

1 La Terre plate

La plupart des civilisations humaines ont considérés que la Terre est un monde plat. C'est ce qui apparaît au premier abord. Ce qui observé par un être humain au cours d'une vie, sans autre moyen d'observation que sa vue. Cette image d'une Terre plate perdurera jusqu'au XVIème siècle. L'image la plus répandue sera des terres émergées entourée de mers tels que décrite par Anaximandre de Millet.¹

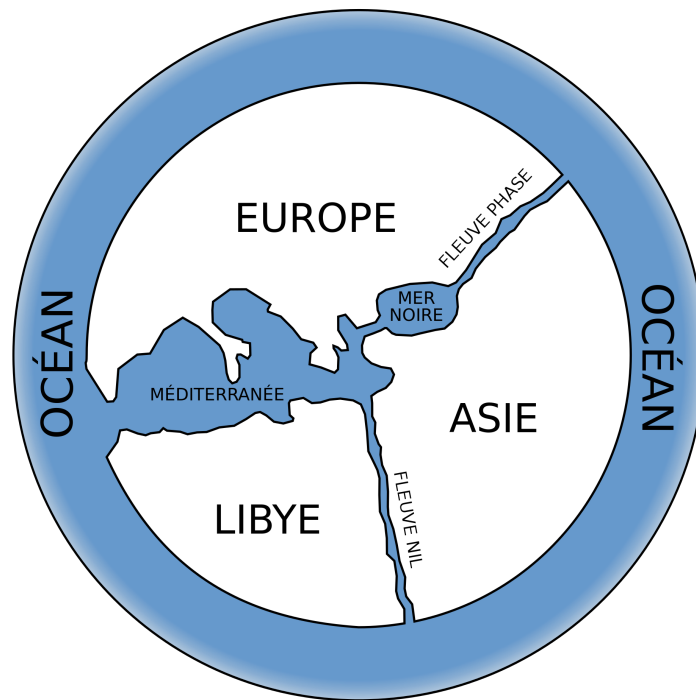


FIGURE 1 – Le monde d'Anaximandre

Cependant, l'observation de marins, comme les égyptiens du IIème millénaire avant J-C, montre que lorsque l'on rentre au port l'on voit d'abord le haut d'un phare et non sa base (ou le haut du mat d'un bateau quand on est sur la terre ferme). De plus, lors d'une éclipse lunaire, nous percevons bien l'ombre de la Terre sur la Lune. La Terre est donc sphérique.

1. VIème siècle av. J-C

2 Le système géocentrique de Ptolémée

2.1 La Terre est une sphère

Au VI^{ème} siècle avant J-C, Pythagore enseigne déjà que la Terre est sphérique.

Au II^{ème} siècle avant J-C, Ératosthène est un gréco-égyptien qui notamment fut à la tête de la bibliothèque d'Alexandrie. Il fut le premier à mesurer avec une bonne précision le périmètre de la Terre (40 000 km). Le schéma suivant montre sa méthode de mesure. Sa méthode repose sur la mesure précise au même moment de l'ombre de 1 mât l'un à l'Alexandrie et d'un trou (permettant de visualiser que le soleil est bien au Zénith) à Syène (aujourd'hui Assouan) et l'utilisation des triangles semblables.

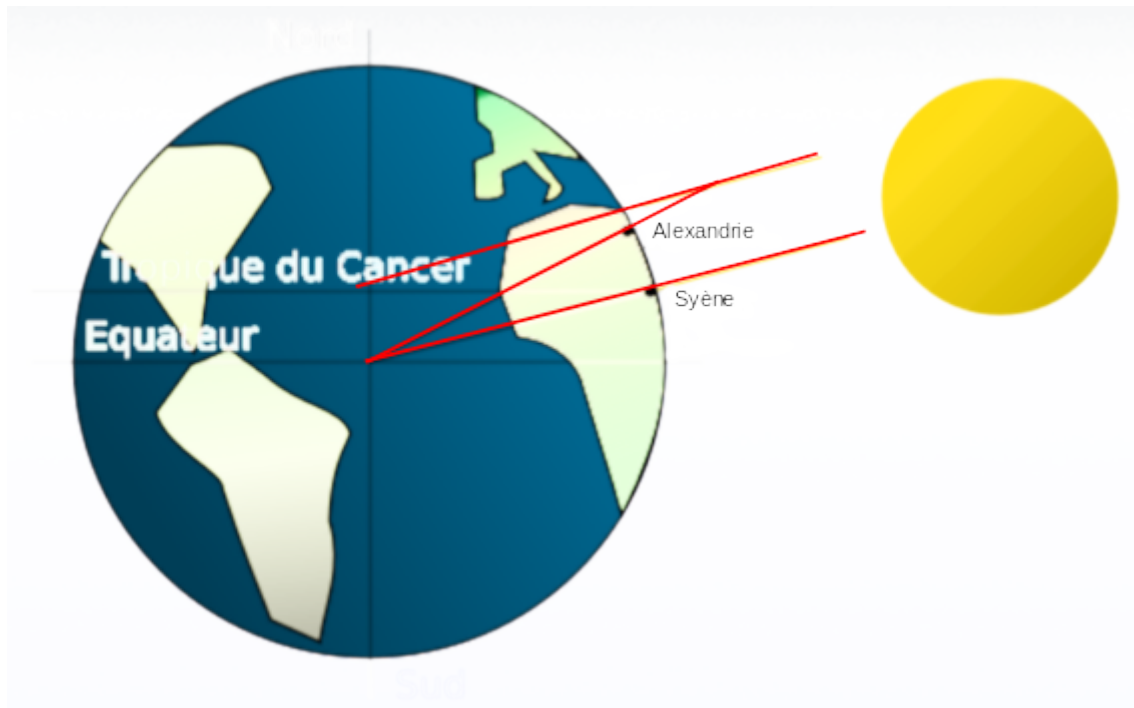


FIGURE 2 – Mesure de la circonférence de la Terre par Ératosthène

Afin de montrer que l'évolution du savoir n'est pas linéaire, mais est fait d'avancées et de reculs, il est intéressant de savoir que 3 siècle avant J-C (soit plus de 1700 ans avant Copernic), Aristarque de Samos fait déjà l'hypothèse héliocentrique. Aristarque de Samos tente (avec beaucoup d'erreurs) d'établir la distance Terre-Lune.

2.2 Le monde sub-lunaire et supra-lunaire de Ptolémée

Ptolémée est un astrologue gréco-égyptien qui vécut à Alexandrie au I^{er} siècle après J-C. Il fit la synthèse de la conception astrologique grecque.

La perfection est sphérique. La Terre est sphérique et au centre de l'Univers. Il existe deux mondes avec des lois différentes : le monde sublunaire et le monde supralunaire.

Le **monde sublunaire** est le monde qui s'étend de la Terre à la Lune. **C'est un monde imparfait.**

Le **monde supralunaire** s'étend au-delà de la Lune. **C'est un monde parfait** où vivent les divinités (d'où les noms des planètes et des constellations). Il explique le parcours rétrograde de certaines planètes (Mars) par des épicycles.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum.

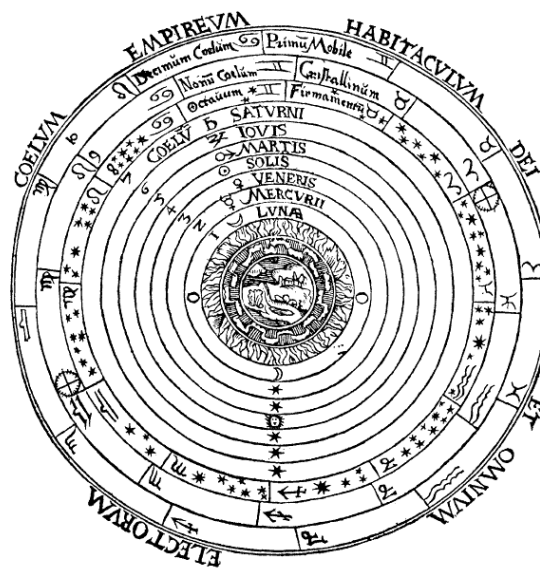


FIGURE 3 – Le monde selon Ptolémée.

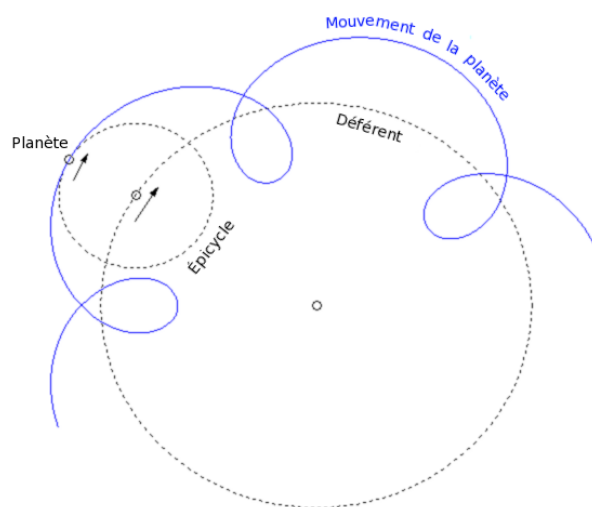


FIGURE 4 – Le mouvement des épicycles.

3 L'héliocentrisme

3.1 Copernic

Nicolas Copernic² est un chanoine³ catholique, mais aussi un astronome de langue allemande qui vécut dans l'actuelle Pologne au XVI^e siècle. Se rendant compte que le calendrier julien conduit à une décalage entre la date du calendrier et la position des astres⁴, le clergé catholique lui demande de résoudre ce problème. Ceci le conduit à être le premier à émettre l'hypothèse que le Soleil serait au centre de l'Univers. Cependant, il continue à expliquer le mouvement des planètes par des orbites circulaires (et compense les orbites elliptiques par des épicycles).

3.2 Tycho-Brahé

Tycho-Brahé⁵ est un grand mathématicien et astronome danois⁶ qui vécut au XVI^e siècle. Il effectue des mesures très précises de la positions des astres et il développe des outils mathématiques pour prédire leur position. Cependant, ces croyance religieuses l'empêchent d'adhérer à l'héliocentrisme. Il conçoit un monde avec deux centres ; la Terre et la Lune d'une part, et le soleil et les autres planètes d'autre part.

3.3 Kepler

Johannes Kepler⁷ est un astronome allemand, disciple de Tycho-Brahé. Il réutilisa les travaux de son maître dans une logique héliocentrique. Il est le **grand mathématicien de la révolution copernicienne**.

Il définit 3 lois reprises ci-dessous.

1. **Les orbites des planètes sont elliptiques et non circulaires, et le soleil occupe l'un des foyer.**
2. **La vitesse d'un astre en orbite elliptique augmente en passant de l'aphélie à la périhélie, et diminue en passant du périhélie à l'aphélie. Le mouvement de chaque planète est tel que le segment de droite reliant le Soleil et la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.**
3. $\frac{T^2}{R^3} = \text{constante}$ où T est la période et R est le rayon moyen.

3.4 Galilée

Galilée⁸ est un savant italien du XVI/XVII^e siècle. Il est le précurseur de science moderne par son affirmation que **les observations sont les arguments ultimes de la science**.

Il fit de grandes observation grâce à l'utilisation de la lunette astronomique (observations de la Lune, des satellites de Jupiter, des taches solaires, ...).

Il développa les notions d'inerties et de déplacement. Il est le premier à à développer la notion de relativité (en terme de position et de temps).⁹

2. 1473/1543

3. Un clerc de l'Église catholique intégré dans la société, s'occupant notamment des chants religieux.

4. et notamment l'équinoxe de printemps, dont dépendait la date de Pâques

5. 1546/1601

6. Le royaume de Danemark incorporait la Suède à l'époque.

7. 1571/1630

8. 1564/1642

9. Einstein étendra ensuite la notion de relativité en liant le temps et l'espace grâce à la vitesse de la lumière, et en liant cet espace-temps avec la densité de masse environnante.

Il affirma que la Terre tournait autour du Soleil. Traîné en procès par l'Église catholique en 1633, il dut se rétracter vu le risque de peine de mort qu'il encourait.

Un moine dominicain et philosophe, **Giordano Bruno**¹⁰, d'origine napolitaine contredit de façon véhémente la doctrine aristotélicienne de l'Église Catholique. Il est à l'origine de l'idée d'inertie (conservation du mouvement), d'infini de l'Univers, d'anti-géocentrisme (absence de centre de l'Univers) et de système mécanique (lors qu'un objet tombe, il conserve sa vitesse due au mouvement de la Terre) qui sera développé par la suite par Galilée. Il sera envoyé au bûcher en 1600 par l'Inquisition.

La prédiction du retour de la comète de Halley¹¹ par lui-même, mais après sa mort, finira par faire admettre que les orbites sont bien elliptiques et non circulaires.

La démonstration ultime du mouvement de la Terre sera donnée par le pendule de Foucault¹² en 1851.

3.5 Newton

Isaac Newton¹³ fut un philosophe, mathématicien/physicien, alchimiste et théologien anglais du XVII/XVIIIème siècle.

Il réutilisa les travaux de Galilée et Kepler pour développer la notion de force.

Il fut fortement influencé par René Descartes¹⁴ et par Gottfried Wilhelm Leibniz¹⁵.

La pensée physique de Newton peut se résumer en 3 lois :

- Principe d'inertie : **un corps conserve son mouvement en ligne droite**. L'ensemble des données d'un mouvement peuvent être décrit par rapport un système de référence cartésien (rectiligne).
- Principe de la dynamique de translation : le mouvement rectiligne d'un corps est dû à une **force motrice proportionnel à sa masse et à son accélération**.
- **Principe d'action-réaction** : toute force exercée sur un corps, génère une contre-force (force de réaction) opposée au sens de la force initial.

3.5.1 La notion de force

Alors que Kepler et Copernic ne faisait que décrire le mouvement des planètes, Newton va l'expliquer grâce à la notion de force.

Pour Newton, la force est le produit d'une masse par une accélération. La masse est différente du poids (masse pesante). La quantité de matière est différente des forces qui agissent sur cette matière.

$$F = m \times a \quad (1)$$

10. 1548/1600

11. astronome anglais 1656/1742

12. Léon Foucault, physicien et astronome français 1819/1868

13. 1642/1727

14. Philosophe et mathématicien français, 1596/1650

15. Philosophe et mathématicien allemand, 1646/1716

3.5.2 Force de gravitation

La force de gravitation (F_g) est la force dues à l'attraction de deux masses.

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{d^2} \quad (2)$$

où :

- G est la constante de gravitation universelle ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$)
- m_1 est la masse du premier objet
- m_2 est la masse du second objet
- d est la distance entre les deux objets

3.5.3 Force centrifuge

La force centrifuge (F_c) est la force due à la rotation de l'objet qui le pousse vers l'extérieur. Cette force est proportionnelle au carré de de la vitesse.

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (3)$$

où :

- m est la masse de l'objet
- v est la vitesse de l'objet
- r est le rayon du déplacement

3.5.4 Force de réaction

Si un objet est immobile par rapport à un autre, c'est que les forces s'équilibrent autour de cet objet.

Si on applique une force sur un objet (force d'action F_a) et que cet objet ne bouge pas, c'est qu'il produit lui-même une force (force de réaction F_r) qui contrecarre la force d'action.

$$F_a = F_r \quad (4)$$

De la même manière, si un satellite ne tombe pas, c'est la force de gravitation est contrecarrée par la force centrifuge.

$$F_g = F_c \quad (5)$$

4 La cosmologie contemporaine

4.1 Théorie de la relativité

A la fin du XIX^{ème} siècle, de nombreuses expériences montrent que la vitesse de la lumière est invariable. Ceci est en totale contradiction avec la théorie de Newton. Au début du XX^{ème} siècle, Albert Einstein développe un modèle mathématique tenant compte de cette observation. Ce modèle sera conforté dès les années 20 et confirmé par de nombreuses observations. Ce modèle impose que le temps et l'espace (l'espace-temps) sont des notions relatives à un objet (et non absolue comme dans la théorie de Newton).

Quelques conséquences de ce modèle :

- La lumière est déviée par les objets massiques
- Une augmentation de vitesse dilate le temps et contracte les distances
- L'espace-temps se courbe d'autant plus que la masse à proximité est grande.
- La gravité influence l'écoulement du temps.

Si l'on ne tenait pas compte de la relativité, les système de positionnement GPS générerait une erreur. En effet, la vitesse du satellite modifie son temps et donc les distance mesurées.

La théorie d'Einstein a été résumée par la formule :

$$E = mc^2$$

où

- E est l'énergie totale contenue dans la masse
- m est la masse de l'objet
- c est la vitesse de la lumière¹⁶

La première confirmation du modèle de la relativité générale a été confirmé par Eddington¹⁷ grâce à l'éclipse solaire du 29 mai 1919 en mesurant la déviation de la lumière d'étoiles proche du Soleil en deux points Sobral au Brésil et Sundry à Sao-Principe et Tomè¹⁸.

4.2 Galaxies, Big bang et Univers

Edwin Hubble est un astrophysicien américain qui mit en évidence dans les années 1920 que certaines structures sidérales appelées « nébuleuses » sont en fait un agencement de systèmes stellaires, semblable à la Voie Lactée. Il appela ces structures « galaxies », de l'ancien grec qui désignait la voie lactée.

Hubble observe également que les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse approximativement proportionnelle à leur distance. Autrement dit, plus une galaxie est loin de nous, plus elle semble s'éloigner rapidement.

Suite à cette découverte, une intense activité de cartographie du ciel est toujours en cours afin d'identifier les galaxies, les systèmes stellaires qui les composent avec leurs exoplanètes.

Ces observations permirent de mettre en évidence de nombreuses formes de structures stellaires (tels que étoile à neutrons -pulsar-, supernova, trou noir, géante rouge, naine blanche, ...) et leurs conditions de développement et d'évolution.

Georges Lemaître est un prêtre belge qui à partir des travaux d'Einstein prédit l'expansion de l'Univers. S'il y a expansion, c'est qu'il y a une origine. Ce point d'origine est appelé « mur de Planck », moment avant lequel les équations physiques sont vides de sens.

16. 300 000 km/s

17. Astronome anglais 1882/1944

18. Un pays insulaire africain dans l'Atlantique Sud

Lemaître montra que cette expansion initiale brutale a généré un rayonnement électromagnétique (appelé fond diffus cosmologique) dans le spectre électromagnétique. Ce fond diffus cosmologique sera observé en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson. Sur base des observations actuelles, on estime le mur de Planck (le moment du Big Bang) à 13,7 milliard d'années et le diamètre de l'Univers observable à 93 milliards d'années-lumière.

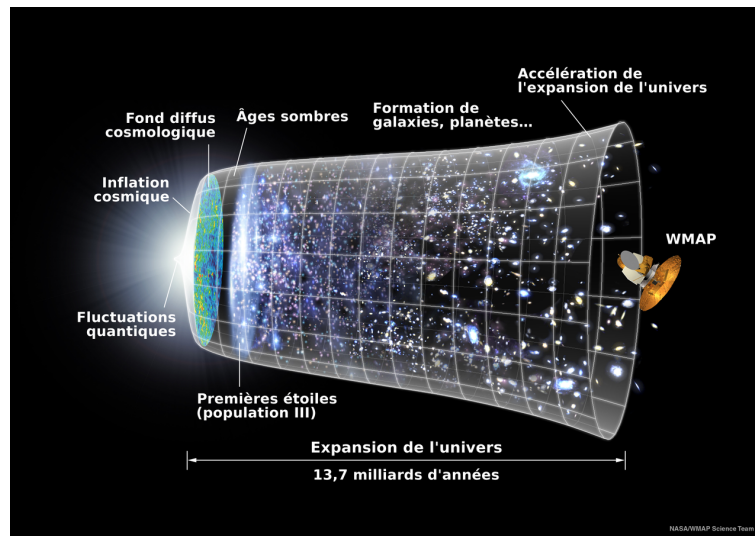


FIGURE 5 – Expansion de l'Univers

En conclusion,

- L'**Univers** est un espace courbe d'une dimension finie (93 milliards d'années-lumière, en diamètre) en expansion.
- L'Univers est composé d'**amas de galaxies**. Les galaxies ont tendances à s'amasser dans de lieux précis de l'Univers.
- Les **galaxies** sont composés de de centaines de milliards (10^{11}) de systèmes stellaires. De nombreuses observations mènent à penser qu'au centre de chaque galaxie se trouve un trou noir supermassif. La Voie lactée est notre galaxie. La taille de la Voie lactée est approximativement de 100 000 années-lumière.
- Un **système stellaire** est une structure composé de une à trois étoiles ayant divers objets en orbite (planètes, comètes, astéroïdes, ...). La plupart des systèmes stellaires sont binaires (2 étoiles). Notre étoile est le Soleil. La dimension du système solaire est de 30 unités astronomique (ua)¹⁹, soit 4 heures-lumière.

4.3 Formation des objets célestes : naines, étoiles, géantes, pulsars et trous noirs

Deux notions sont nécessaires pour comprendre la formation et l'évolution des étoiles :

- la gravitation : toute masse attire les masses à sa proximité
- les réactions thermonucléaires ou réactions de fusion nucléaire : soumis à des hautes énergies, les atomes tendront à fusionner. L'hydrogène donnera de l'hélium, qui lui-même donnera du lithium, du béryllium, du bore, .. (suivant le tableau de Mendéléev). Lorsque le fer sera formé, la production d'énergie due à la fusion sera inférieure à l'énergie nécessaire à sa formation. L'étoile tendra à s'effondrer sur elle-même.

¹⁹. ua = distance Terre-Soleil ($150.16^6 km$, la limite d'une système solaire est donnée sur base de la ceinture au-delà de la Neptune « zone transneptunienne »).

Le volume de l'étoile est déterminée par l'équilibre entre la force de gravitation centripète et les réactions thermonucléaires centrifuges.

Si les réactions thermonucléaires sont trop fortes à un moment donné, ce sera l'explosion sous forme de supernovas ou de nébuleuses planétaires, ou l'expansion sous forme de géante rouge.

Si les réactions thermonucléaires sont trop faibles à un moment donné, il y aura une contraction du volume, donc une augmentation de température permettant de réactiver des réactions thermonucléaires (naines blanches, pulsars).

Plus la masse de la proto-étoile est importante, plus les réactions sont rapides à l'échelle de l'Univers.

L'observation des objets célestes se fait par :

- la spectrophotométrie²⁰ : chaque atome émet un rayonnement électromagnétique précis (raie du champ électromagnétique). On peut donc connaître la composition atomique des étoiles.
- l'intensité du rayonnement, soit l'énergie émise.

L'atome le plus présent dans l'Univers est l'hydrogène (à 75%).

La formation et l'évolution des objets célestes ne dépend que d'un seul facteur : la masse initiale.

Si la masse est suffisante des réactions thermonucléaires pourront se produire. La réaction principale sera la fusion de l'hydrogène en hélium.

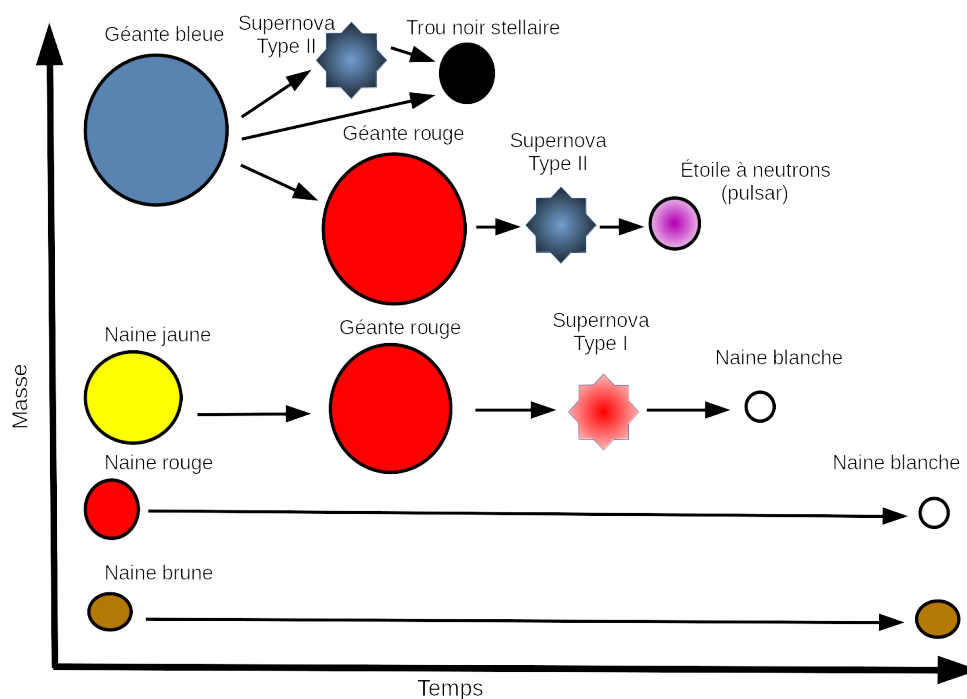


FIGURE 6 – Évolution des objets stellaires en fonction de la masse initiale.

20. Chaque atome émet une onde électromagnétique précise, ce qui permet par la lumière émise (et non réfléchi) par un astre de connaître sa composition atomique sur ces couches externes.

Plusieurs types d'étoiles ont été déterminées :

- Les **naines brunes** sont des objets dont la masse est inférieure à 0,075 fois la masse du Soleil, soit $\simeq 13$ fois celle de Jupiter. Leur masse leur permet d'émettre des infra-rouges par compression due à la gravité²¹, mais ne leur permet pas de produire une réaction thermonucléaire. C'est une étoile « ratée ».
- Les **naines rouges** ont entre 0,075 et 0,4 fois la masse solaire. Les naines rouges sont les étoiles les plus fréquentes dans l'Univers (même si elles sont beaucoup moins visibles). Des réactions thermonucléaires s'y déroulent, mais les températures atteintes sont relativement faibles. De ce fait, elles peuvent fonctionner des centaines de milliards d'années avant de devenir des **naines blanches**. Lorsque les atomes seront trop lourds, les réactions thermonucléaires arrêteront et dès que l'ensemble de l'énergie sera rayonnée, la naine blanche ne sera plus qu'un caillou inerte dans l'espace. Cependant, comme la durée de vie des naines rouges est de plusieurs centaines de milliards d'années, aucune n'est dans cet état.
- Les **naines jaunes** sont des étoiles comparables à notre Soleil. Leur masse se trouve entre 0,7 et 1,2 fois celle de notre soleil. La durée de vie des naines jaunes est de dix milliards d'années. En fin de vie, la naine jaune se transforme en **géante rouge**, puis explose en **nébuleuse planétaire** qui permettra de reformer une nouvelle étoile²². Notre Soleil s'est formé, il y a 4,5 milliards d'année ; il est donc à la moitié de sa vie.
- Les **géantes bleues** sont des étoiles dont la masse est jusqu'à 10 fois la masse du Soleil. Leur durée de vie est de 100 millions d'années. Elles se transformeront donc rapidement en **géante rouge** avant d'exploser en **supernova**. La matière résiduelle extrêmement lourde forme un **pulsar**, ou étoile à neutrons. Une étoile à neutrons est un objet extrêmement dense en rotation sur elle-même (rotation entre 1 seconde et une milliseconde). Elle émet donc une onde électromagnétique périodique.
- Les **supergéantes bleues** ont une masse entre 10 et 70 fois la masse du Soleil. Leur durée de vie est de 10 à 50 millions d'années. Après une explosion sous forme de **supernova**, elles termineront leur « vie » sous forme de **trou noir**. Le trou noir est un objet dont la masse volumique est extrêmement élevée²³. Même les photons ne peuvent sortir de son champ gravitationnel, il n'émet donc aucun rayonnement électromagnétique.

Il faut distinguer :

- les trous noirs stellaires produits par l'effondrement des géantes bleues qui ont une masse d'au moins 3,3 masses solaires
- les trous noirs intermédiaires qui ont une masse comprise entre 100 et 10 000 masses solaires, ils sont difficiles à observer probablement car au sein d'amas globulaires²⁴.
- les trous super-massifs ont une masse de l'ordre du million de soleils, ils sont au centre des galaxies. Le trou noir de notre galaxie est Sagittarius A*. Récemment (10 avril 2019), un photographe de l'horizon des événements²⁵ du trou noir de la galaxie M27 a pu être prise.

21. Comme la Terre en son centre qui est en fusion, mais dans ce cas, la croûte terrestre empêche l'émission d'infra-rouge lié à cette compression.

22. Notre Soleil est probablement une étoile de « 3ème génération » depuis la naissance de l'Univers

23. Si la Terre était absorbée par un trou noir, son volume se réduirait à celui d'une pomme.

24. Un amas globulaire est une zone d'une galaxie où la concentration stellaire est très importante.

25. zone limite d'absorption des photons

4.4 Concepts non-observés

4.4.1 Matière noire

Si on observe la rotation des étoiles autour du centre des galaxies, on peut observer que la vitesse en périphérie est quasiment la même qu'au centre⁽⁷⁾.

Ceci pourrait s'expliquer si une quantité importante de matière non-observable se trouvait soit sur les orbites intermédiaires, soit les orbites externes.

Cette matière serait la **matière noire**. Plusieurs hypothèses ont été émises sur la nature de cette matière :

- soit inobservable (naines brunes, naines rouges, planètes),
- soit extrêmement dense (pulsars),
- soit les deux à la fois (trous noirs stellaires ou intermédiaires).

Certains proposent une présence importante de particules massives comme les neutrinos.

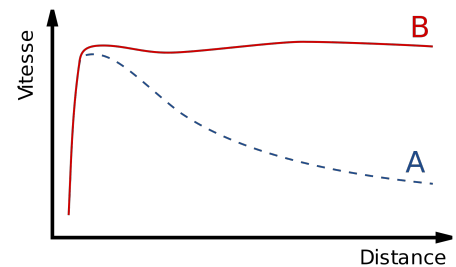


FIGURE 7 – Vitesse des objets par rapport à la distance du centre de la galaxie (A Théorie de Newton, B Données observées)

4.4.2 Énergie noire

La notion d'**Énergie noire** (ou d'Énergie sombre) est intimement liée à la théorie de la relativité générale d'Einstein. Einstein, en 1915, dans ces équations, introduit une constante (appelée constante cosmologique) permettant de conserver un Univers statique (sans expansion « Big-Bang », ni compression « Big-Crunch »). Or les observations d'une part de Hubble²⁶, et d'autre part de de Penzias et Wilson (et ultérieurs) montrent que cette expansion est effective. Il existe donc une « énergie » permettant cette expansion. Diverses hypothèses permettraient d'expliquer cette « Énergie noire », mais aucune n'a assez d'observations pour corroborer ces hypothèses.

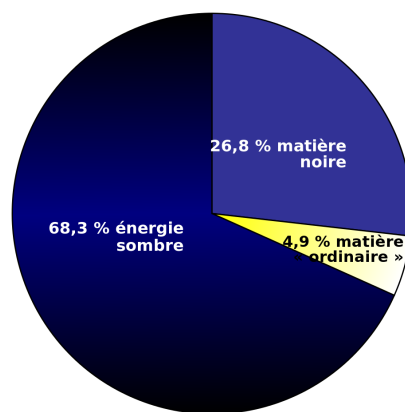


FIGURE 8 – Répartition de la matière de l'Univers

26. Loi de Hubble : les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse approximativement proportionnelle à leur distance.

4.4.3 Trou de ver / Trou blanc

Un trou de ver est, en astrophysique, un objet hypothétique prévue par la généralité générale qui relierait deux feuilletts distincts ou deux régions distinctes de l'espace-temps et se manifesterait, d'un côté, comme un trou noir et, de l'autre côté, comme un trou blanc.

Un trou de ver formerait un raccourci à travers l'espace-temps. Pour le représenter plus simplement, on peut figurer l'espace-temps non en quatre dimensions mais en deux, à la manière d'un tapis ou d'une feuille de papier, dont la surface serait pliée sur elle-même dans un espace à trois dimensions. L'utilisation du raccourci « trou de ver » permettrait un voyage du point A directement au point B en un temps considérablement réduit par rapport au temps qu'il faudrait pour parcourir la distance séparant ces deux points de manière linéaire, à la surface de la feuille. Visuellement, il faut s'imaginer voyager non pas à la surface de la feuille de papier, mais à travers le trou de ver ; la feuille, étant repliée sur elle-même, permet au point A de toucher directement le point B, la rencontre des deux points correspondant au trou de ver.

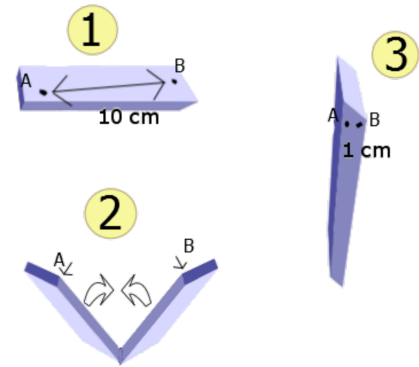


FIGURE 9 – Principe d'un trou de ver.

L'utilisation d'un trou de ver permettrait théoriquement le voyage d'un point de l'espace à un autre (déplacement dans l'espace), le voyage d'un point à l'autre du temps (déplacement dans le temps), et le voyage d'un point de l'espace-temps à un autre (déplacement à travers l'espace et, simultanément, à travers le temps).

Les trous de ver et les trous blancs sont des concepts purement théoriques : l'existence et la formation physique de tels objets dans l'Univers n'ont pas été vérifiées. Ils ne doivent pas être confondus avec les trous noirs, dont l'existence a été vérifiée dès 1971 et dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière de s'en échapper.

Certains physiciens pensent que le Big-Bang correspondrait à un trou blanc.

Table des matières

1	La Terre plate	1
2	Le système géocentrique de Ptolémée	2
2.1	La Terre est une sphère	2
2.2	Le monde sub-lunaire et supra-lunaire de Ptolémée	3
3	L'héliocentrisme	4
3.1	Copernic	4
3.2	Tycho-Brahé	4
3.3	Kepler	4
3.4	Galilée	4
3.5	Newton	5
3.5.1	La notion de force	5
3.5.2	Force de gravitation	6
3.5.3	Force centrifuge	6
3.5.4	Force de réaction	6
4	La cosmologie contemporaine	7
4.1	Théorie de la relativité	7
4.2	Galaxies, Big bang et Univers	7
4.3	Formation des objets célestes : naines, étoiles, géantes, pulsars et trous noirs	8
4.4	Concepts non-observés	11
4.4.1	Matière noire	11
4.4.2	Énergie noire	11
4.4.3	Trou de ver / Trou blanc	12