



**HAL**  
open science

## Le Chemin de l'Univers

Bernard Vivinis, Valérie Barbier, William Belleau, Guillaume Lefaix, Pascal Louis, Nicolas Paillardon, Olivier Planchon., Denys Robilliard

► **To cite this version:**

Bernard Vivinis, Valérie Barbier, William Belleau, Guillaume Lefaix, Pascal Louis, et al.. Le Chemin de l'Univers. 2021, 27 p. hal-01584531

**HAL Id: hal-01584531**

**<https://hal.science/hal-01584531>**

Submitted on 2 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Le chemin de l'Univers

## Pour quoi faire ?

Pour vous faire toucher du doigt l'immensité de l'Univers, par une suite de 26 panneaux dont chacun évoque une distance dix fois plus grande que le panneau précédent, de 1 mètre à 100 mille milliards de milliards de km !



Vous trouverez à chaque étape :

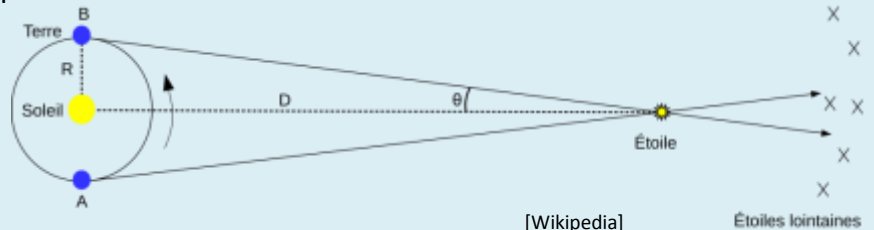
- la photo ou le schéma d'un astre (planète, étoile, nuage de gaz, galaxie...) se situant approximativement à la distance traitée par le panneau ;
- un commentaire simple sous un titre à fond jaune et des explications plus poussées sous un titre à fond rouge ;
- en bas à droite un résumé des caractéristiques de l'objet décrit et la distance courante avec le temps que la lumière met à la parcourir.

## La SAR - Société d'Astronomie de Rennes

Ce club d'astronomes amateurs, tous bénévoles, cherchait un site d'observation dépourvu de pollution lumineuse depuis sa fondation en 1974. En 1999 la commune de **La Couyère** a mis un terrain à la disposition de la SAR, terrain depuis repris par la communauté de communes de **Bretagne Porte de Loire Communauté**. La grande coupole y a été inaugurée en 2003, le planétarium en 2008. En plus de faciliter la rencontre des astronomes amateurs, la SAR assure des animations à destination du public ou des scolaires, à Rennes et dans la communauté de communes.

## Comment mesure-t-on les distances dans l'Univers ?

Pour les distances les plus courtes, les astronomes mesurent la **parallaxe** d'un astre, c'est-à-dire son déplacement sur le fond d'étoiles plus lointain depuis deux points de vue différents, ce qui permet de calculer la distance. Dans la figure ci-dessous, les deux points de vue sont situés sur la Terre à 6 mois d'intervalle.

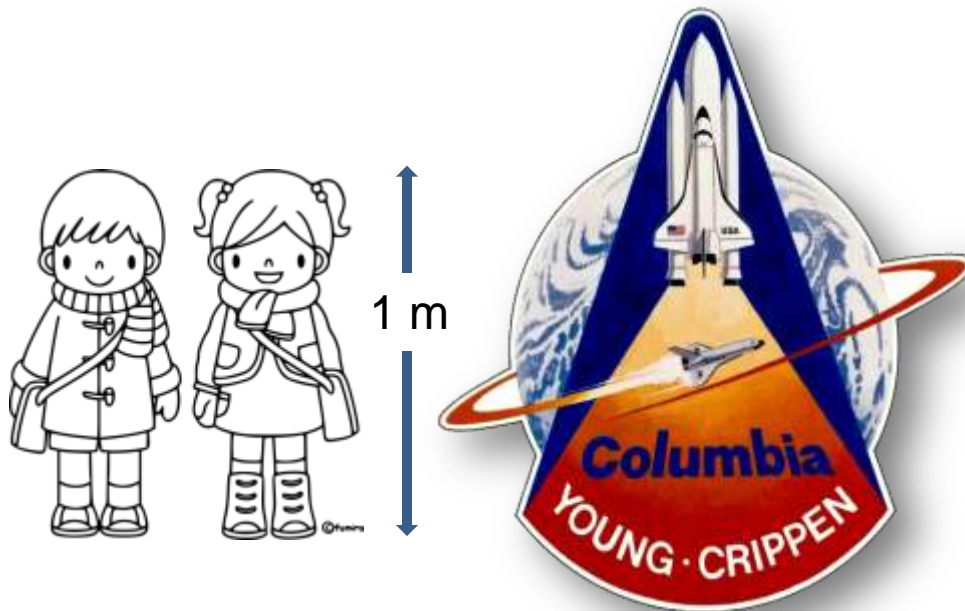


[Wikipedia]

Pour les distances plus élevées, les astronomes utilisent des **chandelles standards**, c'est-à-dire des astres dont la luminosité propre est connue. Cela permet, en la comparant à la luminosité observée depuis la Terre, de déduire la distance de l'objet. Exemples de chandelles standard : certaines étoiles variables (Céphéides par ex), certaines explosions d'étoiles (supernova de type Ia)...



# Enfant | Navette spatiale



[La première mission de Columbia | STS-1 - image NASA]

## Enfant

A 4 ou 5 ans, on peut dire que tu mesures déjà 1 mètre de haut. C'est en mètres que les scientifiques mesurent la plupart des objets autour d'eux.

## Navette Spatiale Columbia

La navette Columbia, la 1ère fusée « habitée » lancée dans l'espace, en 1981, mesurait 17,25 m : 17 fois ta taille ! Elle pouvait transporter 7 astronautes en même temps. Elle a servi à réparer le fameux télescope spatial Hubble.

## Le mètre étalon

Depuis 1791, le mètre a successivement été défini comme la dix millionième partie de la moitié d'un méridien terrestre (un quart de grand cercle), par une règle en platine, comme un multiple d'une longueur d'onde émise par le Krypton 86. On le définit maintenant comme la distance parcourue par la lumière dans le vide en 1/299 792 458 de seconde.

## Navette Spatiale

Columbia, la 1ère navette spatiale à effectuer un vol dans l'espace fut lancée le 12 avril 1981 depuis Cap Canaveral (Floride). Cette navette orbitait autour de la Terre à 960 km d'altitude, à une vitesse de presque 28 000 km/s. Bien que Columbia ne mit pas le télescope spatial Hubble sur orbite, la navette servit à l'une des missions de réparation (mission STS-109).

Source : NASA

## La navette

135 vols  
1<sup>ère</sup> mission : 1981  
dernière : 2011

## Etape 10<sup>0</sup> à 10<sup>1</sup> m

1 à 10 m  
La lumière parcourt 1 m  
en 3,3 milliardièmes  
de seconde

# Observatoire de Nançay



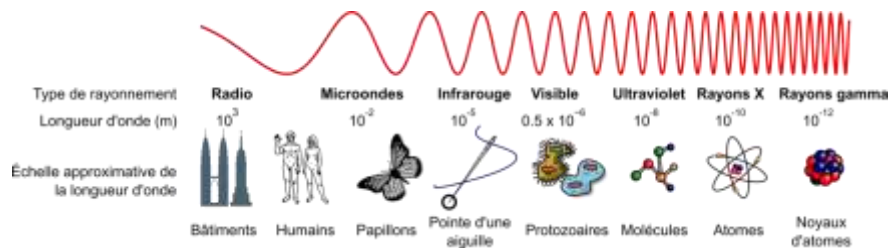
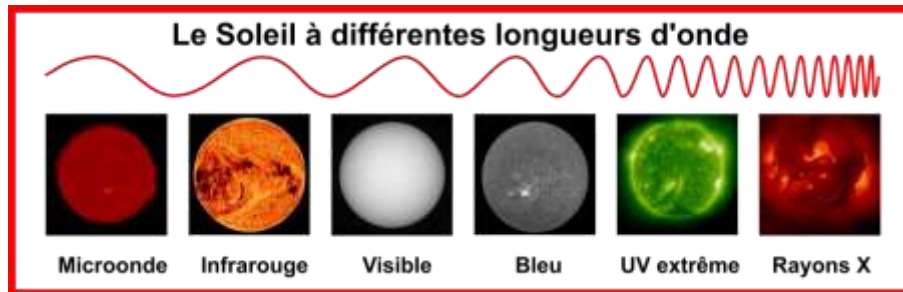
[J.P.Letouneur CRDP Orléans – Observatoire de Paris]

## La radioastronomie

A Nançay, en Sologne, se trouve le plus grand radiotélescope français (4ème plus grand du monde) inauguré en 1965. Il collecte les ondes radios venues de l'espace dans un premier miroir plan, long de 200 m, qui renvoie les rayons vers un miroir sphérique de 300 m, pour enfin les diriger sur deux récepteurs. Après avoir mesuré la constante de Hubble, caractéristique de l'expansion de l'Univers, le radiotélescope est maintenant spécialisé dans l'étude des pulsars, restes des plus grosses étoiles visibles comme des phares radio, dont le chronométrage permet de tester les théories de la gravitation ou chercher les ondes gravitationnelles.

La radioastronomie possède un avantage sur l'astronomie en lumière visible : on peut la pratiquer en plein jour, sans être gêné par le Soleil, et derrière les nuages. L'observation en lumière visible est, elle, impossible de jour, car la part bleue de la lumière du Soleil est diffusée par l'atmosphère, ce qui lui donne sa couleur caractéristique mais empêche de voir les étoiles.

<http://www.obs-nancay.fr>



## La lumière

Il existe une infinité de sortes de lumières dont l'œil ne perçoit qu'une petite partie, celle que tu vois dans un arc en ciel. À Nançay, un télescope un peu spécial (un grillage gigantesque et des récepteurs sensibles) permet d'étudier comètes, étoiles en fin de vie, galaxies : c'est un radiotélescope.

## Nançay

France, Sologne  
Au sud d'Orléans  
(45-Loiret)

## Etape 10<sup>2</sup> m

100 m  
Parcourus par la lumière en  
environ 0,000 000 333 s  
soit 333 ns (nanosecondes)

# Observatoire de Saint-Véran



[photos AstroQueyras]



## L'observatoire astronomique

Les astronomes sont à la recherche de sites élevés. La lumière traverse alors moins d'épaisseur d'atmosphère, diminuant ainsi l'absorption, la diffusion et les turbulences qui nuisent à la qualité des images.

Au-dessus de Saint-Véran, plus haute commune d'Europe, située au cœur du Queyras dans les Hautes Alpes, se trouve un haut lieu de l'astronomie d'amateurs : l'observatoire AstroQueyras.

Apprécié pour ses 300 jours d'ensoleillement par an et son altitude de près de 3000 mètres, le site avait été choisi en 1970 pour accueillir un télescope géant, le CFHT, qui a finalement élu domicile... au sommet du Mauna Kéa à Hawaï !

Les travaux qui avaient été initiés avant l'abandon du projet pour Hawaï ont tout de même permis la construction de l'édifice d'aujourd'hui.

L'observatoire d'AstroQueyras, géré par des bénévoles, accueille les astronomes amateurs mais également tout le public, randonneurs ou amoureux des étoiles pour une nuit.

<http://www.astroqueyras.com/>

## L'observatoire

L'observatoire astronomique est le lieu où l'on peut voir les étoiles grâce à un instrument (lunette, télescope). Celui-ci, par son diamètre supérieur à la pupille de ton œil, reçoit plus de lumière pour voir les astres les plus faibles.



[OpenStreetMap]

## Saint-Véran

Hautes Alpes  
Plus haut village d'Europe  
à 2040 m  
Observatoire à 2936 m

## Etape 1 km

1000 m  
Parcourus par la lumière en  
environ 0,000 003 3 s  
Soit 3,3  $\mu$ s (microsecondes)

# Le mont Everest



## Le Mont Everest

L'Everest s'est formé, comme l'ensemble de l'Himalaya, au cours de l'orogénèse alpine, il y a environ 50 millions d'années. Il résulte de la convergence de la plaque indienne vers la plaque eurasiennne.

Il comprend quatorze sommets principaux de plus de 8000 mètres. Ils sont tous situés dans le massif de l'Himalaya, répartis entre l'Inde, le Pakistan, le Népal et la Chine.

Son nom officiel a été entériné en 1865 par Andrew Waugh, alors arpenteur général britannique des Indes orientales qui décida de le baptiser d'après le nom de son prédécesseur le colonel Sir George Everest. De nombreux noms locaux existent, le plus connu étant probablement depuis plusieurs siècles l'appellation tibétaine Chomolungma, figurant même sur une carte de 1733 publiée à Paris par le géographe français Jean-Baptiste Bourguignon d'Anville.

## Dans le massif de l'Himalaya

Le Mont Everest s'élève à la frontière entre la Chine et le Népal, dans le massif de l'Himalaya. C'est le plus haut sommet du monde à 8848 m. La première ascension par Edmund Hillary et Tensing Norgay a eu lieu le 29 mai 1953.

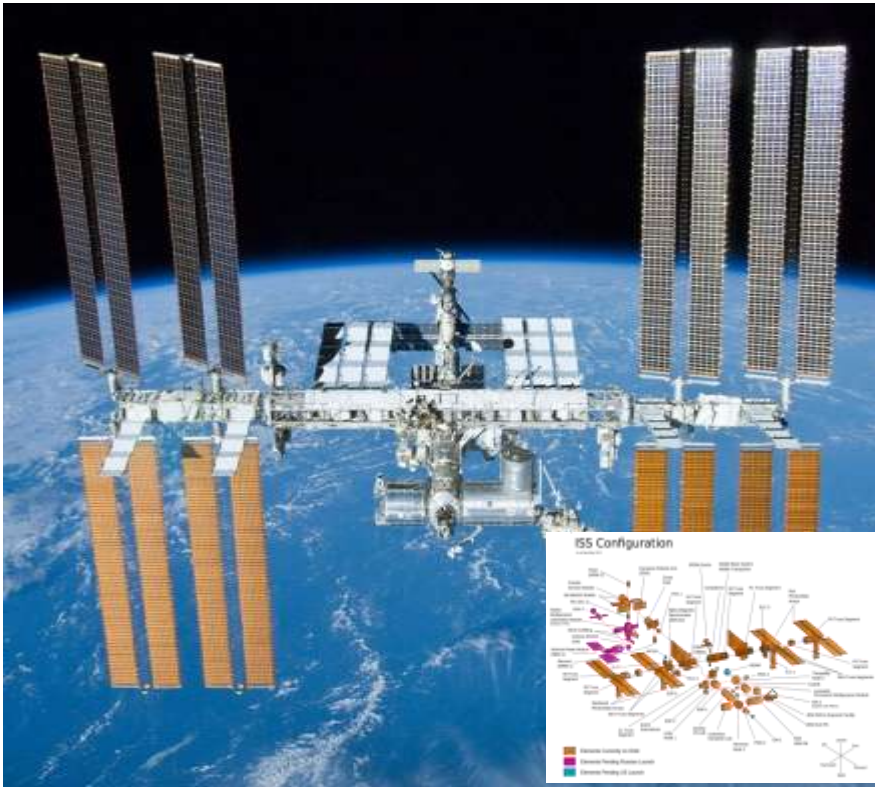
## Everest

Hauteur : 8848 m  
Apparition de l'Himalaya  
il y a 50 000 000 d'années

## Etape 10<sup>1</sup> km

10 km  
Parcourus par la lumière en  
0,000 033 s  
soit 33  $\mu$ s (microsecondes)

# 6/27 ISS, station spatiale internationale



## Un laboratoire dans l'espace

L'*International Space Station* ou ISS, située sur une orbite terrestre basse, est occupée en permanence par un équipage international se consacrant à la recherche scientifique en environnement spatial. Ce programme, lancé et piloté par la NASA, est développé avec l'agence spatiale fédérale russe (FKA) et la participation des agences spatiales européenne, japonaise et canadienne.

Pour placer en orbite les composants de la station, pour assurer le ravitaillement et rehausser l'orbite régulièrement dégradée par la traînée atmosphérique, plusieurs vaisseaux spatiaux se relaient : les cargos Progress russes, l'ATV européen, le HTV japonais, tandis que le vaisseau russe Soyouz assure de manière exclusive la relève des équipages depuis l'arrêt de la navette spatiale américaine.

La station spatiale internationale est le plus grand des objets artificiels placés en orbite terrestre. Elle est habitée par 6 personnes pour un séjour d'une durée de 3 à 6 mois. L'équipage est occupé par les opérations d'assemblage, de maintenance, et les tâches scientifiques.

Les travaux scientifiques portent principalement sur la biologie – en particulier l'adaptation de l'homme à l'absence de pesanteur – ainsi que sur la science des matériaux et l'astronomie.

## Un meccano international

Cette station de plus de 400 tonnes abrite des laboratoires. Elle se déplace à 27 700 km/h, à une altitude d'environ 386 km, faisant le tour de la Terre 16 fois par jour, soit un tour en 1h30. Son électricité est produite par des panneaux solaires. Des navettes spatiales l'ont assemblée dans l'espace et, maintenant, changent les équipages et livrent le ravitaillement.

Construite par plusieurs agences spatiales (États-Unis, Russie, Europe et Japon) à partir de 1998 pour fonctionner jusqu'en 2020, c'est un bel exemple de coopération internationale.

### ISS

périgée 330km (distance minimum)  
apogée 420km (distance max)  
masse environ 400 tonnes  
lancement 20/11/1998  
période de révolution 92,7 min

### Etape 10<sup>2</sup> km

100 km  
Parcourus par la lumière  
en environ 0,0003 seconde  
soit 0,3 ms (milliseconde)

# L'atmosphère terrestre



Image : NASA / ISS

## Notre protectrice

L'atmosphère est l'enveloppe de gaz qui entoure la Terre. Composée à 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon et 0,1 % d'autres gaz et de vapeur d'eau. Elle nous protège des agressions extérieures en arrêtant les rayonnements dangereux venus du Soleil et en brûlant tout ou partie des astéroïdes. Indispensable à la vie, elle maintient la température moyenne de notre planète à 15 °C.

## Structure

L'atmosphère est divisée en 5 couches d'importance variable, déterminées en fonction de l'altitude et de la température. En partant du sol :

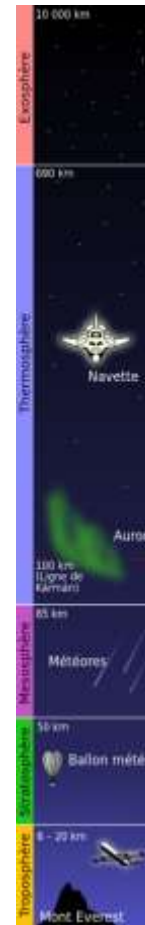
**La troposphère** : Elle s'étend jusqu'à 20 km. La température y baisse d'environ 6°C par km. À 12 km il fait -55°C. C'est dans cette zone que se forment les nuages, pluies et orages. À 20 km il y fait -85°C.

**La stratosphère** : L'air s'assèche. La température remonte jusqu'à 0°C. C'est là que se concentre la couche d'ozone si importante pour notre survie.

**La mésosphère** : La température recommence à décroître jusqu'à -85°C. C'est là que la plupart des météorites se consomment.

**La thermosphère et l'ionosphère** : La température augmente pour atteindre près de 1500°C à 600 km. C'est dans cette zone qu'orbite l'ISS. C'est à sa base que se forment les aurores polaires lors de l'ionisation de l'atmosphère par les particules solaires.

**L'exosphère** : Elle se prolonge jusqu'à 10 000 km environ. La température baisse. L'air extrêmement raréfié se dilue dans le vide de l'espace. C'est là que gravitent les satellites artificiels.



## Atmosphère

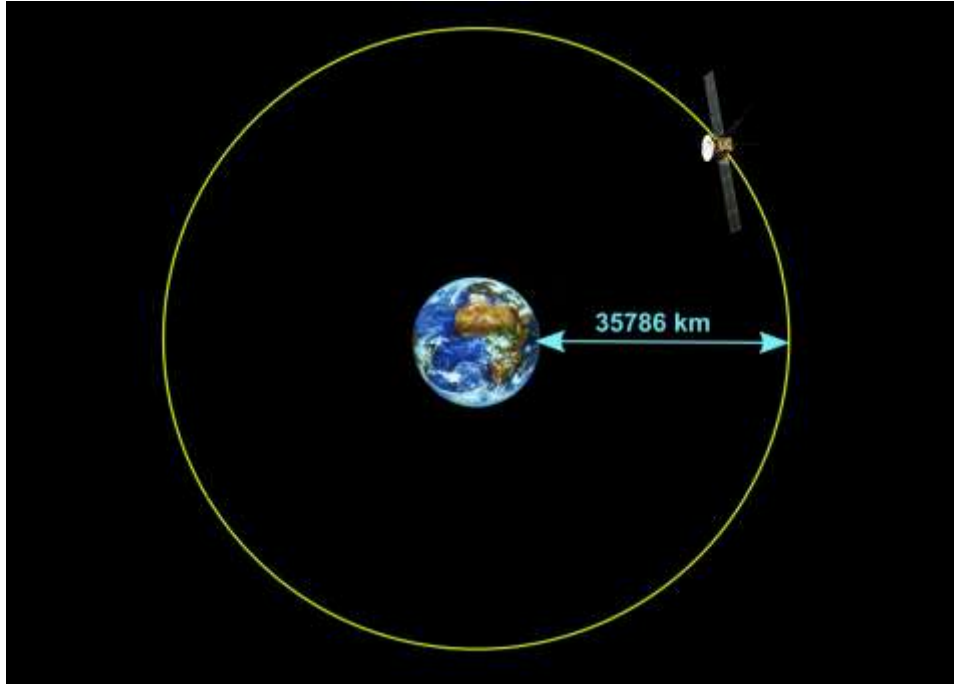
Épaisseur : 10 000 km  
99,9 % de sa masse se situe entre 0 et 50 km

## Etape 10<sup>3</sup> km

1000 km  
parcourus par la lumière en 0,0033 s  
soit 3,3 ms (millisecondes)



# Altitude des orbites géostationnaires



[images ESA]

## Satellites géostationnaires

L'orbite des satellites géostationnaires est à la verticale de l'équateur et leur période de révolution est très exactement égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même : ces satellites sont donc immobiles dans notre ciel et permettent de recevoir la télévision avec une antenne fixe. L'altitude de l'orbite géostationnaire est d'environ 36 000 km.

## Orbites géostationnaires

L'orbite géostationnaire est un cas particulier de l'orbite géosynchrone avec une inclinaison nulle par rapport au plan équatorial. L'altitude de l'orbite géostationnaire est 35 786 km au-dessus du géoïde terrestre (surface moyenne des océans).

Un corps se trouvant sur l'orbite géosynchrone possède une période de révolution très exactement égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même (23 heures 56 minutes et 4,1 secondes).

L'orbite géostationnaire s'inscrit dans le plan équatorial de la Terre, les satellites géostationnaires sont donc nécessairement situés à la verticale ("au zénith") d'un point de l'équateur. Cette propriété supplémentaire fait que tout corps en orbite géostationnaire paraît immobile par rapport à tout point de la Terre.

Cette caractéristique est particulièrement importante pour les satellites d'observation, de télécommunication ou de diffusion de télévision.

L'orbite géostationnaire terrienne est une construction humaine artificielle et aucun corps céleste (astéroïde...) ne s'y trouve. La lune de Pluton, Charon, a une orbite géostationnaire naturelle.

Elle est parfois appelée orbite de Clarke ou ceinture de Clarke, en l'honneur de l'auteur britannique de science-fiction Arthur C. Clarke, le premier à émettre l'idée d'un réseau de satellites utilisant cette orbite.

## Orbites géostationnaires

altitude : 35786 km  
période de révolution : 23 heures  
56 minutes et 4,1 secondes:

## Etape 10<sup>4</sup> km

10 000 km  
parcourus par la lumière  
en 0,033 s  
soit 33 ms (millisecondes)

9/27

# Distance moyenne de la Lune



[NASA]

## Couple Terre - Lune

Il y a environ 29 jours  $\frac{1}{2}$  entre deux pleines Lunes.  
La distance de la Lune jusqu'au centre (le foyer) de son orbite autour de la Terre varie de 363 300 à 405 500 km. Ce foyer se trouve dans la Terre, mais pas au centre de la Terre, puisque la masse de la Lune fait que la Terre a elle-même une petite rotation qui équilibre celle de la Lune.

## Distance Terre - Lune

A l'aide de réflecteurs laser déposés sur la Lune par les missions Apollo et Soviétiques dans les années 1970, il est possible de connaître cette distance avec une précision centimétrique ! L'orbite de la Lune étant une ellipse, la distance est de 356 400 km au périégée et portée à 406 700 km à l'apogée, pour une distance moyenne de 384 401 km.

ARISTARQUE DE SAMOS (310 - 230 av. J.-C.) émet l'hypothèse que l'ombre de la Terre pouvait être considérée comme un cylindre jusqu'à la distance de l'orbite de la Lune. Lors d'une éclipse centrale, la Lune reste environ 2 heures dans la zone d'ombre. Se déplaçant d'une distance égale à son diamètre apparent en 1 heure, il en déduit que le diamètre lunaire vaut  $\frac{1}{3}$  de celui de la Terre.

Hipparque, avec une meilleure estimation du cône d'ombre, évalua cette distance à 38 fois le diamètre de la Terre. En réalité, l'ombre de la Terre forme un cône d'angle  $0,5^\circ$ , ce qui donne un diamètre lunaire égal à 0,27 fois celui de la Terre. La distance Terre-Lune devient alors égale à 30 diamètres terrestres.

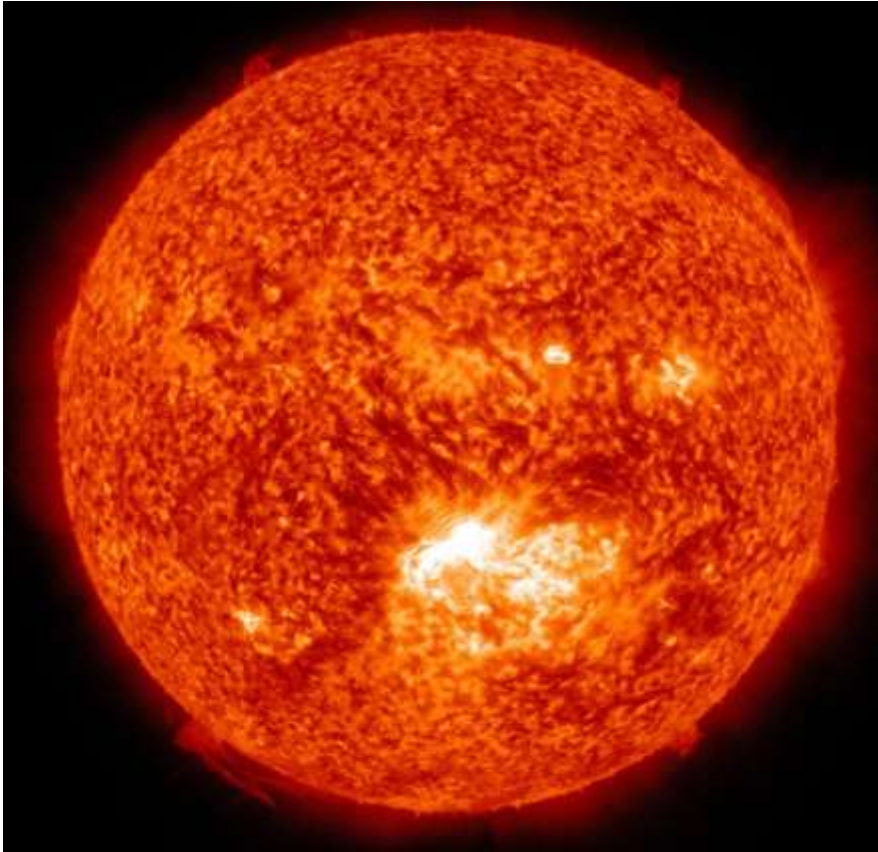
## Mesures Terre - Lune

distance moyenne Terre-Lune :  
384 000 km  
éloignement de la Lune par an :  
3,8 cm  
aller/retour de la lumière entre  
la Terre et la Lune :  
2,56 secondes

## Etape $10^5$ km

100 000 km  
parcourus par la  
lumière en 0,33 s  
soit 330 ms (millisecondes)

# Diamètre du Soleil



## La Lune aussi grosse que le Soleil ?

Le Soleil est une immense sphère de gaz. Il est 400 fois plus gros que la Lune mais comme la lune est 400 fois plus proche de nous alors les 2 astres semblent avoir la même taille.

## Une fin annoncée

La taille du Soleil est actuellement stable mais sa masse n'est pas immuable. Elle se convertit en énergie. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 695 millions de tonnes d'hélium. Les 5 millions de tonnes perdues sont transformées en énergie. Cette fusion thermonucléaire représente 8 % de sa masse totale depuis sa naissance.

Dans 5 milliards d'années, le Soleil aura transformé tout son hydrogène. Le cœur d'hélium ainsi formé se contractera et s'échauffera. Ce processus entraînera une dilatation des couches superficielles jusqu'à lui faire atteindre 100 fois sa taille actuelle. Il deviendra une géante rouge dont le diamètre dépassera les orbites de Mercure et Vénus. La Terre ne sera plus qu'un immense désert calciné.

L'hélium commencera à son tour à fusionner en carbone et oxygène. Puis, sous l'effet de la gravité, le noyau solaire s'effondrera sur lui-même, libérant dans l'espace les couches supérieures de sa structure. Le processus se reproduira plusieurs fois dans un laps de temps de 500 millions d'années.

Pour finir, notre Soleil deviendra une naine blanche, sphère stable de la taille de la Terre et d'une densité 1 million de fois supérieure à celle de l'étoile de départ.

### Soleil

Diamètre : 1 391 400 km  
109 fois celui de la terre

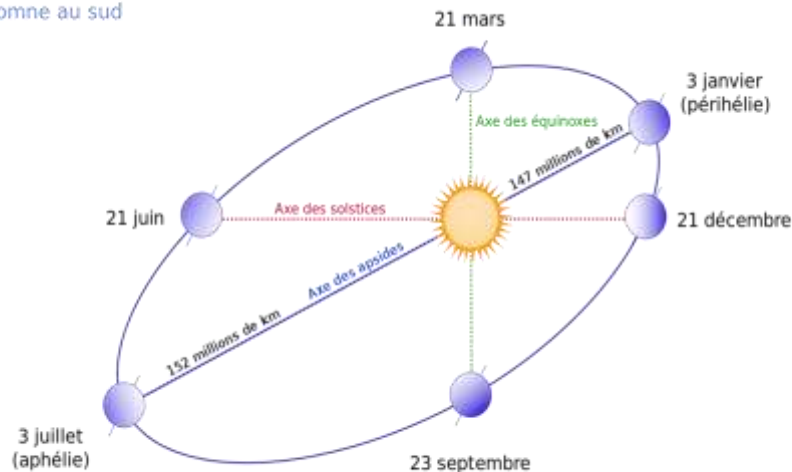
### Etape 10<sup>6</sup> km

1 million de km  
parcourus par la lumière en  
3,3 s

# 11/27 4 jours de parcours de la Terre autour du Soleil

Printemps au nord  
Automne au sud

Hiver au nord  
Été au sud



Été au nord  
Hiver au sud

Automne au nord  
Printemps au sud

[Wikipedia CC-BY-SA]

**Tout bouge dans tous les sens !**

Petit inventaire des mouvements de la Terre...

- Rotation autour d'elle-même en 24 h, soit à notre latitude, un déplacement à environ 1118 km/h ou 0,3 km/s autour de l'axe des pôles (1667 km/h ou 0,46 km/s à l'équateur).
- Révolution autour du Soleil en 365 jours  $\frac{1}{4}$ , à une vitesse moyenne de 30 km/s.
- Mouvement du Soleil vers la constellation d'Hercule, à environ 19,5 km/s.
- Rotation de notre galaxie, un tour en 226 millions d'années pour le Soleil, à une vitesse d'environ 220 km/s.
- Déplacement de notre galaxie vers le centre du groupe local de galaxies à environ 65 km/s.
- Déplacement de notre groupe local de galaxies vers le super amas Hydra-Centaurus à 600 km/s.
- Expansion de l'Univers : les galaxies lointaines s'éloignent de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance (et réciproquement : nous nous éloignons d'elles).

**10 millions de km en 4 jours : ça déménage !**

La Terre parcourant en 365 jours une orbite quasi circulaire de 150 millions de km de rayon, un calcul simple montre qu'en 4 jours nous parcourons environ 10 millions de km autour du Soleil, à 30 km par seconde.

**4 jours autour du Soleil**

Environ 10 millions de km parcourus par la Terre à 30 km/s

**Etape  $10^7$  km**

10 millions de km  
Parcourus par la lumière en 33 s

# Distance Terre - Soleil



## L'orbite terrestre

Comme pour tous les corps du Système solaire, l'orbite terrestre est une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers. La distance entre la Terre et le Soleil n'est donc pas fixe. Elle varie de 147 099 586 km au périhélie (distance la plus courte) à 152 096 154 km à l'aphélie (distance la plus grande) pour s'établir à une distance moyenne de 149 597 870,700 km. C'est cette valeur, dénommée Unité Astronomique (UA ou AU), qui est retenue par l'Union Astronomique Internationale pour exprimer la distance entre les objets du Système solaire ou entre les composants des autres systèmes planétaires.

La distance moyenne de la Terre au Soleil a été estimée dès l'Antiquité. C'est encore Aristarque de Samos qui, le premier, donna une évaluation (très approximative) de la distance Terre - Soleil avec 1520 rayons terrestres (RT). Mais c'est Christiaan HUYGENS (mathématicien, astronome et physicien hollandais) qui, en 1659, fournit une estimation de 24000 RT, pour une valeur réelle de 23455 RT.

## Le couple Terre - Soleil

Inséparables depuis 4,5 milliards d'années, la Terre tourne autour du Soleil à une distance moyenne de 149 600 000 km (c'est 26000 fois Paris - New York) à la vitesse de 30 km/s. À cette distance, la lumière solaire met plus de 8 minutes à nous parvenir.

### Terre – Soleil

1 unité astronomique (1 UA)  
149 597 870,700 km  
parcourus en 8 minutes et  
19 s par la lumière

### Etape 10<sup>8</sup> km

100 millions de km  
parcourus par la lumière en  
5 min 33 s

# Distance Soleil - Pluton



[Crédit : NASA]

## La petite planète

C'est une planète *naine* car elle n'a pas fait place nette dans son voisinage comme ses 8 grandes sœurs. Elle se situe environ à 35 fois la distance Terre-soleil.

## Une planète naine

Découverte le 18 février 1930 par Clyde Tombaugh, elle fut la 9<sup>ème</sup> planète du Système Solaire jusqu'au 24 août 2006. En effet, Pluton partageant son espace avec d'autres objets transneptuniens, elle a été reclassée en planète naine.

La distance entre Pluton et le Soleil varie entre 29,7 UA au périhélie et 49,5 UA à l'aphélie. L'année plutonienne dure 248,1 années terrestres.

Pluton, avec une masse de 1/5<sup>ème</sup> de celle de la Terre et un diamètre de 2372 km, est plus petite et moins massive que sept satellites naturels dans le système solaire : la Lune (3476 km de diamètre), les 4 satellites galiléens de Jupiter (Ganymède, 5262 km ; Callisto, 4880 km ; Io, 3640 km ; Europe, 3122 km), le plus gros satellite de Saturne (Titan, 5150 km) et celui de Neptune (Triton, 2706 km).

New Horizons, une sonde spatiale, a été lancée le 19 janvier 2006 par une fusée de forte puissance Atlas V-550. Elle a commencé en janvier 2015 ses observations de Pluton, qu'elle a survolée le 14 juillet 2015.

## Pluton

planète naine  
distance Soleil - Pluton de  
4,4 à 5,9 milliards de km  
entre 29.7 et 49.5 UA

## Etape 10<sup>9</sup> km

1 milliards de km  
environ 6.7 UA  
parcourus par la lumière  
en 55 min 36 s

# Distance Terre - Voyager 1



[Crédit : NASA]

## Vers l'infini et au-delà

La sonde Voyager 1 a été lancée le 5 septembre 1977 de Cap Canaveral (Floride). C'est le premier engin à survoler Jupiter (en 1979) et Saturne (en 1980). Aujourd'hui encore, elle se déplace à plus de 17 km/s vers la Constellation de la Girafe qu'elle atteindra dans environ 40 000 ans.

## Voyageurs

Les sondes jumelles Voyager 1 et 2 ont été lancées en 1977. La principale mission était l'exploration des planètes externes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

Voyager 1 a fait une série de découvertes : le volcanisme sur la lune Io de Jupiter, le fonctionnement complexe de la Grande Tache Rouge de Jupiter, la première observation des anneaux de Jupiter, la structure étrange de la surface d'Europe, la composition de l'atmosphère de Titan, la structure des anneaux de Saturne ainsi que la découverte de plusieurs petites lunes de Jupiter et de Saturne. Voyager 1 a quitté l'héliosphère (la zone d'influence du vent solaire) en 2012. En 2016, la Terre recevait encore des données scientifiques envoyées par la sonde.

Les deux sondes emportent chacune un disque de cuivre plaqué or contenant des images et des sons sélectionnés pour représenter la diversité de la vie et de la culture sur Terre.

## Voyager 1

Distance par rapport au Soleil :  
20 milliards de km

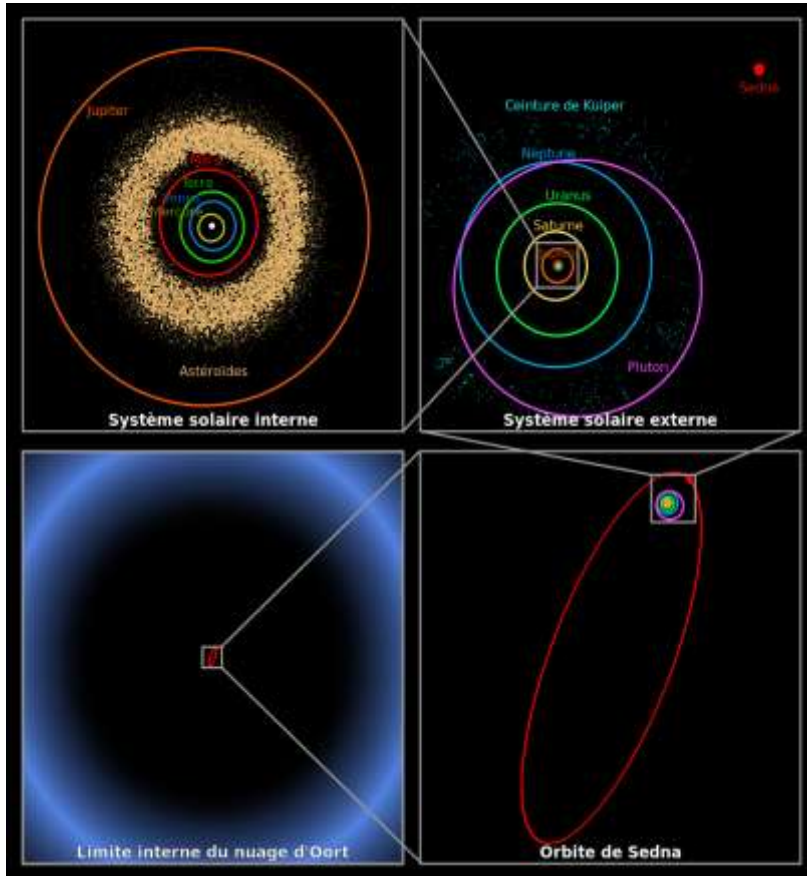
Distance parcourue depuis le  
lancement : 27 milliards de km

Vitesse par rapport au Soleil:  
17,027 km/s

## Etape 10<sup>10</sup> km

10 milliards de km  
soit environ 66,8 UA  
parcourus par la  
lumière en 9 h 16 min

# Au-delà de Neptune



[NASA/Wikipedia]

## Les objets épars

Parmi les transneptuniens, les objets épars sont caractérisés par des orbites très allongées et inclinées. Comme les autres transneptuniens, ils sont essentiellement composés de glaces d'eau, d'azote et de méthane plus un mélange d'hydrocarbures responsables de leur couleur.

D'après les théories sur la formation du Système solaire, dont le « modèle de Nice », les planètes géantes se seraient formées plus près du Soleil et auraient, lors de leur migration, joué au billard avec les petits corps voisins. Cela expliquerait à la fois le « bombardement tardif » (objets précipités vers l'intérieur du Système solaire) et les transneptuniens, dispersés vers l'extérieur.

## Des témoins du passé

Sedna et les autres corps transneptuniens sont assez éloignés pour n'avoir pas été transformés par le rayonnement du Soleil. Leur composition intéresse beaucoup les astronomes car elle est inchangée depuis la naissance du Système solaire.

## Sedna, petit, excentrique et glacial ...

Très petit (environ 1800 km de diamètre) et très lointain, Sedna n'a été découvert qu'en 2003. Sedna tourne autour du Soleil au-delà de Neptune, comme d'autres planètes naines telles que Pluton, Makémaké... Son orbite est très allongée, de 70 UA jusqu'à près de 1000 UA. Aussi loin du Soleil, il fait très froid, près de  $-250^{\circ}\text{C}$ ...

### Sedna

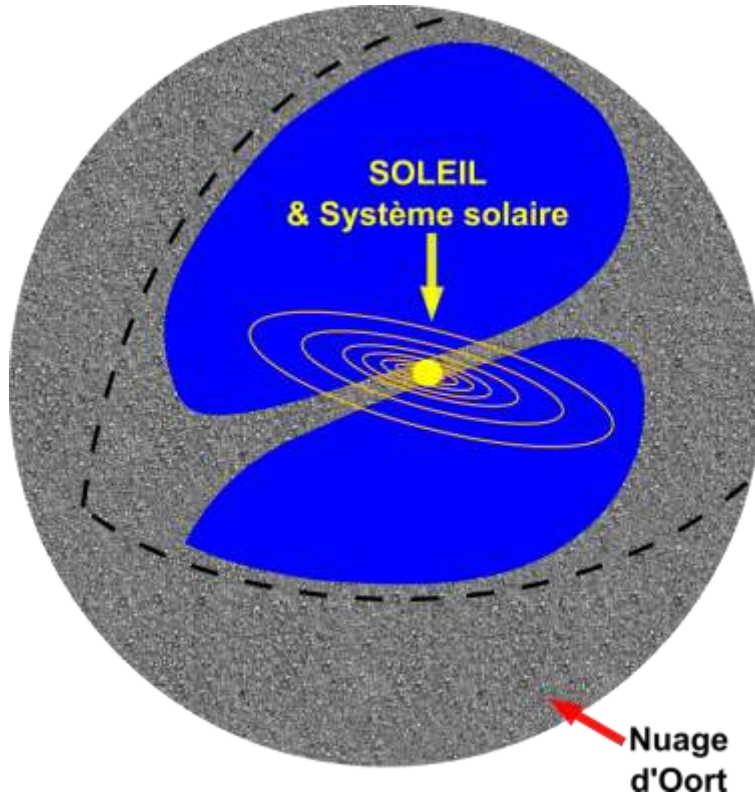
Orbite très elliptique  
De 76 UA à 950 UA  
1800 km de diamètre

### Etape $10^{11}$ km

100 milliards de km, 667 UA  
parcourus par la lumière en  
3 j 20 h 39 min



# Le nuage d'Oort



## Un manteau de cailloux glacés !

Le nuage d'Oort est une enveloppe de corps glacés ou rocheux qui entoure le Système solaire. De nombreuses comètes en sont originaires.

## Les confins du Système solaire

Le nuage d'Oort est un ensemble hypothétique d'objets formant une vaste enveloppe sphérique à la limite gravitationnelle du Système solaire. Il serait donc situé bien au-delà de l'orbite des dernières planètes du Système solaire, à des distances du Soleil comprises entre 1000 et 150 000 unités astronomiques.

## Berceau de comètes lointaines ?

Le nuage d'Oort serait composé essentiellement de glaces, peut-être aussi d'objets rocheux. Une grande partie des comètes circulant dans le Système solaire en serait originaire, notamment les comètes à longue période, ainsi que celles du même type que la comète de *Halley*.

## Nuage d'Oort

Objets entourant le Système solaire.  
De 1000 à 150 000 UA du Soleil.  
Berceau d'une grande partie des comètes.

## Etape $10^{12}$ km

1000 milliards de km.  
soit 6700 UA  
parcourus par la lumière en  
38 j 15 h

# Proxima du Centaure



[naine rouge, vue d'artiste /Wikipedia]

## La voisine du Soleil

Après le Soleil, c'est l'étoile la plus proche de nous et pourtant sa lumière met 4 ans à nous parvenir (la lumière voyage à environ 300 000 km à la *seconde* !). On dit que Proxima est à 4 années-lumière de nous. Par comparaison, la lumière du Soleil met 8 minutes pour nous arriver : le Soleil est à 8 minutes lumière. Comme plus de 80 % des étoiles de notre galaxie, Proxima est une « naine rouge ». Elle est petite, peu lumineuse, plutôt froide et rouge, invisible à l'œil nu.

## Une grosse boule de gaz...

Une étoile naît de la contraction d'un nuage de gaz (nébuleuse) majoritairement composé d'hydrogène. Au centre de la boule de gaz, la pression et la température augmentent. En dépassant la dizaine de millions de degrés, les réactions nucléaires de fusion s'allument. Les noyaux d'atomes d'hydrogène se collent ensemble pour former des éléments plus lourds, hélium, carbone, oxygène... Les éléments plus lourds que l'hélium n'existeraient pas sans les étoiles. Rejetés dans l'espace lors de la mort des étoiles, ils participent à la génération suivante d'étoiles et de leur cortège de planètes. Nous sommes donc des poussières d'étoiles.

## Longévité et luminosité selon la masse

Plus l'étoile est massive, plus sa durée de vie est courte, elle « brûle » plus vite. Sa luminosité est alors plus grande et elle produit des atomes plus lourds comme le fer. Les plus petites étoiles devraient vivre plus de 100 milliards d'années, les plus grosses quelques millions.

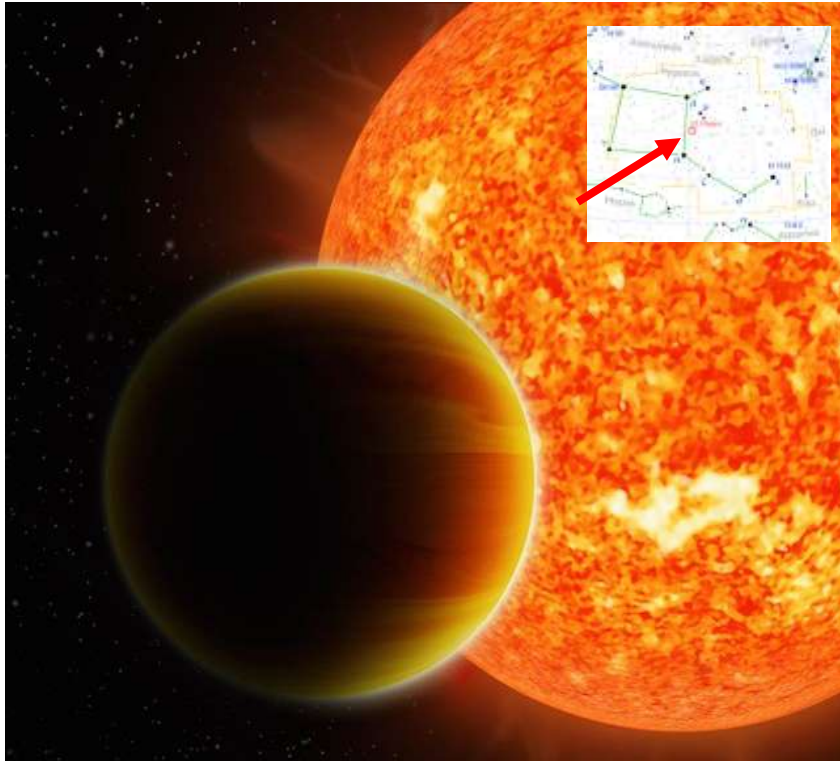
## Proxima du Centaure

Naine rouge distante de 40 mille milliards de km soit 4 années-lumière  
1/7<sup>e</sup> de la taille du Soleil

## Etape 10<sup>13</sup> km

10 000 milliards de km parcourus par la lumière en 1 an, soit 1 année-lumière

# Première exoplanète découverte, 51 Pegasi b



© Haven Giguere, Nikku Madhusudhan (vue d'artiste)

## Une boule de gaz brûlant !

*51 Pegasi b* est la première exoplanète découverte et confirmée en 1995. Cette planète géante gazeuse, située dans la constellation de Pégase, est très proche de son étoile et donc très chaude .

## Les exoplanètes

Une exoplanète, ou planète extrasolaire, est une planète située en dehors du Système solaire. Plus de 2000 exoplanètes étaient déjà découvertes en 2016. Le couple étoile - exoplanète tournant autour de son centre de gravité, une des méthodes de détection des exoplanètes consiste à constater le mouvement périodique de l'étoile par l'effet Doppler sur son spectre (léger déplacement périodique des raies spectrales).

## Lointaine et exotique

Située à environ 51 années-lumière de la terre, *51 Pegasi b* est une planète géante gazeuse qui orbite en seulement 4 jours autour de son étoile (*Helvetios*, une étoile semblable à notre Soleil). En raison de la proximité de son étoile (1/20e de la distance Terre - Soleil), sa température de surface est estimée à environ 1000°C. Ce type de planète n'existe pas dans le Système solaire, ainsi *51 Pegasi b* a été classée dans un nouveau type : les *Jupiter chauds*.

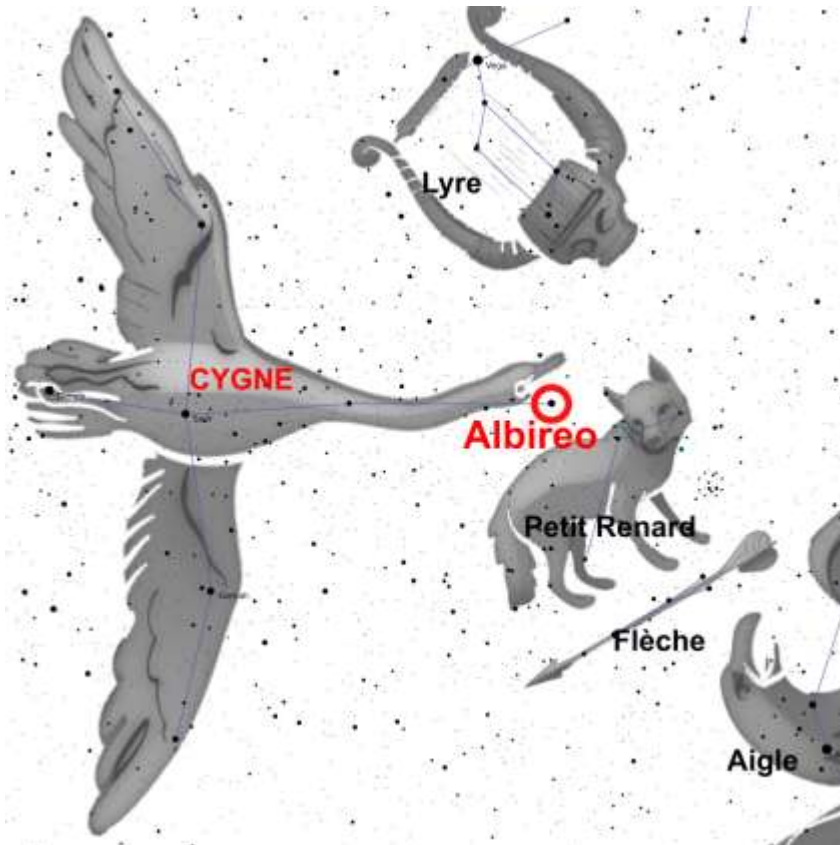
## 51 Pegasi b

Exoplanète  
à 51 années-lumière de la Terre  
type *Jupiter chaud*

## Etape 10<sup>14</sup> km

100 mille milliards de km  
environ 10 années-lumière

# Albireo et le Cygne



[carte KStars]

## Albireo et la constellation du Cygne

Albireo est une étoile double dont les composantes jaune et bleue sont aisément séparables dans un petit instrument. Facilement repérable haut dans le ciel d'été, la constellation du Cygne a la forme d'une croix.

### Les étoiles doubles

Parmi les étoiles doubles, proches sur la voûte céleste, certaines sont réellement proches dans l'espace et tournent l'une autour de l'autre : on parle de systèmes binaires. Albireo est un système binaire formé d'une étoile jaune (la plus froide et la plus brillante) et d'une étoile bleue (la plus chaude).

### Les constellations

Une constellation est un ensemble d'étoiles auquel l'imagination des hommes a associé un dessin, figure mythologique, animal, objet... Mais ces étoiles proches sur la sphère céleste peuvent être très distantes les unes des autres : dans la constellation du Cygne, par exemple, Albireo est à 400 années lumière de la Terre, alors que Deneb est quatre fois plus lointaine, à 1600 années lumière.

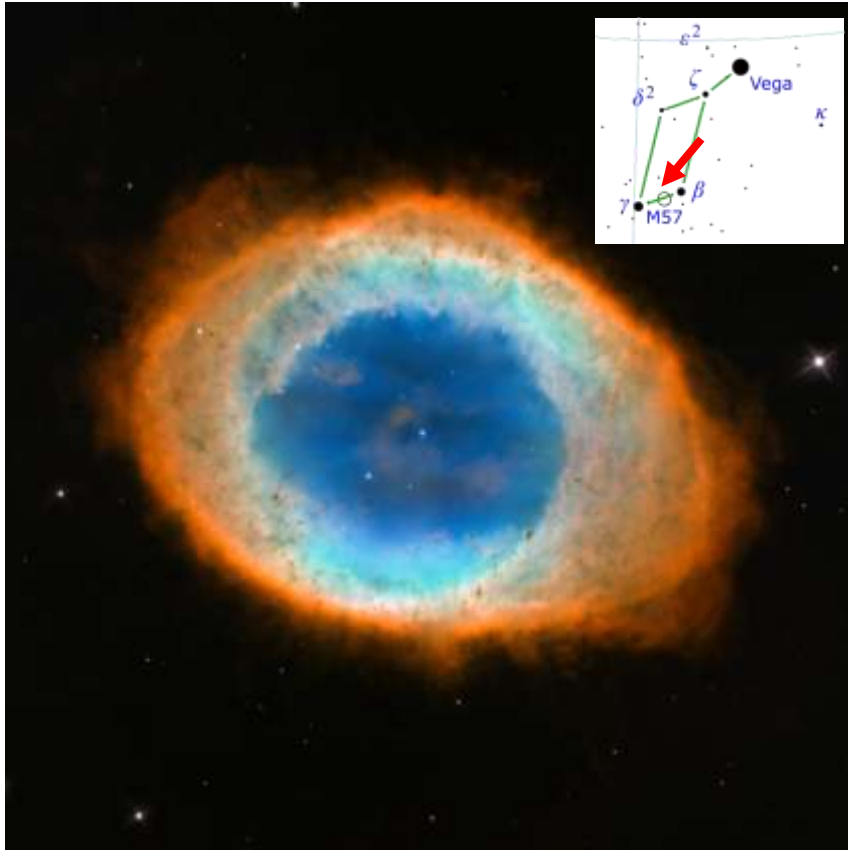
### Albireo

à 4 000 000 000 000 000 km  
ou  $4 \cdot 10^{15}$  km  
Soit environ 400 années-lumières

### Etape $10^{15}$ km

1 000 000 000 000 000 km  
environ 100 années-lumière  
parcourus par la lumière en  
100 ans

# La nébuleuse de la Lyre, M57



[NASA's Hubble Space Telescope]

## Une étoile qui a fait boum !

Cette *nébuleuse planétaire*, située dans la constellation de la Lyre, est une boule de gaz éjectée par une étoile mourante.

## Les nébuleuses planétaires

Les nébuleuses dites « planétaires » sont en réalité constituées par l'enveloppe externe de gaz en expansion éjectée d'une étoile en fin de vie. Le gaz éjecté peut avoir la forme d'une boule, d'un diabolo ou une structure plus complexe. Le cœur de l'étoile s'effondre pour former une naine blanche qui est un astre de très petite taille et de température de surface élevée. Cet astre va ensuite se refroidir lentement.

## L'avenir de notre Soleil

Cette évolution d'une étoile en nébuleuse planétaire concerne les étoiles de masse comparable à celle du Soleil. Le Soleil devrait évoluer en nébuleuse planétaire dans environ 5 milliards d'années.

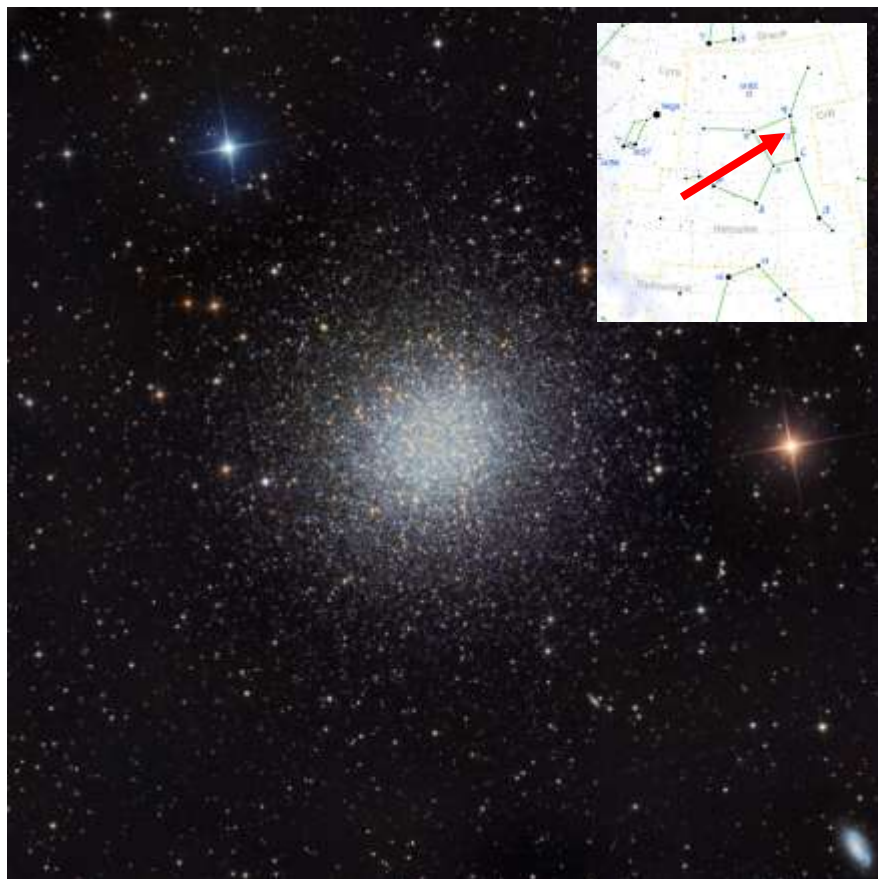
### M57

nébuleuse planétaire  
distante de 2 000 années-lumière  
diamètre environ 1,3 al

### Etape $10^{16}$ km

10 millions de milliards de km  
environ 1 000 années-lumière  
parcourus par la lumière en  
1000 ans

# Amas globulaire d'Hercule, M13



[image NASA]

[carte Wikipedia]

## Une boule d'étoiles

Un spectacle magnifique même dans les plus petits instruments. Cet amas d'étoiles, à 21 000 années-lumière de nous, tourne autour du centre de notre galaxie.

## Les amas globulaires

Il s'agit d'ensembles sphériques (globulaires) de quelques dizaines de milliers à plusieurs millions d'étoiles, restant groupées grâce à leur attraction mutuelle. Formés d'étoiles anciennes, les amas globulaires orbitent dans une sphère entourant leur galaxie hôte (son halo), pas dans le disque de cette galaxie. Notre galaxie comporte plus de 150 amas globulaires. C'est en déterminant le centre de ce nuage d'amas qu'on a pu situer le centre de notre galaxie.

En 1972, Dans le cadre du programme CETI (*Communication with ExtraTerrestrial Intelligence*) l'espèce humaine a envoyé un message radio vers M13, supposé, compte tenu de sa densité, pouvoir abriter des civilisations assez avancées pour répondre. Le message n'arrivera que dans 21 000 ans et son hypothétique réponse ne nous reviendra que dans 42 000 ans...

## M13

amas globulaire distant de 21 000 années-lumière plus de 500 000 étoiles, âgé d'environ 13 milliards d'années

## Etape $10^{17}$ km

100 millions de milliards de km environ 10 000 années-lumière parcourus par la lumière en 10 000 ans

# Notre galaxie, la Voie lactée



## Une galaxie spirale banale

Notre galaxie a grossièrement la forme de deux œufs au plat dos-à-dos : un disque avec un renflement central, le bulbe. Dans la classe des galaxies spirales dont fait partie la Voie lactée, la concentration des étoiles varie pour dessiner des bras enroulés. Comme toutes les galaxies, la Voie lactée contient des milliards d'étoiles, du gaz, de la poussière et, au centre, un trou noir super massif. La poussière et les gaz gênent considérablement l'étude du centre de notre galaxie, qu'il faut alors observer en infrarouge ou en ondes radio.

L'ensemble tourne sur lui-même. Le Soleil met environ 220 millions d'années pour faire un tour. Il est admis depuis les années 1970 que la sphère entourant les galaxies (leur halo) contient une matière « noire » – n'émettant aucun rayonnement – ajoutant sa gravitation et permettant d'expliquer la cohérence et la vitesse de rotation de l'ensemble. En effet, la masse observable dans les galaxies (étoiles, gaz et poussière) est insuffisante pour expliquer leur vitesse de rotation.

## Comme un frisbee

[Nasa]

Comme toutes les étoiles visibles à l'œil nu, notre Soleil fait partie d'un immense disque en rotation : notre galaxie. La voie lactée correspond à une plus forte densité d'étoiles quand le regard vise dans le plan de cette galaxie.

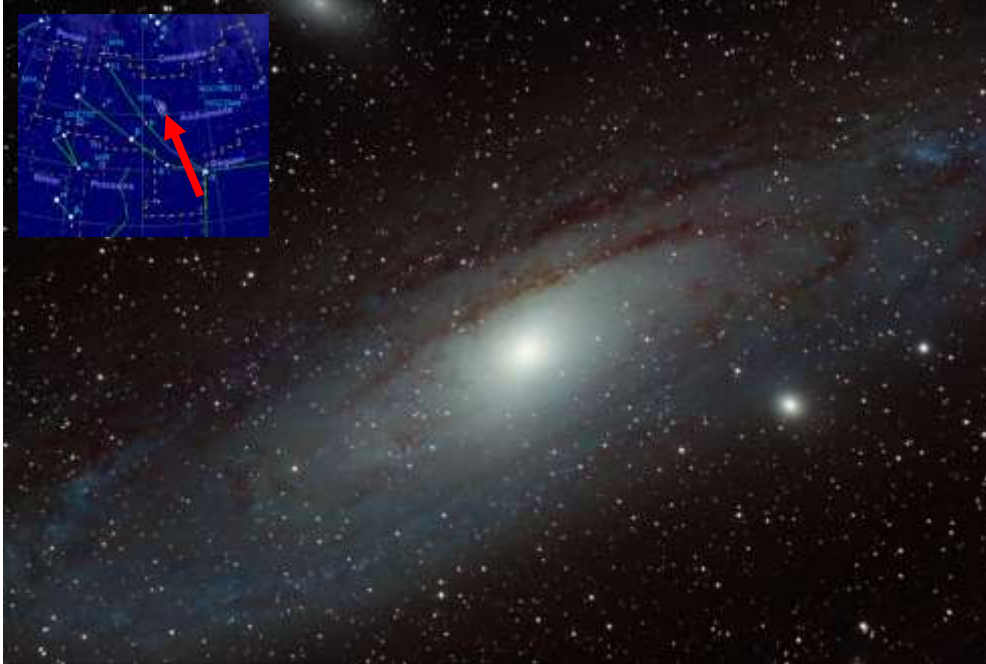
## La voie lactée

Galaxie, la nôtre !!  
diamètre 100 000 al  
environ 200 milliards  
d'étoiles  
Soleil à 28 000 al du centre

## Etape $10^{18}$ km

1 milliard de milliards de km  
environ 100 000 al

# Galaxie d'Andromède M31



[PL/SAR]

## Une énorme galette d'étoiles

D'environ 1 000 milliards d'étoiles, cette Galaxie ressemble beaucoup à la nôtre (la Voie Lactée), en plus grand. C'est la Galaxie la plus proche de la Voie Lactée, que l'on peut apercevoir à l'œil nu

## Les galaxies

Les galaxies sont comme des nuages composés d'énormes quantités d'étoiles, de gaz, de poussières et de matière noire et dont les formes les plus caractéristiques sont les elliptiques et les spirales. L'existence de ces assemblages stellaires fut définitivement établie en 1920 par Edward HUBBLE.

La Galaxie d'ANDROMÈDE et La VOIE LACTÉE (notre galaxie) sont des galaxies assez semblables en forme (spirales) et dimensions (diamètre de l'ordre de 100 000 années-lumière). Avec quelques galaxies moins importantes, elles forment le Groupe Local qui participe, avec d'autres groupes de galaxies, à l'amas de la VIERGE. Les amas s'assemblent ensuite en superamas, sortes de filaments qui forment, à une gigantesque échelle, une structure en forme d'éponge avec d'immenses espaces vides.

Les nuages de gaz et de poussières des galaxies donnent en permanence naissance à de nouvelles étoiles, tandis que les plus vieilles étoiles meurent en libérant quantités de gaz et poussières au sein même de la galaxie. Au centre de chaque galaxie massive se trouve un TROU NOIR super-massif (4 millions de fois la masse du Soleil pour la Voie Lactée) alors que quelques centaines de trous noirs beaucoup plus modestes sont éparpillés tout autour.

Les Galaxies spirales d'Andromède et de la Voie Lactée se rapprochent à la vitesse de 120 km/s et devraient fusionner dans environ 4 milliards d'années pour former une galaxie unique, plus volumineuse et de type elliptique.

### M 31

Galaxie spirale  
dans la constellation d'Andromède  
à 2,3 millions d'années-lumière  
Environ 1 000 milliards d'étoiles

### Etape $10^{19}$ km

10 milliards de milliards de km  
soit 1 000 000 années-lumière  
parcourus par la lumière en  
1 000 000 d'années



# La galaxie du Tourbillon, M51

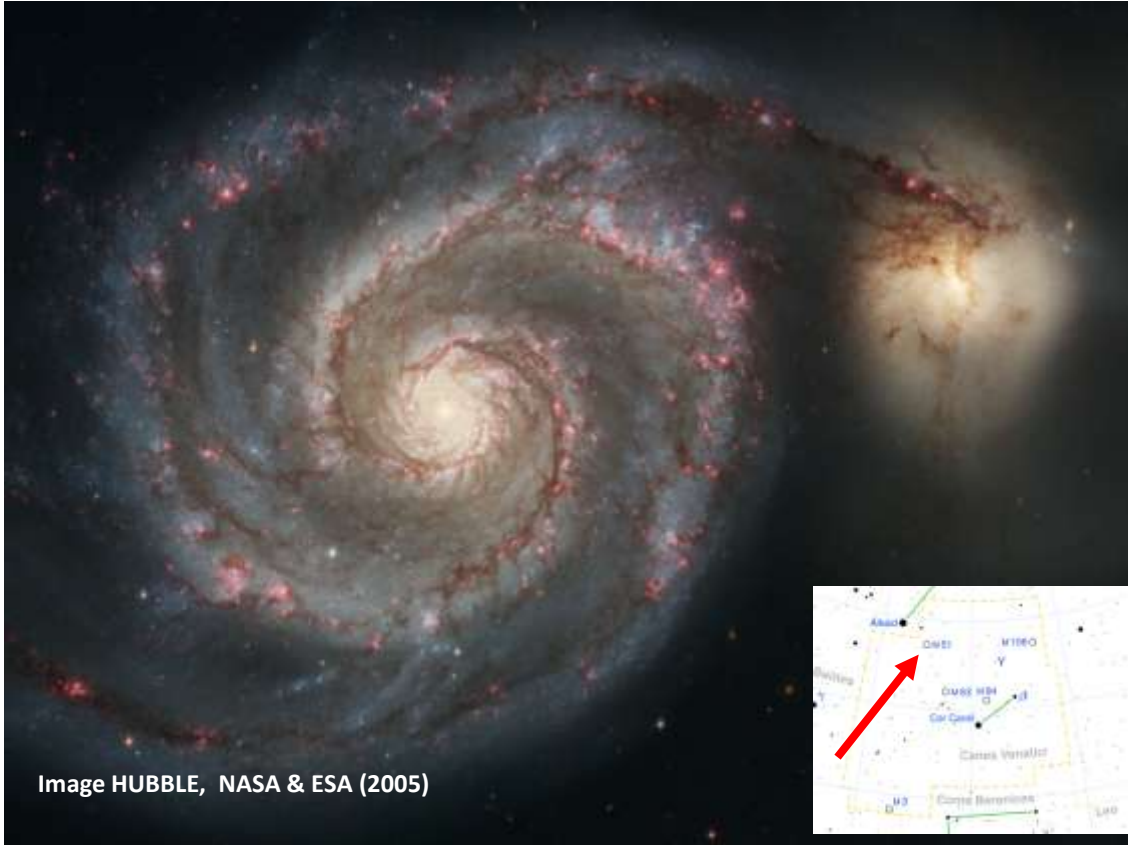


Image HUBBLE, NASA & ESA (2005)

## Une galaxie spirale

La galaxie dite du « Tourbillon » a été découverte par Charles Messier en 1773. Cette galaxie est observable dans la constellation des Chiens de chasse. Elle est située à une distance d'environ 20 à 35 millions d'années-lumière de la Terre. Il s'agit d'une galaxie spirale, qui, avec un diamètre estimé à 100 000 années-lumière, est comparable à notre galaxie, la Voie lactée.

## Un couple de galaxies

M51 présente la particularité d'être accompagnée d'une petite galaxie, NGC 5195, découverte en 1781. Il y a plusieurs millions d'années, l'interaction entre NGC 5195 et M51, beaucoup plus grande et massive, a déformé NGC 5195 pour lui donner la structure irrégulière que nous observons aujourd'hui.

## Une galaxie cannibalise sa voisine !

La galaxie du Tourbillon (M51) est une galaxie spirale semblable à la nôtre, mais elle a déformé sa voisine plus petite qu'elle, NGC 5195.

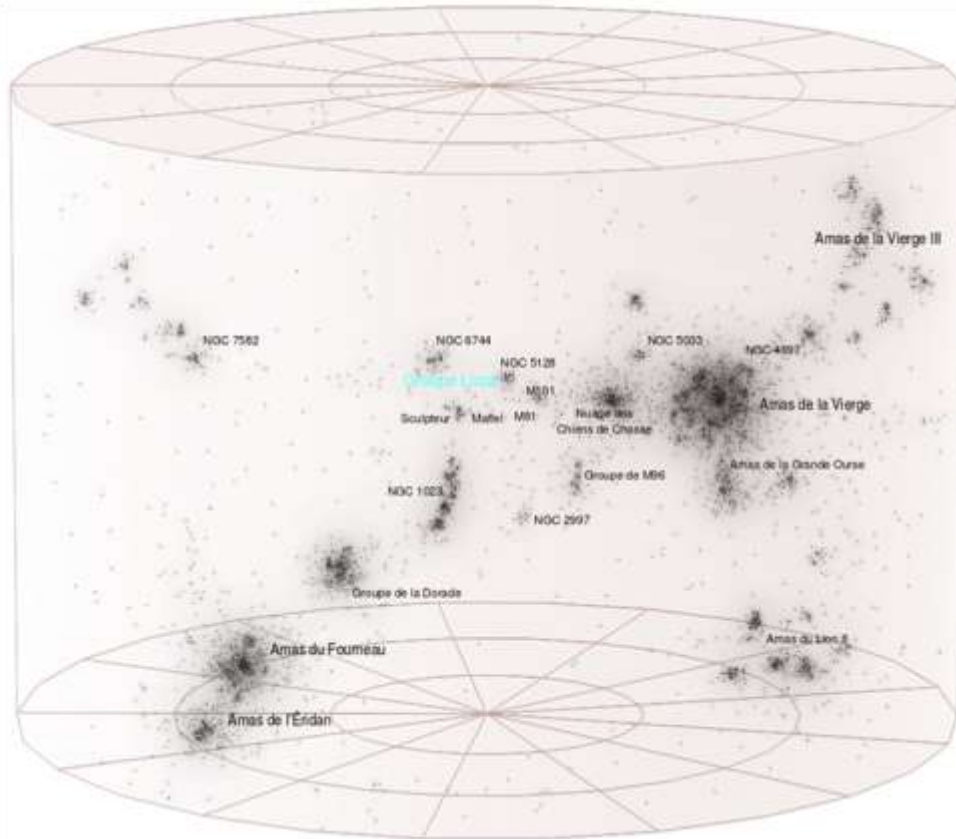
## M51 et NGC 5195

Couple de galaxies  
Entre 20 et 35 millions d'années-lumière de la Terre.  
M51 : galaxie spirale

## Etape $10^{20}$ km

100 milliards de milliards de km  
environ 10 millions d'années-lumière parcourus par la lumière  
en 10 millions d'années

# Rayon du superamas de la Vierge



[source: wikipedia]

## L'expansion de l'Univers en action

Groupes et amas de galaxies se regroupent pour former des ensembles gigantesques appelés « superamas ». À cette échelle, l'expansion de l'Univers commence à se faire sentir. Mais, dans un ensemble de corps liés mutuellement par la gravité, l'attraction mutuelle est assez forte pour résister à l'expansion. C'est le cas dans les groupes ou amas de galaxies. Par contre, la force gravitationnelle qui lie les amas entre eux n'est pas suffisamment puissante et l'expansion va donc se faire sentir. Ainsi, l'amas de la Vierge s'éloigne du Groupe Local à 1 250 kilomètres par seconde et l'amas de Coma à 6 700 kilomètres par seconde. Les amas s'éloignent donc lentement les uns des autres et la taille des superamas augmente avec le temps. Le superamas de la Vierge fait partie d'un ensemble encore plus vaste nommé le Superamas Laniakea.

## Une structure gigantesque

Notre galaxie appartient au groupe local qui lui-même appartient au superamas local, lui-même faisant partie du superamas de la Vierge.

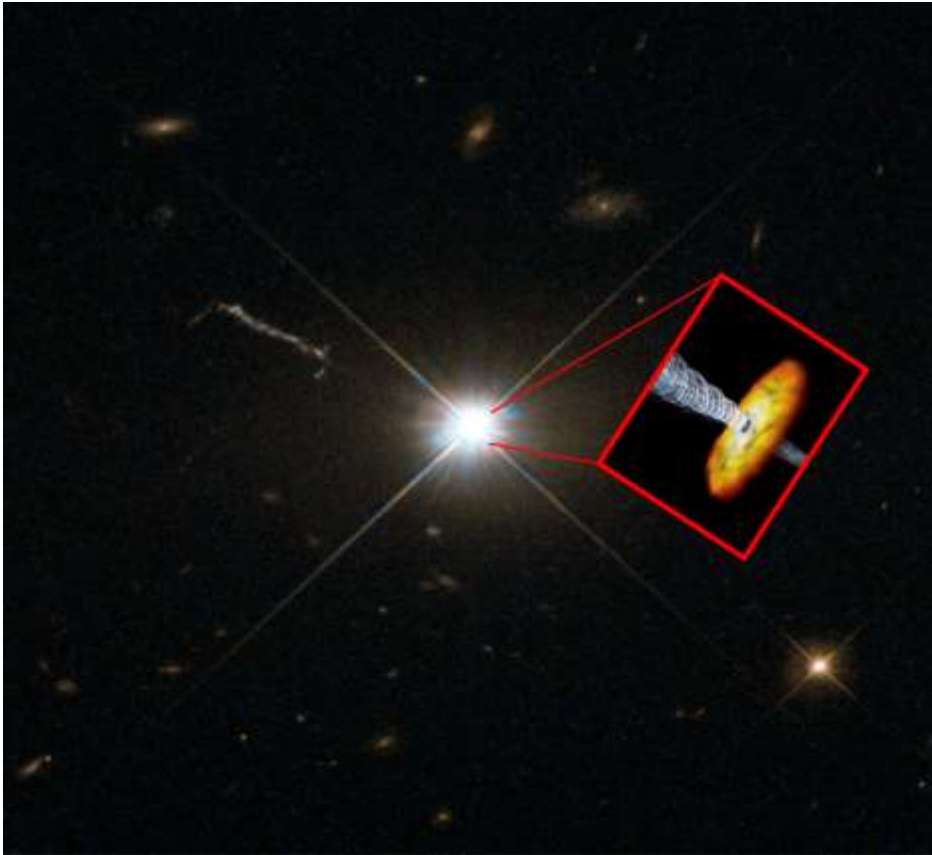
## Superamas de la Vierge

diamètre : 200 millions d'années-lumière  
 nombre de galaxies : 10 000  
 nombre d'amas : 100

## Etape $10^{21}$ km

1 000 milliards de milliards de km  
 environ 100 millions d'années-lumière parcourus par la lumière en 100 millions d'années

# Quasar 3C273



[3C273] (HST/NASA)

## Un des objets les plus lumineux du ciel

C'est une galaxie dont le cœur émet 100 fois plus de lumière que toute la Voie lactée, mais tellement loin qu'elle est invisible à l'œil nu et semblable à une étoile vue dans un télescope.

## Une galaxie à noyau « actif »

Une galaxie « active » possède en son centre un trou noir géant entouré d'un disque d'accrétion. Quand la matière qui s'engouffre dans le trou noir excède un seuil critique, cela déclenche une forte émission radio et la formation de jets.

Selon l'angle sous lequel se présente la galaxie à noyau actif, nous voyons un « blazar » (un des jets pointe sur la Terre), un « quasar » - *quasi-stellar objects* - (jet de profil) ou une « radiogalaxie » (vue par la tranche cachant le cœur).

Tous les quasars connus (plus de 100 000) se situent à de très grandes distances de nous, le plus éloigné étant à environ 13 milliards d'années-lumière, aux limites de l'univers observable.

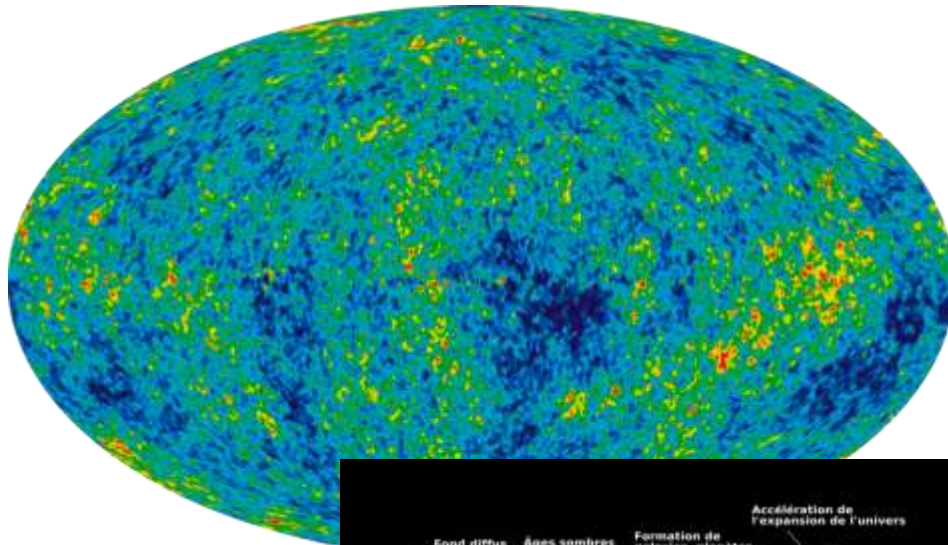
## Quasar 3C273

Distance : 2,44 milliards d'al  
 Magnitude apparente : +12,9  
 Z (redshift) : 0,16  
 s'éloigne à 16 % de la vitesse de la lumière

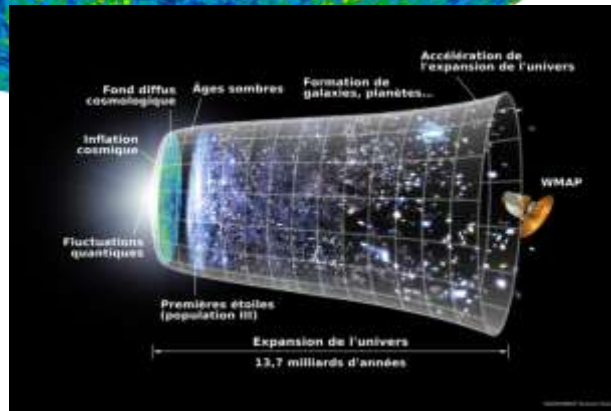
## Etape 10<sup>22</sup> km

10 000 milliards de milliards de km  
 environ 1 milliard d'al  
 parcourus par la lumière en  
 1 milliard d'années

# Big Bang et fond diffus cosmologique



[NASA/Wikipedia]



[NASA/Wikipedia]

## La lueur du Big Bang

Il y a 13,7 milliards d'années, l'Univers est né du Big Bang, une sorte d'« explosion » qui a créé l'espace et le temps. L'image ci-dessus représente la plus vieille lumière que nous puissions recevoir, émise peu après le Big Bang.

## Le Big Bang

C'est pendant les 3 premières minutes après le Big Bang, où l'Univers était très chaud et dense, que se sont formés l'hydrogène et l'hélium qui constituent encore l'essentiel de l'Univers. D'abord sous forme de plasma, cette matière diffusait la lumière comme un brouillard.

## Le fond diffus cosmologique

Après 380 000 ans, le plasma s'est assez refroidi pour donner un gaz neutre laissant passer la lumière. Vieille de 13 milliards d'années, cette lumière nous arrive de toutes les directions, d'où son nom de « fond diffus cosmologique ». Depuis sa création, l'Univers se dilate ; on dit qu'il est en expansion. Cette expansion a éloigné la source (maintenant à environ 45 milliards d'al) et « rougi » la lumière du fond diffus, son maximum d'énergie étant maintenant dans les micro-ondes. Les irrégularités du fond diffus nous renseignent sur les inhomogénéités initiales de la matière, germes des galaxies.

## Fond diffus

émis il y a 13,7 milliards d'années

## Etape $10^{23}$ km

100 mille milliards de milliards de km  
10 milliards d'années-lumière parcourus par la lumière en 10 milliards d'années