	59
<i>Extinction du Cambrien</i>	59
<i>Extinction de l'Ordovicien-Silurien</i>	59
<i>Extinction du Dévonien</i>	59
<i>Extinction du Trias-Jurassique</i>	60
<i>Analyse</i>	60
8. MODELES D'EVOLUTION AVEC EXTINCTIONS MASSIVES	60
<i>Approche darwinienne</i>	60
<i>Hypothèse de la Reine rouge</i>	61
<i>Modèle de Van Valen</i>	61
<i>Le modèle NK</i>	62
<i>Le modèle de Bak-Sneppen</i>	62
<i>Autres modèles d'extinction</i>	63
CHAPITRE 3: LE BOMBARDEMENT DE LA TERRE	65
1. DEUX EVENEMENTS EXCEPTIONNELS	65
<i>Le Météorite de l'Oural</i>	65
<i>L'événement de la Toungouska</i>	65
2. LES IMPACTS CONNUS	66
<i>Identification</i>	66
<i>La statistique des impacts</i>	67
<i>Risques liés à la chute de météorites</i>	68
3. LES GEOCROISEURS	69
<i>Historique</i>	69
<i>Identification</i>	69
4. INVENTAIRE DES GEOCROISEURS	72
<i>Les différentes classes</i>	72
<i>Statistiques</i>	73
<i>Suivi des géocroiseurs</i>	73
5. QUELQUES OBJETS	73
<i>Toutatis</i>	73
<i>Aphophis</i>	74
<i>1950 DA</i>	75
<i>2002 NT7</i>	75
<i>VK184</i>	75
<i>2008 TC3</i>	75
<i>2012 DA14</i>	76
6. IMPACTS ET PASSAGES RECENTS	76
7. ORIGINE DES GEOCROISEURS	77

8. LIENS ENTRE LES GEOCROISEURS ET LES ETOILES FILANTES.....	77
CHAPITRE 4. CYCLES DE L'EVOLUTION DES ESPECES.....	79
1. ANALYSE DE FOURIER DU TAUX D'EXTINCTION	79
<i>Première Analyse.....</i>	79
<i>Analyse sur une durée plus longue</i>	79
<i>Analyse croisée de deux séries</i>	81
2. L'HYPOTHESE NEMESIS	81
<i>Thèse initiale</i>	81
<i>Caractéristiques attendues de Némésis</i>	82
<i>Problèmes de la théorie.....</i>	83
CHAPITRE 5 : LA VOIE LACTEE, NOTRE GALAXIE	85
1. DE LA VOIE LACTEE A LA GALAXIE	85
<i>Perception de la Voie lactée.....</i>	85
<i>Localisation.....</i>	87
<i>Une myriade d'étoiles</i>	88
<i>L'Univers-île.....</i>	89
<i>Le Modèle d'Herschel.....</i>	89
<i>Le Modèle de Kapteyn</i>	89
<i>La seconde révolution copernicienne</i>	89
2. LE MONDE DES ETOILES.....	90
<i>Classifications photométriques.....</i>	90
<i>Classifications spectrales</i>	91
<i>Autres classifications.....</i>	92
3. LES AMAS STELLAIRES	93
<i>Les amas galactiques.....</i>	93
<i>Les amas globulaires.....</i>	93
<i>Autres groupes stellaires</i>	94
4. LE MILIEU INTERSTELLAIRE.....	94
<i>Les nébuleuses gazeuses (ou régions HII).....</i>	94
<i>Les nébuleuses par réflexion</i>	95
<i>Les nuages moléculaires.....</i>	95
<i>Les nébuleuses obscures.....</i>	96
<i>Les nébuleuses planétaires</i>	96
<i>Les restes de supernovae</i>	97
<i>Les bulles interstellaires.....</i>	97
<i>Les Régions d'hydrogène neutre (HI).....</i>	99
3. LA STRUCTURE DE LA GALAXIE	100
<i>Les structures stellaires.....</i>	100
<i>Structures et matière interstellaire</i>	101
<i>La structure spirale</i>	101
<i>La rotation de la Galaxie.....</i>	102
<i>Origine de la structure spirale</i>	103
4. LE CENTRE GALACTIQUE	103
<i>La Barre</i>	103
<i>L'environnement central.....</i>	104
<i>Le trou noir central</i>	104
<i>L'activité du noyau.....</i>	105
5. L'ENVIRONNEMENT DE LA GALAXIE.....	106
<i>Le Groupe local.....</i>	106
<i>Le superamas de la Vierge</i>	108
<i>Structure à plus grande échelle</i>	108
6. LE SOLEIL DANS LA GALAXIE	109
<i>Position du Soleil.....</i>	109
<i>Les bras spiraux</i>	109
<i>Le mouvement des bras spiraux.....</i>	109
<i>Modèle de Gies et Helsel.....</i>	109
<i>Les résultats du modèle</i>	110
CHAPITRE 6 : LA GALAXIE ET L'EVOLUTION DES ESPECES.....	113

1. EXTINCTIONS MASSIVES ET PASSAGES DANS LES BRAS.....	113
<i>Influence de la Galaxie sur le nuage de Oort.....</i>	113
<i>Passages proches.....</i>	113
<i>Némésis pour des étoiles proches.....</i>	114
<i>Collision entre étoiles.....</i>	114
2. COLLISION AVEC DE GRANDS NUAGES MOLECULAIRES	115
<i>Les Grands Nuages Moléculaires (GNM).....</i>	115
<i>Les GNM et les extinctions massives.....</i>	115
<i>Les GNM et l'interaction non gravitationnelle.....</i>	116
3. VALIDITE STATISTIQUE DES ANALYSES	116
4. LE RAYONNEMENT COSMIQUE.....	116
<i>Historique.....</i>	117
<i>Origine.....</i>	118
<i>Périodicité dans le flux de rayonnement cosmique.....</i>	118
5. LA COSMOCLIMATOLOGIE.....	119
<i>Lien entre le climat et le rayonnement cosmique.....</i>	119
<i>Interprétation du climat lors du minimum de Maunder.....</i>	120
<i>Application au changement global du climat.....</i>	121
<i>Température de la mer et du CRF.....</i>	121
6. CRF ET EVOLUTION DES ESPECES.....	122
<i>CRF et supernovae.....</i>	122
7. EXTINCTION MASSIVE DIRECTE PAR UNE EXPLOSION STELLAIRE.....	124
<i>Les sursauts gamma.....</i>	124
<i>Historique.....</i>	124
<i>Origine.....</i>	125
<i>L'extinction Ordovicien/Silurien.....</i>	125
8. GRB, AMAS GLOBULAIRES ET EXTINCTIONS MASSIVES	126
<i>Les amas globulaires.....</i>	126
<i>Les binaires dans les amas globulaires.....</i>	126
<i>Histoire du flux GRB venant des amas globulaires galactiques.....</i>	126
<i>L'amas globulaire 47 Tucanae.....</i>	127
9. AUTRES ETOILES EXPLOSIVES	128
<i>Les supernovae.....</i>	128
<i>Les progéniteurs.....</i>	129
<i>Evolution des Wolf-Rayet.....</i>	129
<i>Éta carinae, une future GRB ?.....</i>	130
CONCLUSION.....	131
ANNEXE : GLOSSAIRE ORDONNE.....	133
1. PHYSIQUE.....	133
<i>Physique des Particules.....</i>	133
<i>Forces.....</i>	133
<i>Mécanique & thermodynamique.....</i>	134
<i>Spectroscopie.....</i>	134
2. ASTROPHYSIQUE	135
<i>Les Constellations.....</i>	135
<i>Système solaire.....</i>	140
<i>Étoiles.....</i>	142
<i>Groupements d'étoiles.....</i>	144
<i>Matière interstellaire.....</i>	145
<i>Galaxie.....</i>	146
<i>Cosmologie & Univers extragalactique.....</i>	146
<i>Instruments, missions.....</i>	147
3. GEOPHYSIQUE	149
<i>Phénomènes.....</i>	149
<i>Impacts.....</i>	150
<i>Divers.....</i>	150
4. SCIENCES DE LA VIE.....	150
<i>Biochimie.....</i>	150
<i>Classification.....</i>	151

<i>Botanique</i>	151
<i>Biologie</i>	151
<i>Génétique</i>	152
<i>Divers</i>	152
5. PHENOTYPES MENTIONNES.....	152
<i>Procaryota (domaine)</i>	152
<i>Eukaryota (domaine)</i>	152
6. PALEONTOLOGIE	157
<i>Échelle des temps géologiques</i>	157
<i>Événements géologiques</i>	158
<i>Grandes structures terrestres</i>	158
<i>Anthropologie</i>	159
7. ÉVOLUTION DES ESPECES	159
<i>Concepts associés</i>	159
<i>Théories</i>	160
<i>Modèles statistiques</i>	160
8. PERSONNAGES CITES	160
TABLE DES FIGURES	163
TABLE DES MATIERES	165