

LES STRUCTURES DE L'UNIVERS

Du système solaire au rayonnement cosmologique

L'objectif de cet exposé est de donner un aperçu de la façon dont la matière visible de l'Univers est organisée. Nous partirons du système solaire, aux étoiles proches, aux bras de la Galaxie, pour continuer avec la Galaxie elle-même, les amas de galaxies, les superamas, et enfin les structures à grande échelle et le fond de rayonnement cosmologique, qui donnent une vue d'ensemble de loin, ...très loin...

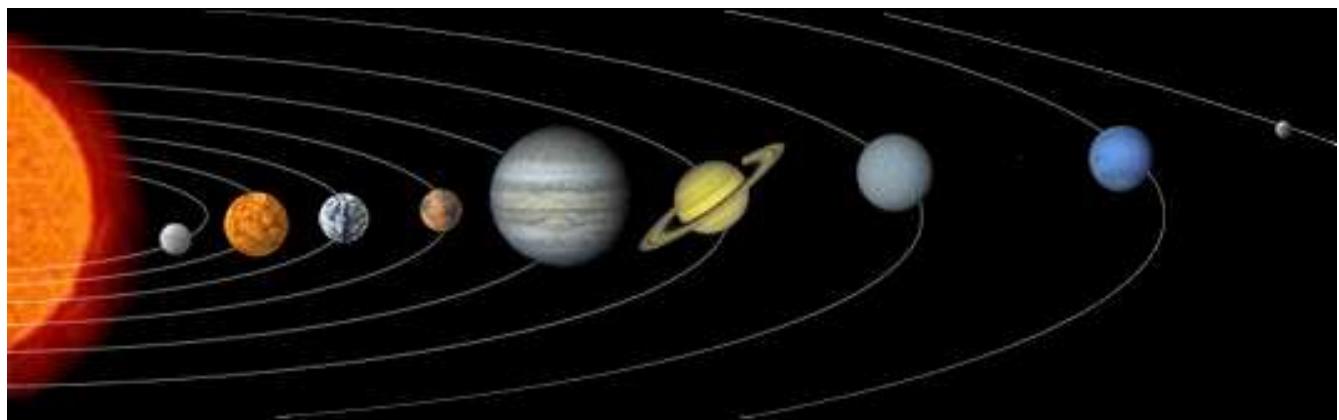
Afin de mieux apprécier les distances considérables qui séparent ces différents objets, nous parlerons de temps mis par la lumière pour parcourir une distance, et non de kilomètres, unité vraiment trop courte pour ces mesures astronomiques.

L'année lumière (al) est donc la distance parcourue par la lumière dans le vide en une année terrestre. Une année lumière vaut environ 9 463 milliards de km, soit 63 255 fois la distance moyenne de la Terre au Soleil.

Le système solaire

Il est composé d'une étoile centrale et d'objets divers et variés qui tournent autour. Parmi ces objets, les planètes, et une myriade d'objets de plus petite taille, plus ou moins éloignés du Soleil, plus ou moins gros, des astéroïdes aux poussières.

Les astéroïdes sont confinés dans la ceinture principale, les troyens, et les transneptuniens dont font partie la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort pour ne citer que les plus importants.



Pour plus de détails sur les petits objets du système solaire, voir l'exposé dédié à ce sujet.

Les gros objets du système solaire sont donc les planètes, après le Soleil lui-même.

Le Soleil à lui seul contient 99,85% de la masse du système.

Les planètes comptent pour 0,135% du total. Jupiter à lui seul est responsable de plus de la moitié de ce chiffre. Les autres objets mineurs pèsent 0,015% de la masse totale.

Le système solaire répartit sa masse dans un disque centré sur le Soleil. Les planètes tournent autour dans un même plan, celui de l'écliptique (celui qui contient l'orbite de la Terre).

Voyons les distances relatives dans le système, sachant que le Soleil mesure 1 391 000 km de diamètre (0,0093 ua - la lumière parcourt cette distance en 4,6 secondes).

Le tableau suivant donne les distances des planètes et autres objets dans différentes unités : en kilomètres, unité à taille humaine, en unités astronomiques (ua) représentant la distance moyenne entre la Terre et le Soleil. C'est une unité très utilisée avec les objets du système solaire. Vient ensuite le temps mis par la lumière pour parcourir la distance en question. Cette unité est très commode et rend mieux compte des distances que des km. La vitesse de la lumière est, dans le vide, de 299 792 458 m/s.

Objet	Distance moyenne au Soleil		
	km	ua	Temps de lumière
Mercure	57 910 000	0.3871	3.22 mn
Vénus	108 200 000	0.7233	6.01 mn
Terre	149 600 000	1.0000	8.32 mn
Mars	227 940 000	1.5237	12.67 mn
Jupiter	778 330 000	5.2028	43.27 mn
Saturne	1 429 400 000	9.5388	1.324 h
Uranus	2 870 990 000	19.1914	2.660 h
Neptune	4 504 300 000	30.0611	4.173 h
Pluton	5 906 380 000	39.4805	5.473 h
Ceinture de Kuiper	7 480 000 000	50	7 h
Nuage de Oort	22 000 000 000 000	150 000	2,4 années
Proxima du Centaure	41 000 000 000 000	271 830	4,3 années

On voit que jusqu'à Pluton, le diamètre du système solaire dans le plan de l'écliptique est d'environ 11 heures de lumière (la lumière met 11 heures pour le traverser). Il s'étend bien entendu plus loin, mais en se limitant aux planètes « officielles », la surface du disque où évoluent les planètes est d'environ 27 milliards de milliards de km² (27.10¹⁸ km²). Dans cette surface, on ne rencontre que 9 planètes. Le système solaire est essentiellement composé de... vide. Ou du moins, de très peu d'éléments suffisamment gros pour être visibles.

Partant du Soleil en ligne droite, la probabilité de trouver un objet sur sa trajectoire est faible.

Entre Pluton et l'étoile la plus proche (Proxima du Centaure), on pensait encore récemment qu'il n'y avait rien. Ce n'est pas le cas. Ces dernières années ont vu la découverte d'objets au-delà de Pluton, dans la ceinture de Kuiper. Sans preuves directes, on estime la présence d'un « réservoir de comètes », le nuage de Oort, que probablement d'autres étoiles pourraient posséder, orbitant de façon sphérique jusqu'à la moitié de la distance des étoiles les plus proches.

Le Soleil, et ses planètes et objets associés, n'est qu'une des nombreuses étoiles qui compose un énorme rassemblement d'étoiles nommé Galaxie. On estime à 200 milliards le nombre d'étoiles de notre Galaxie appelée Voie Lactée.

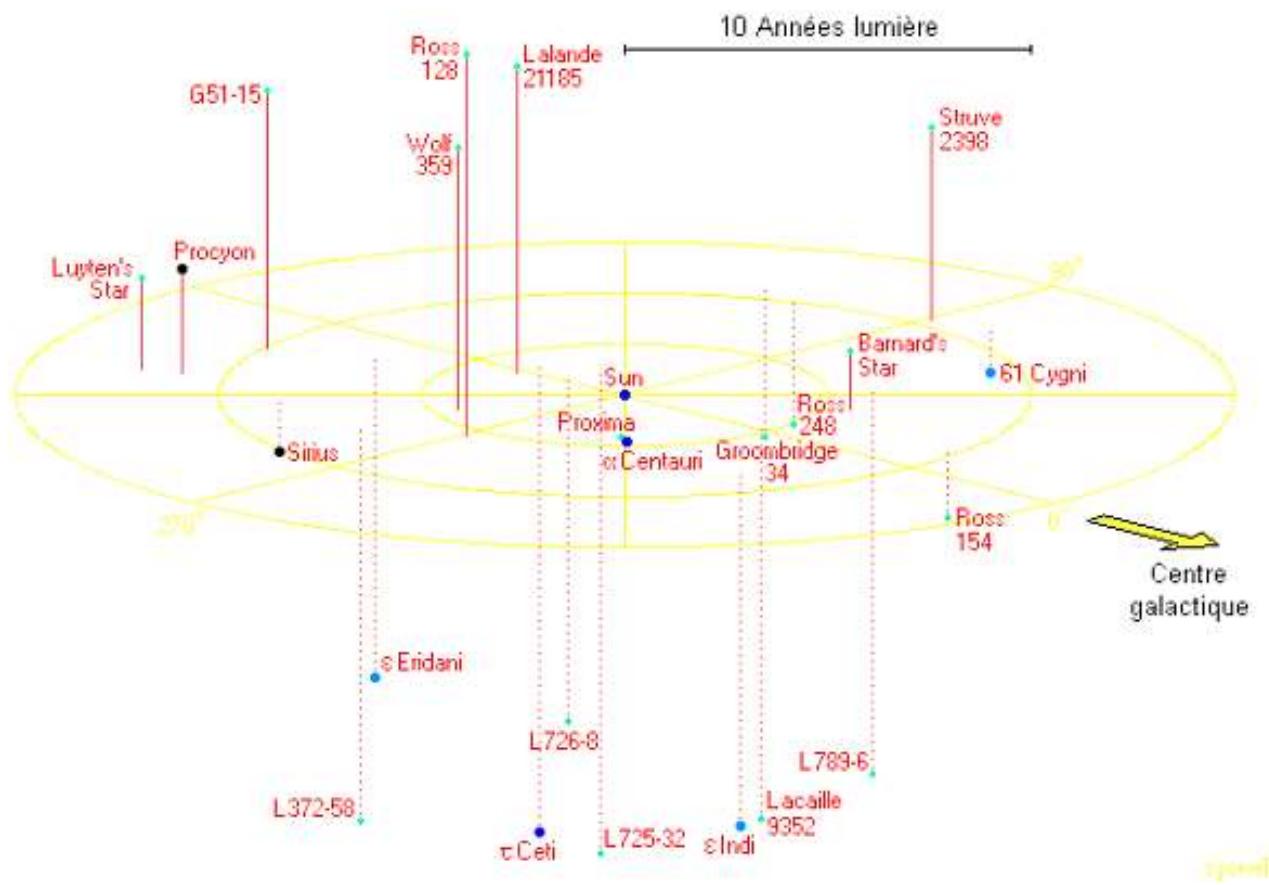
Les étoiles proches

On désigne sous le nom de voisinage solaire la région de la Galaxie accessible à l'observation dans le domaine visible.

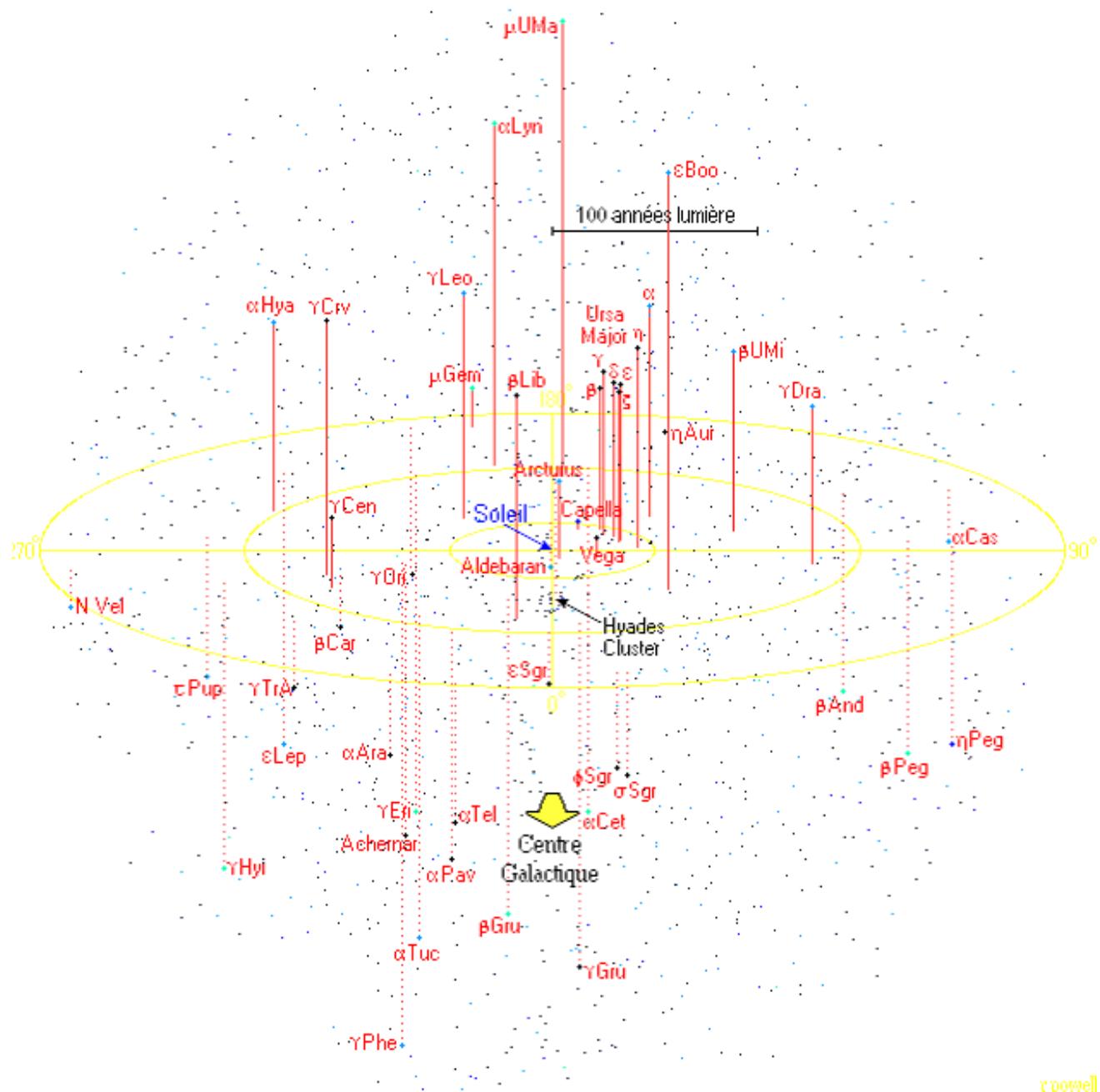
Si l'on considère que toutes les étoiles ont la même luminosité absolue, les plus brillantes sont les plus proches. Autrement dit, plus une étoile paraît faible, plus elle est éloignée de nous.

Mais les étoiles n'ont pas toutes la même luminosité absolue, et l'affirmation précédente doit être pondérée.

Voici une représentation en 3D des étoiles les plus proches, jusqu'à 12.5 al de rayon. La plupart de ces étoiles sont des étoiles de faible luminosité absolue (la Galaxie en compte 80%). On note à contrario la présence de Procyon et de Sirius, étoiles très brillantes.



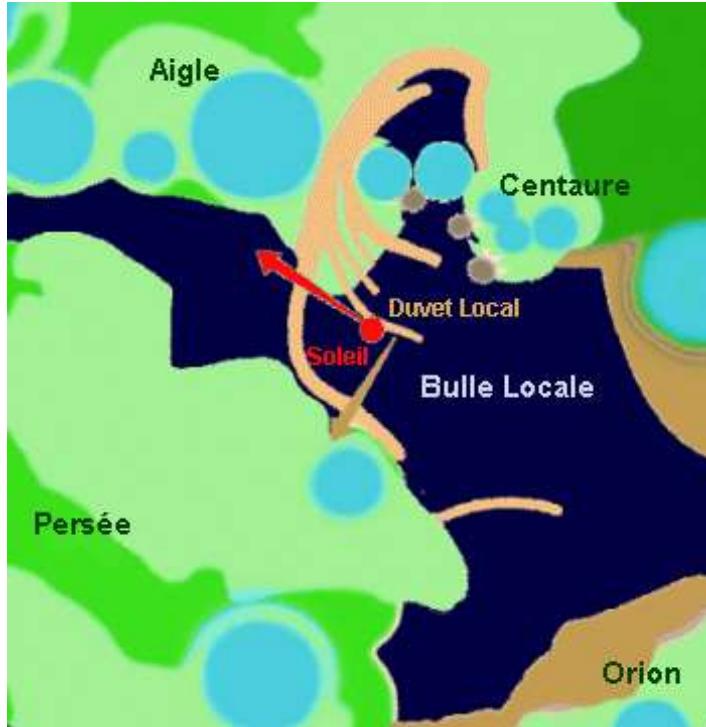
Le schéma suivant élargit 20 fois cette première vue, et intègre les étoiles jusqu'à un rayon de 250 al. On note la présence de Véga, Arcturus, Capella, Aldébaran pour les plus caractéristiques.



Etoiles proches : 250 al / 260 000 étoiles

La Bulle locale

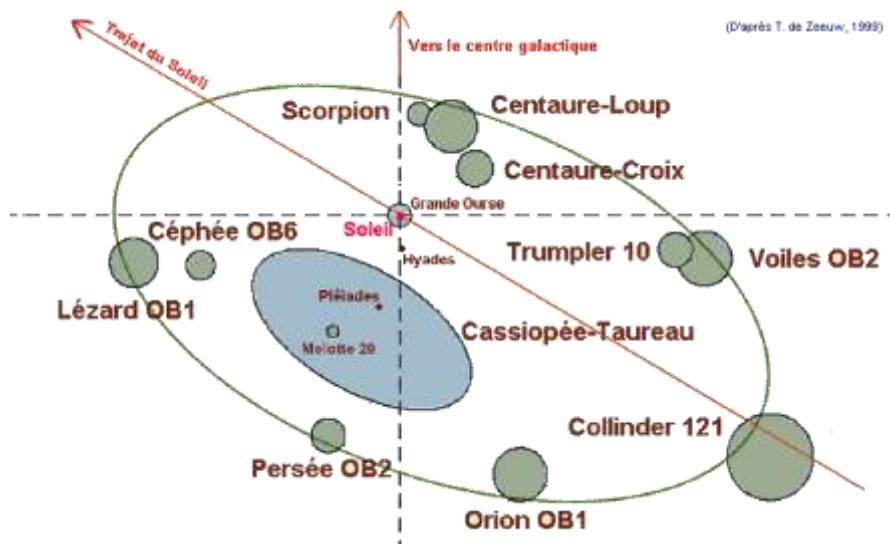
L'histoire complexe de l'actuel voisinage solaire a impliqué l'explosion de nombreuses supernovae. Celles-ci ont soufflé dans l'espace interstellaire un gaz très dilué et très chaud (plusieurs millions de degrés) qui emplit un grand volume à l'intérieur de la ceinture de Gould, et dans lequel est immergé le Système solaire. Cette cavité, aux contours eux aussi assez compliqués est appelée la Bulle locale. Ce n'est pas non plus un milieu homogène. En explosant, les supernovae repoussent aussi le gaz plus froid qui les environne, et le compriment pour former de petits nuages. Le Soleil est d'ailleurs actuellement en train de traverser un de ces petits nuages (le Nuage Local), lui-même appartenant à un petit groupe de nuages (le Duvet local...), soufflés depuis les régions actives du Centaure.



Bulle locale. Structure du milieu interstellaire dans le voisinage solaire.
(Source : [Priscilla Frisch](#)).

La ceinture de Gould

La structure la plus remarquable de notre province galactique est constituée par un chapelet d'amas ouverts et d'associations stellaires (Lézard OB1, Persée OB2, etc.) qui forment une grande ellipse autour du Soleil, inclinée d'environ 18° par rapport au plan galactique, et d'un rayon moyen de l'ordre de 2000 années-lumière. L'existence de cette ceinture, déjà soupçonnée au milieu du XIX^e siècle par John Herschel, a été confirmée quelques décennies plus tard par l'astronome Benjamin Gould, qui lui a donné son nom.



(D'après T. de Zeeuw, 1998)

L'origine de cette structure (la ceinture de Gould) pourrait se situer il y a cinq cents millions d'années, avec la traversée du bras spiral majeur par un gros nuage moléculaire.

Selon ce scénario, cette traversée déstabilise le nuage et y met en branle un processus de formation stellaire, au cours duquel naissent quelques étoiles massives, qui vont bientôt exploser, déstabilisant ainsi d'autres portions de nuages autour d'elles, qui donneront naissance à quelques amas stellaires actuellement proches de nous, tels que les Pléiades (au centre d'une association très étendue qui compte aussi l'amas ouvert Melotte 20).

De proche en proche de nouvelles formations stellaires ont lieu ainsi sur le périmètre d'un cercle, un peu plus grand à chaque génération. La rotation différentielle de la Galaxie déforme ce cercle et le transforme en ellipse, mais les derniers groupes d'étoiles formés continuent d'exprimer la poursuite du processus, qui consomme la matière interstellaire présente et creuse l'espace qui sépare le Bras majeur et l'Éperon d'Orion. Cette activité qui se manifeste actuellement avec une certaine vigueur dans les régions d'Orion et du Sagittaire, explique que ce soit aussi dans ces régions que l'on observe les plus belles nébuleuses diffuses.

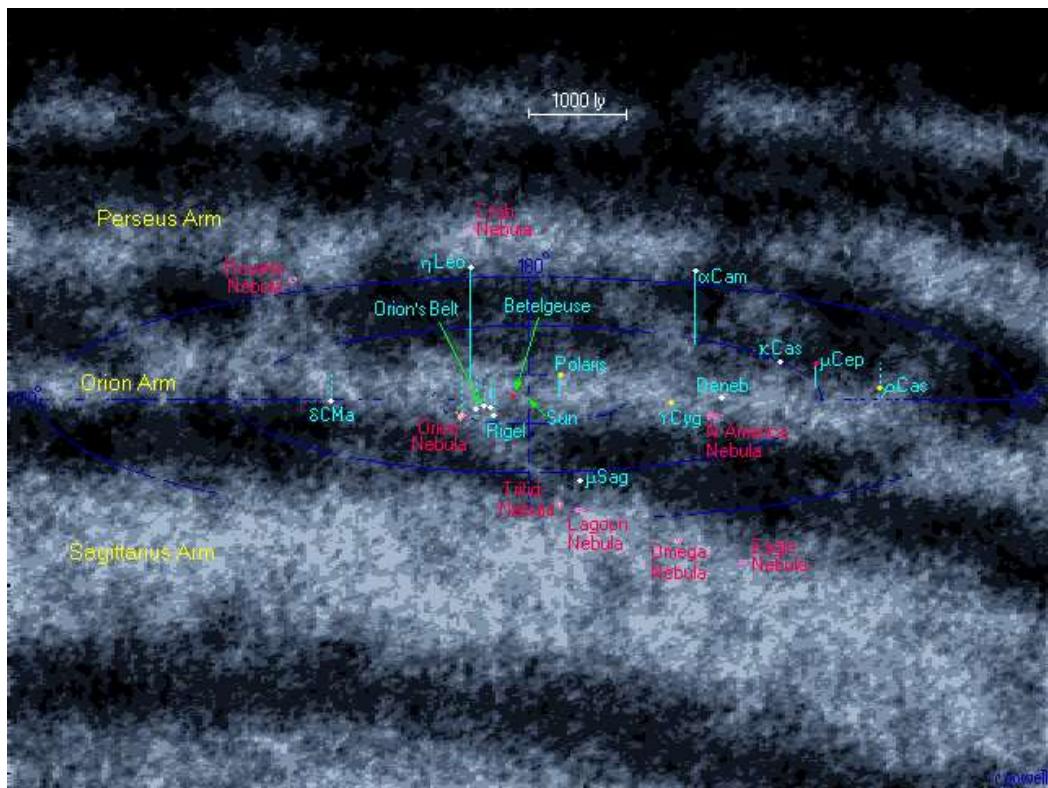
Le Soleil, beaucoup plus vieux que cette structure n'en fait pas partie. Sa course autour de la Galaxie l'a fait aborder ce secteur il y a une vingtaine de millions d'années, et, se trouvant à peu près au centre de l'ellipse (traversant actuellement le courant d'étoiles de la Grande Ourse, tout aussi par hasard), il devrait quitter cette province dans un délai similaire.

Les bras de la Galaxie

Avec la vue suivante, nous entrevoyons des structures générales de la Galaxie, les bras spiraux. Apparaissent Polaris, Dénéb, Betelgeuse, Rigel, étoiles très brillantes et éloignées, ainsi que les nébuleuses proches comme la Lagune, Trifide, l'Aigle, la Rosette, Nord Amérique, le Crabe, et la grande nébuleuse d'Orion.

Mais surtout, on remarque des zones denses en étoiles, les bras. Dans ces zones se trouvent une plus forte densité de matière. C'est le lieu où les nuages de gaz et poussières sont présents en grand nombre, et là où se forment les étoiles.

Le Soleil est dans le bras d'Orion. On sait qu'il n'y est pas né. Le bras d'Orion est accompagné vers l'extérieur de la Galaxie par le bras de Persée, et vers l'intérieur, par le bras du Sagittaire.

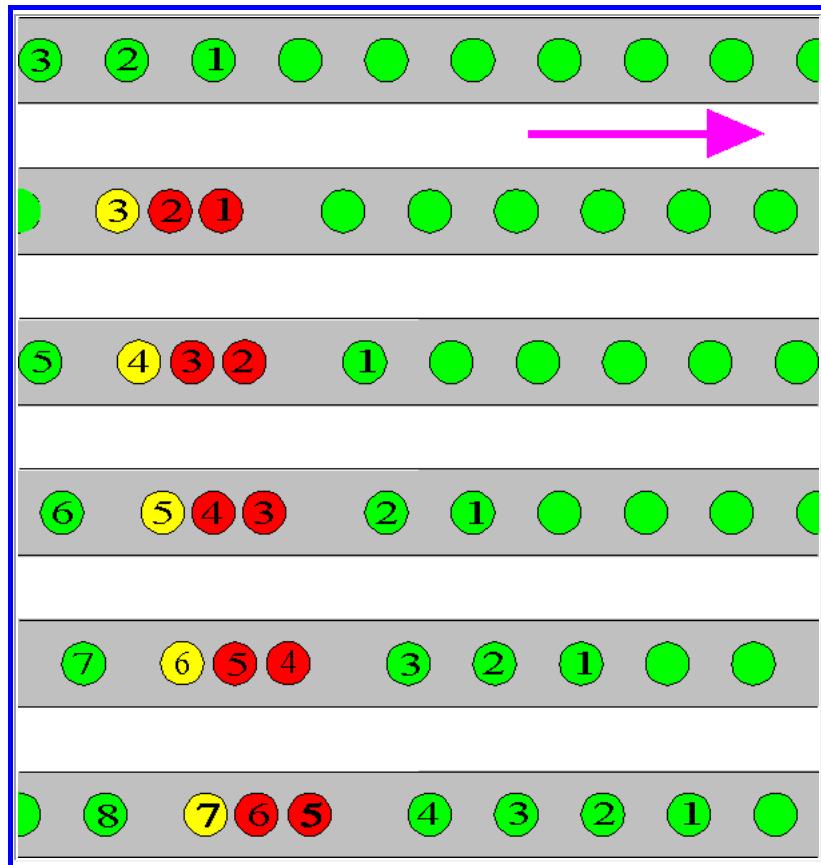


Rayon : 5 000 al / 600 millions d'étoiles

La Galaxie tourne autour de son centre. Elle a une forme de disque. La rotation de la matière hétérogène provoque la formation de bras spiraux.

Le phénomène des ondes de densité est analogue à celui qui forme des bouchons sur la route quand un véhicule freine brutalement dans le flot de circulation et ré-accélère.

De la même manière que les véhicules rentrent et sortent du bouchon, les étoiles ne font que passer dans les bras spiraux.



La Voie Lactée

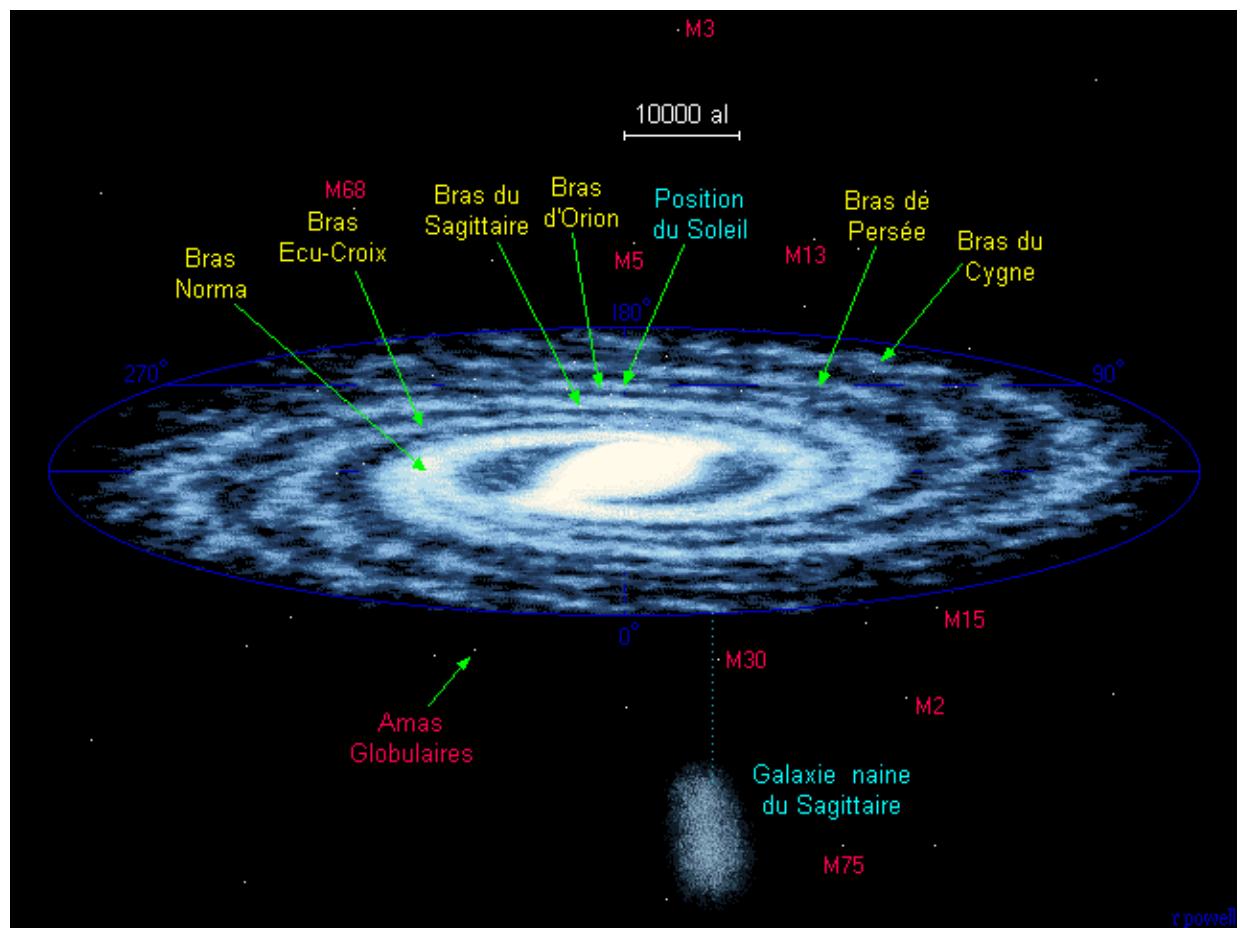
C'est la galaxie qui contient notre Soleil – une étoile parmi les 200 milliards qu'elle compte. Elle est barrée, chaque extrémité de la barre laisse partir deux bras spiraux, ce qui semble rare dans le bestiaire des galaxies. Le Soleil est situé dans le bras d'Orion, aux deux tiers du centre, soit à environ 26 000 al.



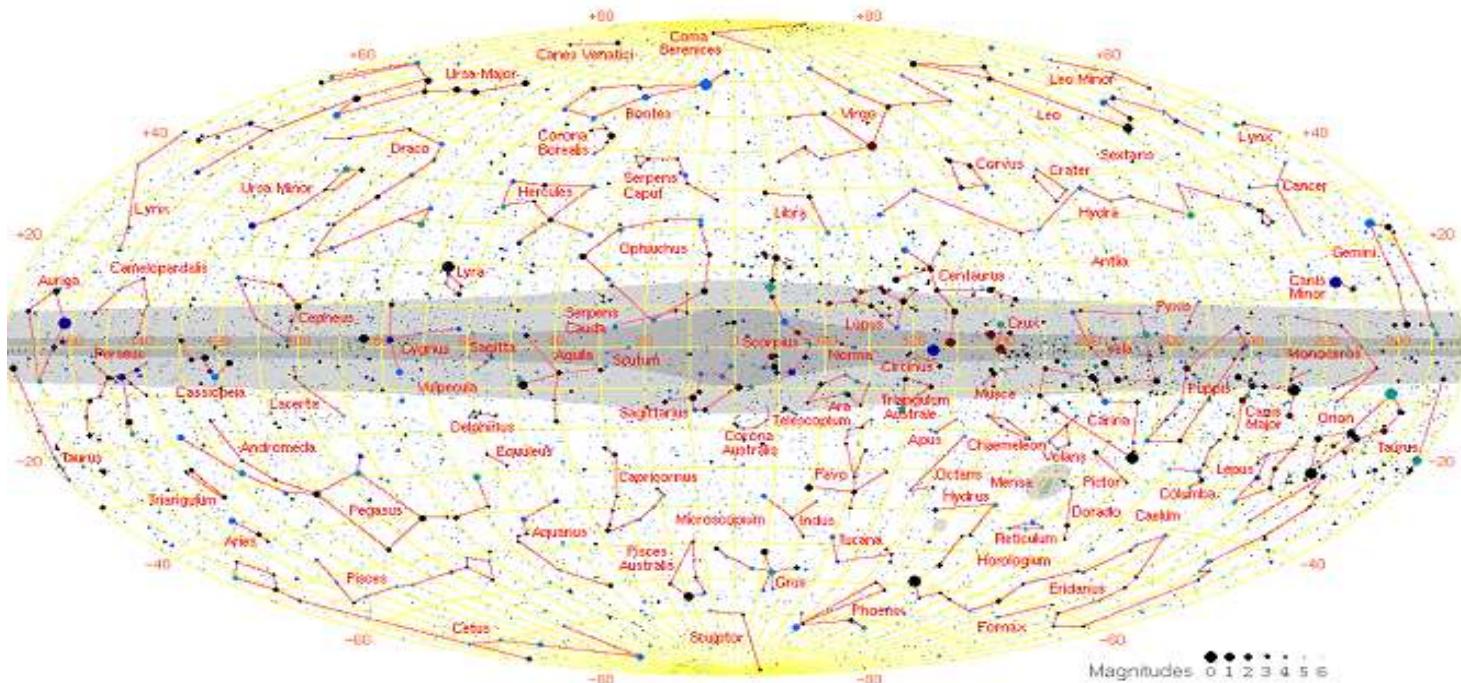
Comme les autres galaxies spirales, la Voie Lactée est un disque enflé au centre (le bulbe).

Le diamètre de la matière visible est de 90 000 à 100 000 al. Au niveau du Soleil, l'épaisseur de la Galaxie est d'environ 2 000 al. La longueur de la barre centrale a été évaluée à 25 000 al.

Le Soleil tourne autour du centre galactique en 225 millions d'années, à la vitesse de 220 km/s.

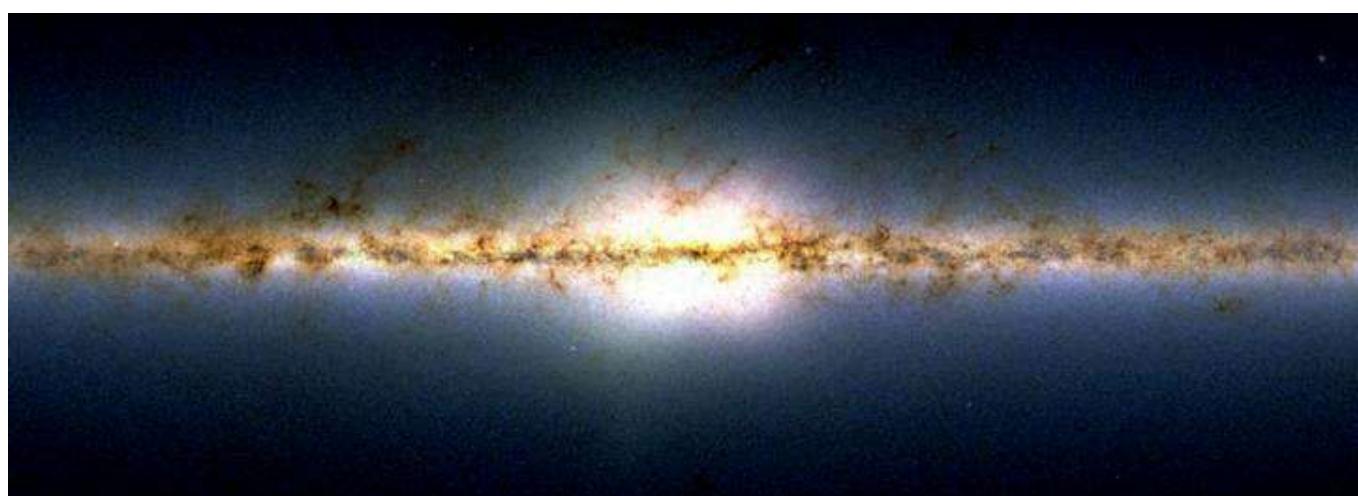


Cette carte représente la Voie Lactée en coordonnées galactiques. La coordonnée de latitude et de longitude galactique zéro pointe vers le centre de la Galaxie.



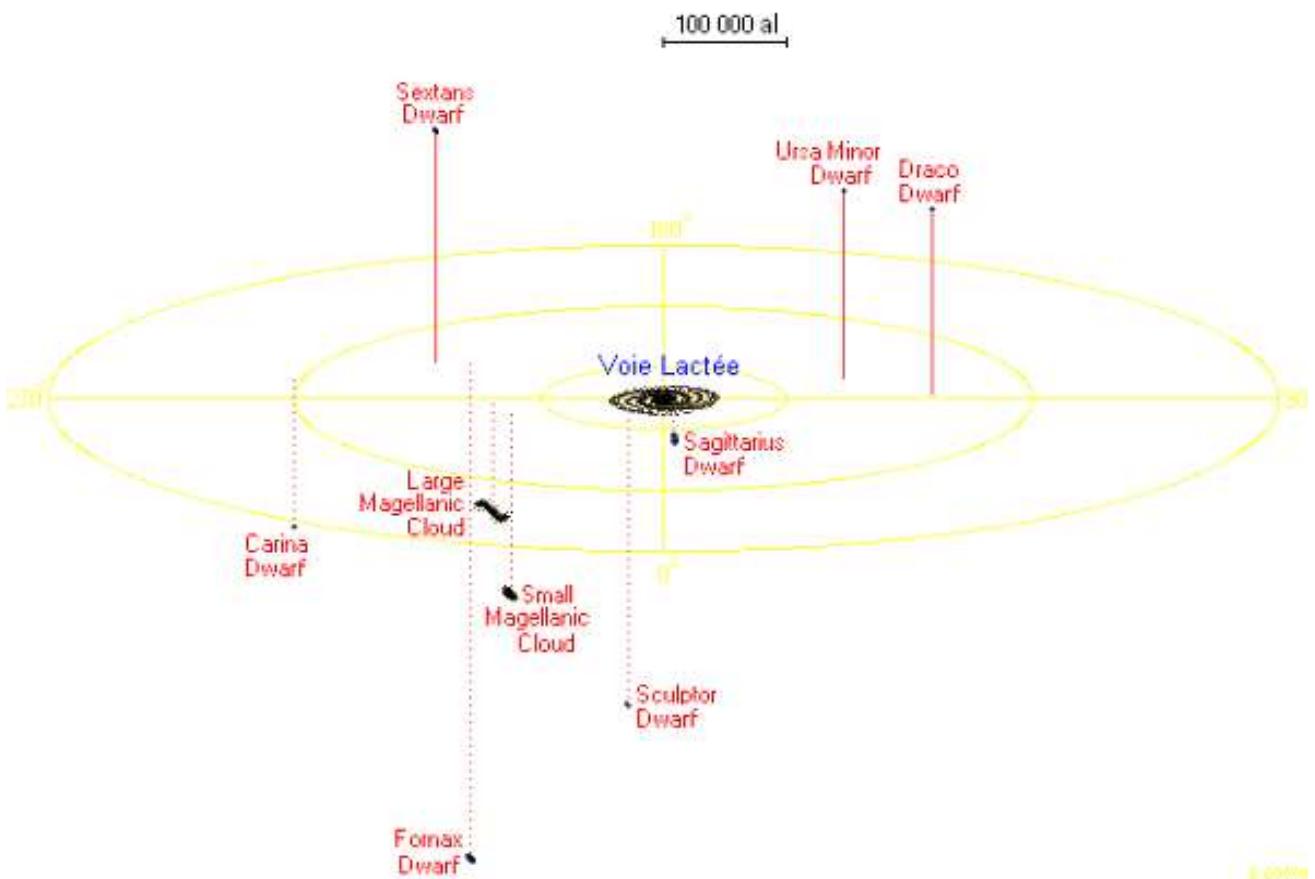
Dans d'excellentes conditions, 9 000 étoiles sont visibles de la Terre. La majorité des étoiles de cette carte est à moins de 1 000 al de nous, et représente seulement 0,1% des étoiles de la Galaxie.

Voici une photographie de la Voie Lactée en Infrarouge. Cette longueur d'onde permet de mieux voir les structures brillantes et les nuages de poussières.



Les galaxies satellites

Notre Voie Lactée est entourée de plusieurs galaxies naines qui orbitent autour. Les plus connues sont celles visibles à l'œil nu de l'hémisphère sud : le grand et le petit nuage de Magellan.



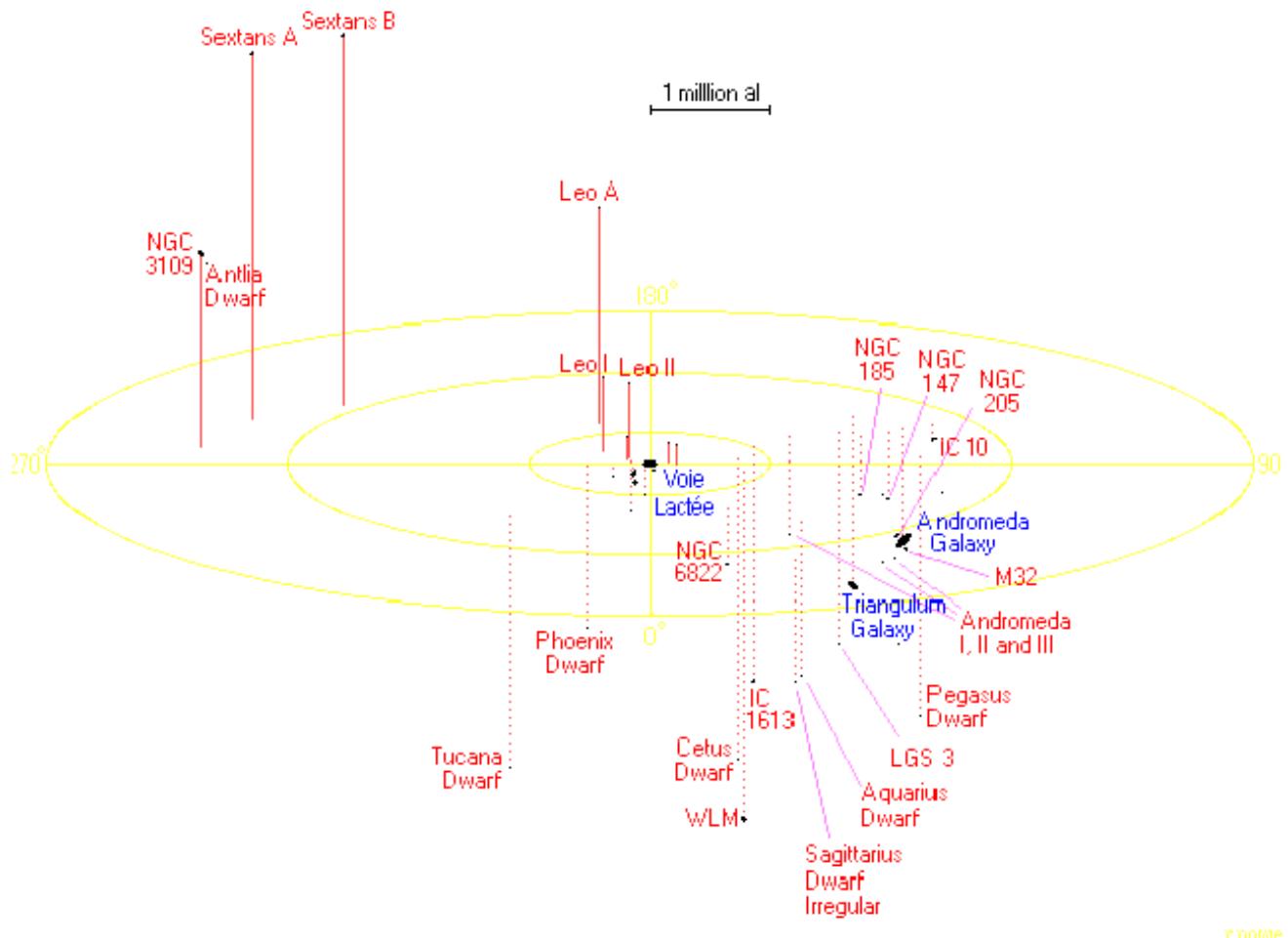
La plus proche est aussi la moins visible, car elle est cachée par le centre de la Galaxie, très dense en matière. Il s'agit de la galaxie naine du Sagittaire, découverte récemment, en 1994, située à 78 000 al, avec un diamètre de 10 000 al. Elle orbite autour de la Voie Lactée en 1 milliard d'années et contient environ 10 millions d'étoiles, ce qui est très peu en comparaison de la Voie Lactée.

Citons également le grand nuage de Magellan, à 170 000 al de nous. Elle contient plusieurs milliards d'étoiles, ce qui en fait la plus grosse des galaxies satellites. Elle contient une région d'intense formation d'étoiles, la nébuleuse de la Tarentule. Une supernova a éclaté en 1987 dans cette naine.

Le petit nuage de Magellan est quant à lui situé à 210 000 al de nous, et également visible à l'œil nu de l'hémisphère sud.

Les galaxies de l'amas local

En élargissant encore notre horizon, nous découvrons l'amas local de galaxies.



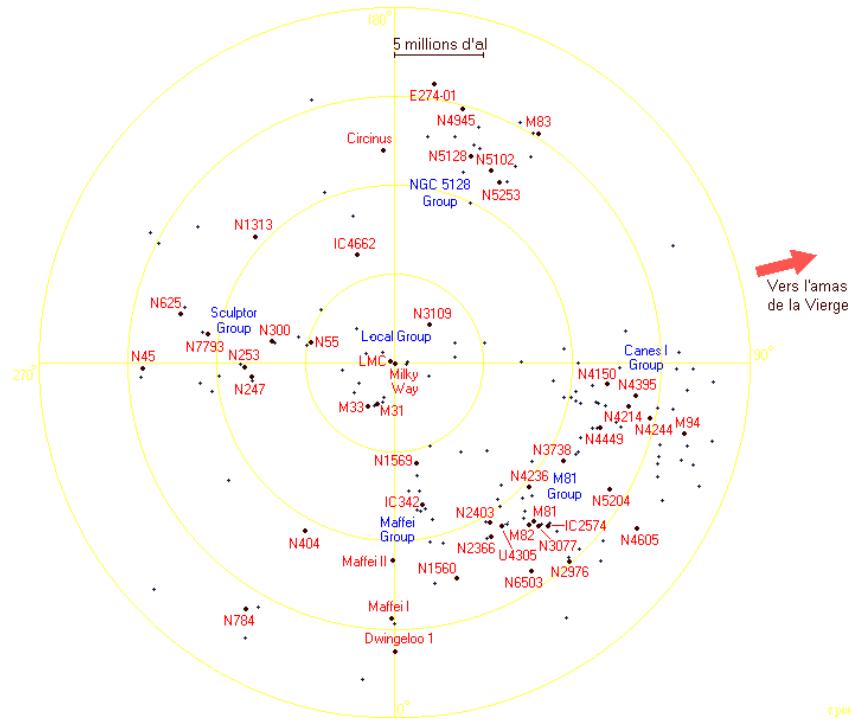
Jusqu'à un rayon de 5 millions d'al, nous comptons 3 grandes galaxies et 36 galaxies naines. Le total des étoiles contenu dans cette sphère de 5 millions d'al de rayon est de 700 milliards.

La Voie Lactée est l'une des 3 grandes galaxies du groupe local, au même titre que la galaxie d'Andromède et la galaxie du triangle.

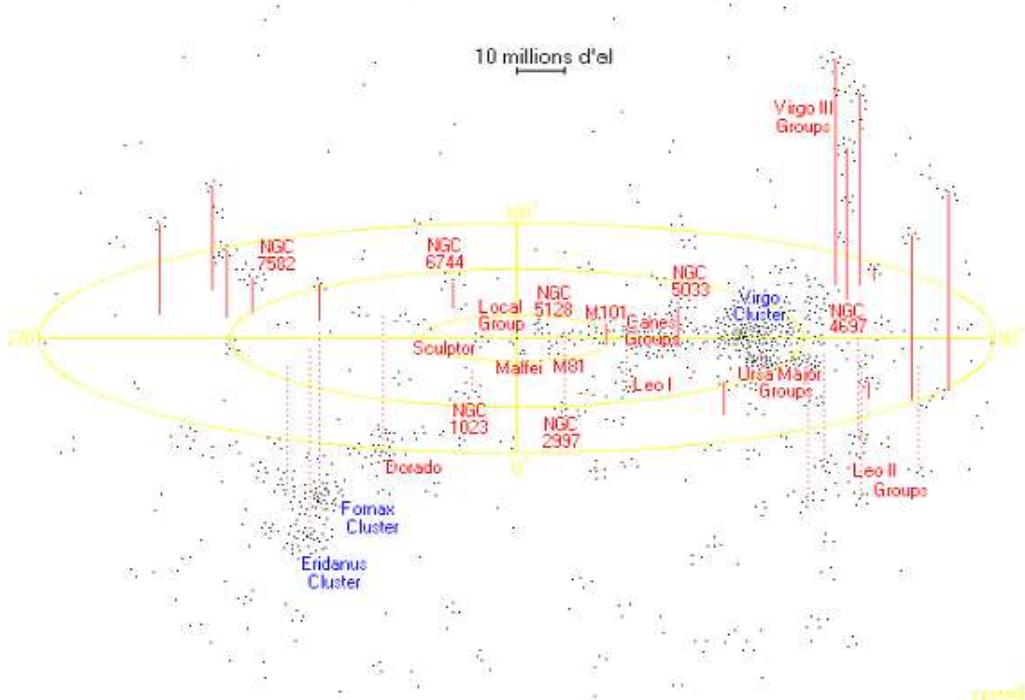
Le super amas de la Vierge

L'amas local possède des voisins. Le plus connu est sans contestation celui de la Vierge, situé à une cinquantaine de millions d'al.

Voici d'abord les amas de galaxies proches du nôtre. On trouve, dans un rayon de 20 millions d'al, l'amas du sculpteur, de la grande ourse et des chiens de chasse, pour les principaux.



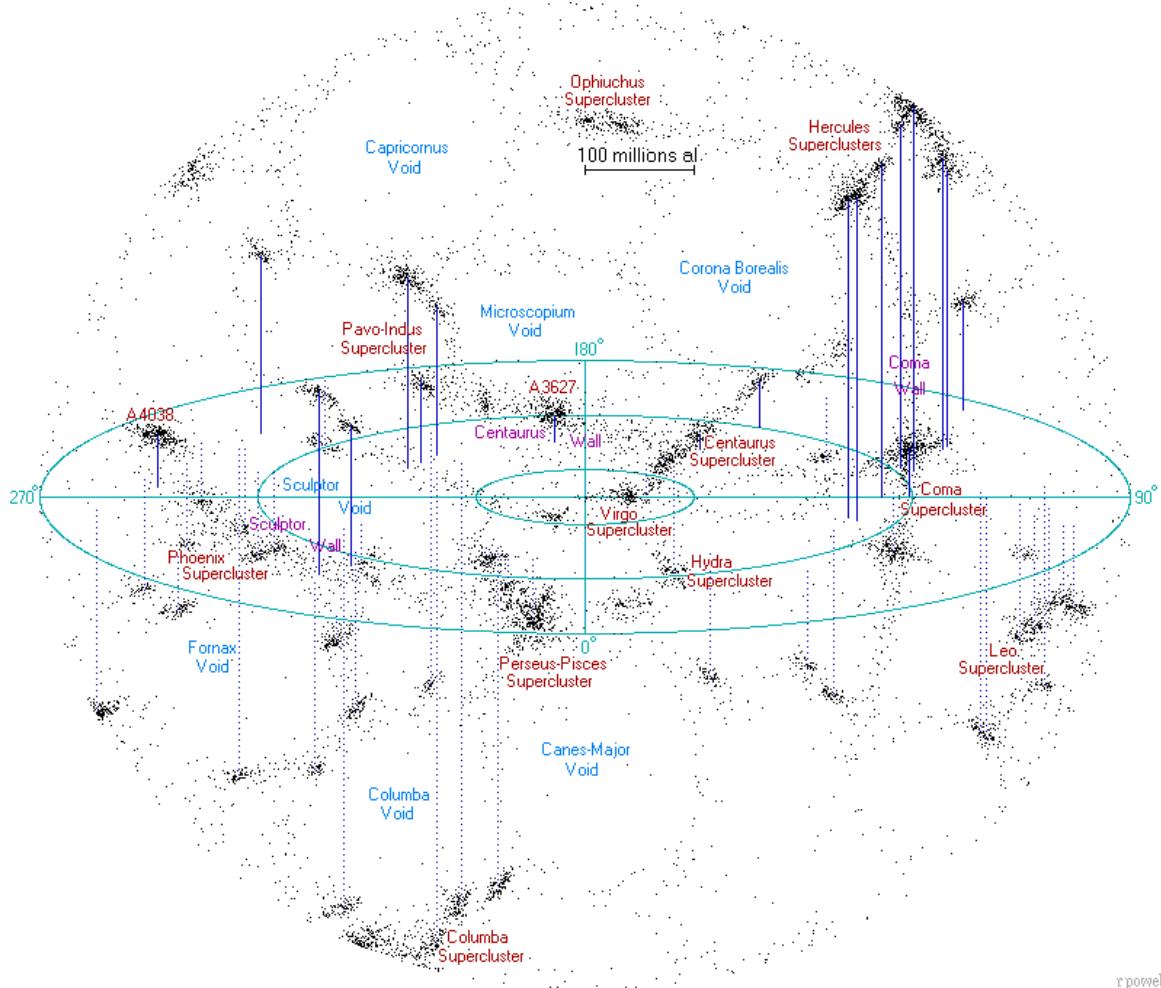
Jusqu'à 100 000 al, apparaissent d'autres amas comme celui de la Vierge, de Fornax ou d'Eridan. A cette distance ; on compte 200 amas de galaxies, totalisant 2 500 grandes galaxies et 25 000 galaxies naines.



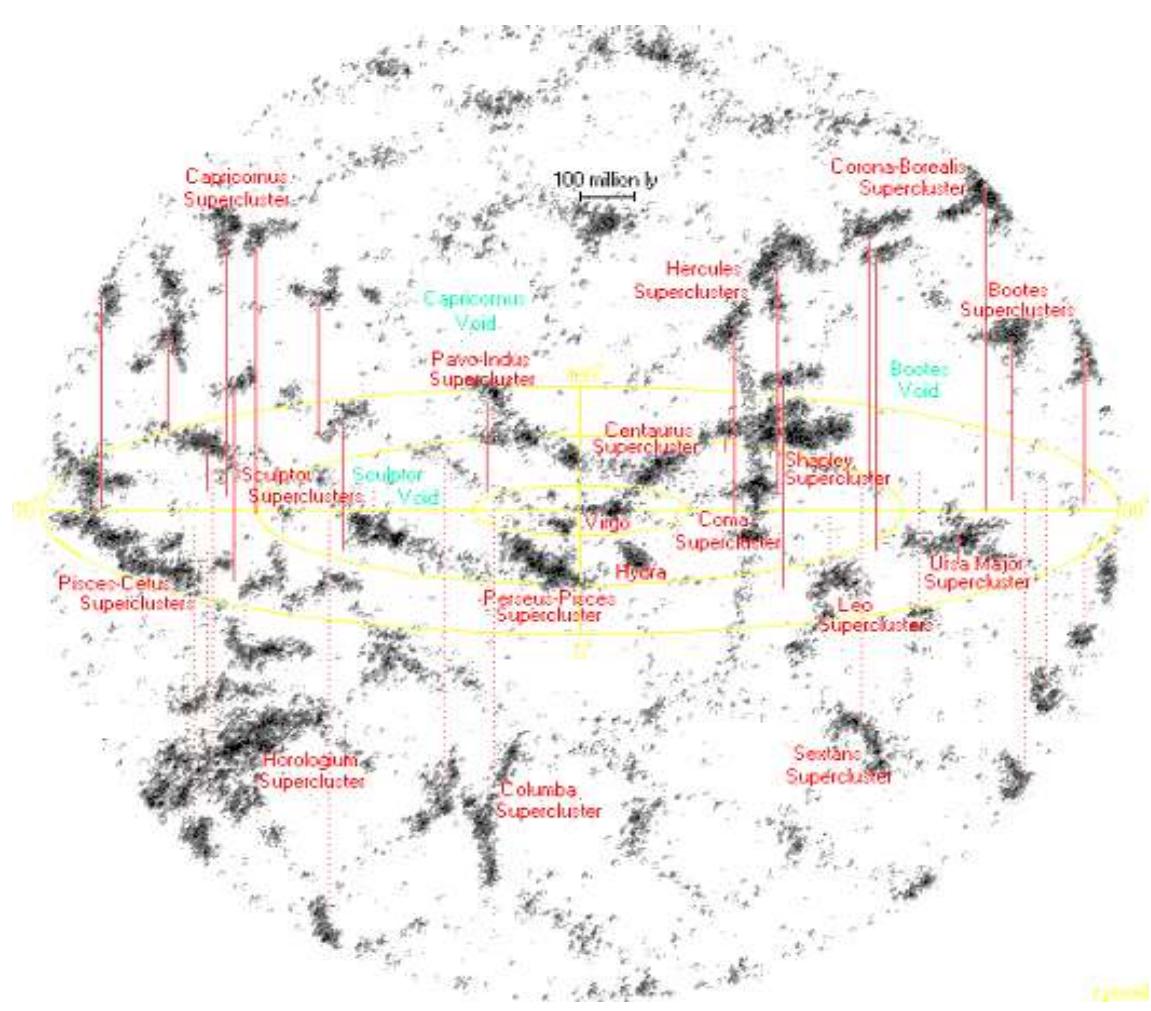
L'ensemble de ces amas est connu sous le nom de super amas de la Vierge. En effet, les amas ont tendance à se regrouper en super amas.

Les superamas voisins

Le superamas de la Vierge possède des voisins. Jusqu'à 500 millions d'années-lumière. On note que les superamas de galaxies forment des « murs », qui entourent de vastes zones sans amas.



A encore plus grande échelle (mais seulement 7 % de l'univers visible), les murs, feuillets et vides apparaissent encore mieux. Le superamas de la Vierge, auquel nous appartenons, semble assez petit.



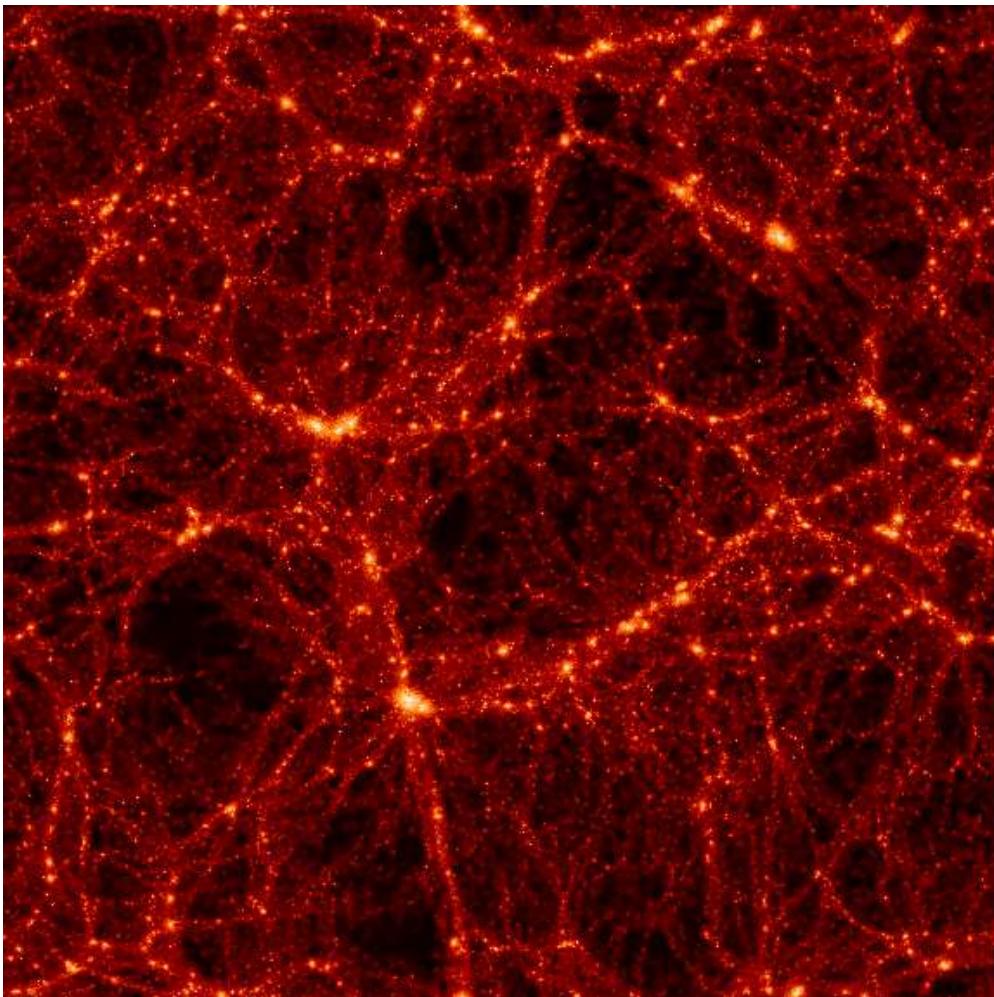
Jusqu'à 1 milliard d'au, on compte :

- 100 superamas
- 240 000 groupes de galaxies
- 3 millions de grandes galaxies
- 30 millions de galaxies naines

L'Univers à grande échelle

En regardant l'Univers à grande échelle, c'est-à-dire jusqu'à 13 milliards d'années, l'Univers observable est une sorte d'éponge, avec des vides entourés de feuillet, murs constitué eux-mêmes de superamas de galaxies, contenant des amas de galaxies, contenant des galaxies, contenant des étoiles...

Des simulations ont révélé des images de ce type :



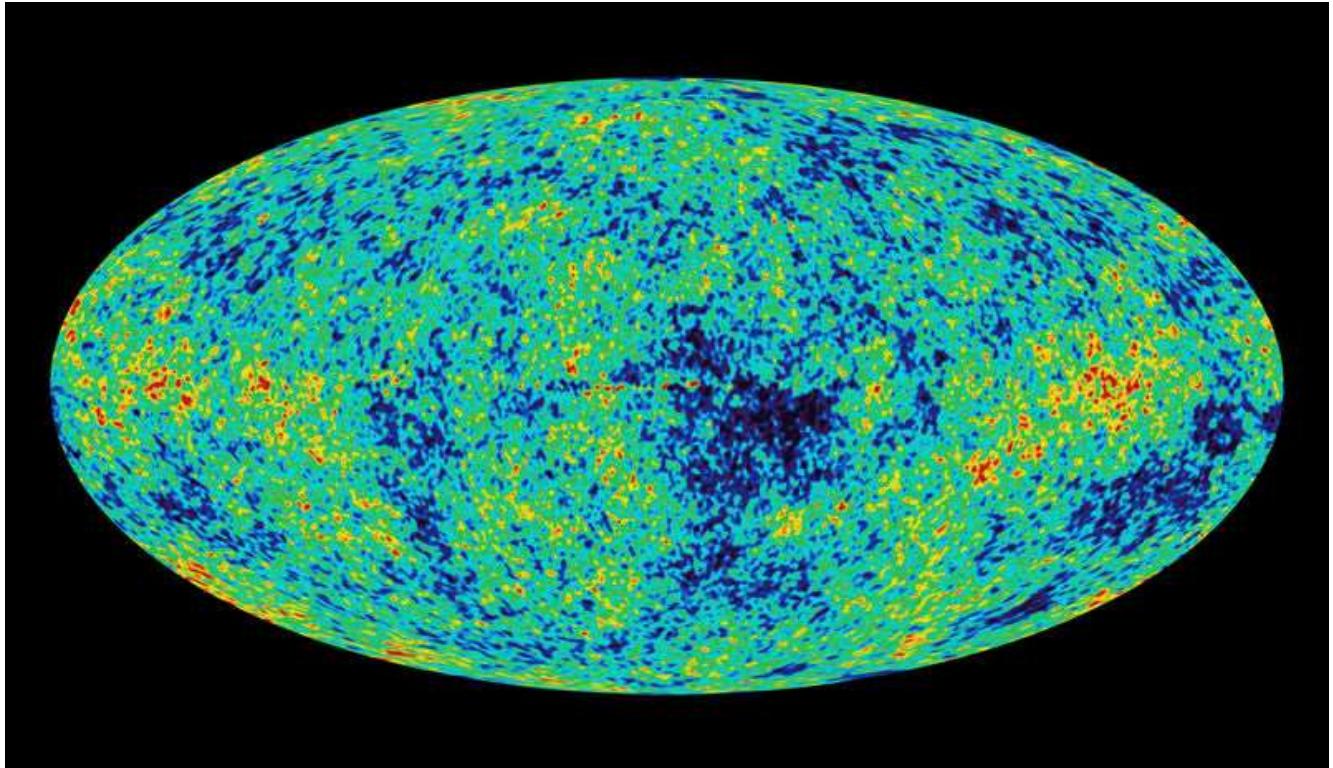
L'Univers est en expansion. Tous ses points s'éloignent les uns des autres. Ce qui veut dire qu'en remontant dans le passé, les superamas et amas de galaxies étaient plus proches qu'actuellement. Aux premiers temps de l'Univers des « grumeaux » se sont formés qui ont donné ces structures que l'on entaperçoit aujourd'hui.

Aussi loin que l'on remonte, les premiers vestiges de la lumière sont « le fond cosmologique ».

Après le Big Bang, l'Univers était opaque. Toute radiation était immédiatement absorbée et réémise par les électrons constituant la soupe primitive. A un moment donné du refroidissement de l'Univers, à environ 380 000 ans d'existence, les électrons ont été capturés par les noyaux d'atomes récemment formés. Faute d'électrons pour arrêter les radiations, la lumière s'est mise à circuler sur de grands espaces. L'univers est devenu transparent. C'est cette lumière primitive que l'on capte aujourd'hui et que s'appelle le fond de rayonnement cosmologique.

Des satellites (Cobe, Plank Surveyor - WMAP) ont cartographié ce rayonnement fossile. Sa longueur d'onde est dans les micro-ondes, et sa température est de 2,7 K.

Ce que les satellites ont révélé, ce sont de petites variations (quelques dix-millièmes) de cette température. La carte ci-dessous montre ces variations de température, en fausses couleurs.



Ces variations infimes de température pourraient bien être ces « grumeaux », prémisses des superamas, amas et galaxies que nous connaissons.

Pour conclure, nous remarquerons que le début de l'exposé faisait état de distances se chiffrant en temps de lumière en minutes, et que la fin parle de milliards d'années.

L'univers est donc cette gigantesque structure où la matière s'est peu à peu organisée en se complexifiant, passant des particules élémentaires aux atomes, aux molécules, puis aux macromolécules, aux cellules et finalement (pour l'instant...) aux êtres vivants complexes comme les mammifères dont nous sommes.