Mesurer la distance des étoiles

de l'Antiquité au XXIe siècle

Jean-Pierre Maillard **(Institut d'Astrophysique de Paris)**
jean-pierre.maillard@iap.fr

En regardant les étoiles dans le ciel,

elles apparaissent toutes lointaines et à la même distance.

Elles forment « la voute céleste »

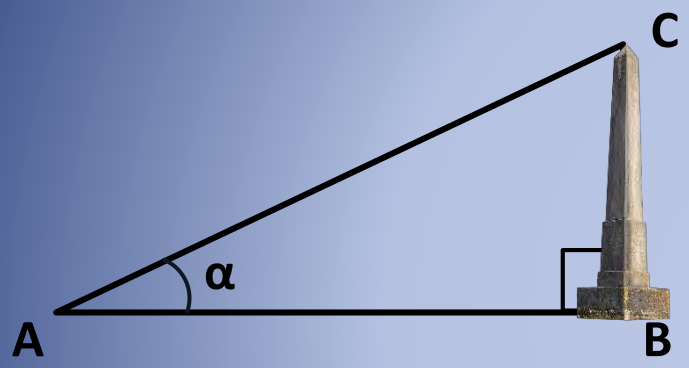
C'est en cherchant à relever le défi de la mesure de la distance des "étoiles" que l'Homme a pris conscience de sa place dans l'Univers et ainsi découvert progressivement la structure du Cosmos

Une quête commencée dès l'Antiquité

et qui se poursuit aujourd'hui

I – Mesure de la distance du Soleil, de la Lune et des planètes

La mesure des distances astronomiques repose sur les propriétés géométriques du triangle rectangle, établies dès l'Antiquité.

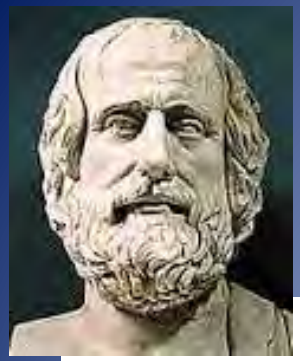


AB = base du triangle rectangle en B
α = angle entre les côtés AB et AC
Connaissant AB et α → mesure de BC

$$\boxed{BC = AB \times \tan(\alpha)}$$

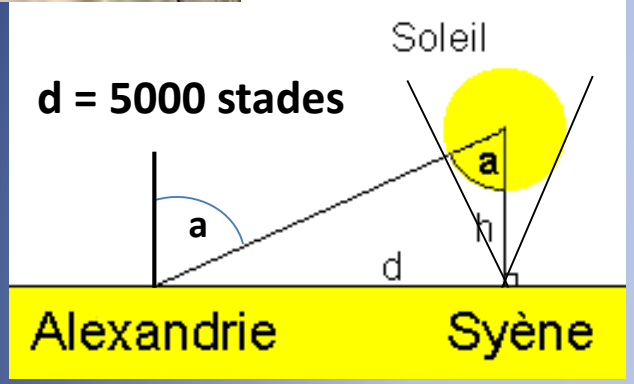
*Application reprise à partir de **1533** pour mesurer la distance de deux points sur Terre **par triangulation = Géodésie***

Dans l'Antiquité, mesure de la hauteur des monuments (obélisque); **première estimation de la distance du Soleil** (V^{e} av. J-C)



430 av. J-C : première estimation de la distance Terre – Soleil

par **Anaxagore** (500, 428 av. J-C)



Élève du mathématicien Thalès, il note qu'à midi au solstice d'été le Soleil est au zénith à **Syène** (Assouan), à **7⁰** du zénith (angle **a**) à **Alexandrie** →

Dans le triangle rectangle Alexandrie, Syène, Soleil :

Syène – Alexandrie = *5000 stades* → Syène – Soleil = ***40720 stades***

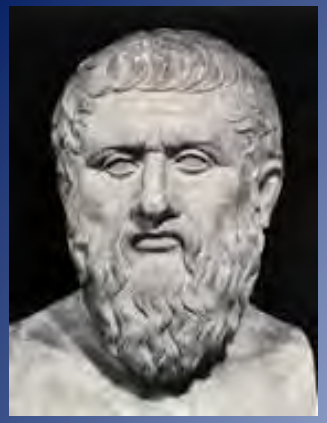
Pour d = 800 km → **h ≈ 6414 km**

Avec le **diamètre angulaire** du Soleil (0,5°) en déduit :

le diamètre du Soleil ≈ 56 km

Résultats faux malgré des mesures correctes

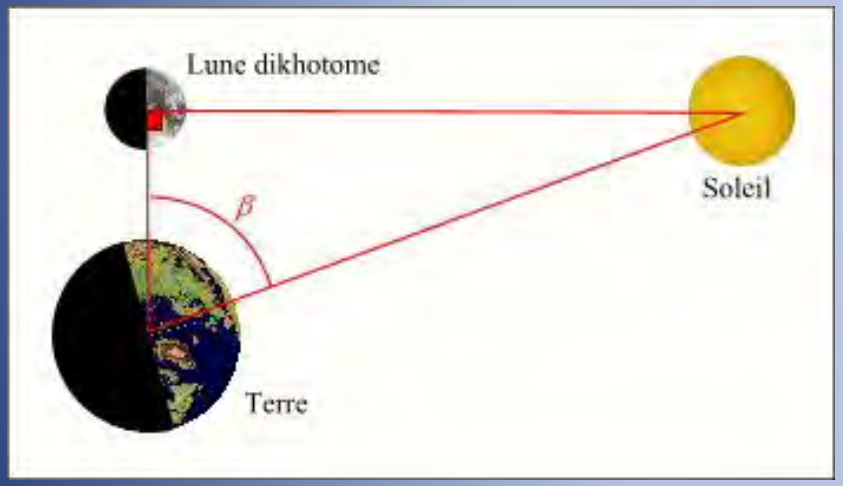
car la Terre est alors supposée plate : un continent flottant sur un vaste océan.



~ 290 av. J-C : autre mesure de la distance Terre – Soleil

par **Aristarque de Samos** (310, 230 av. J-C)

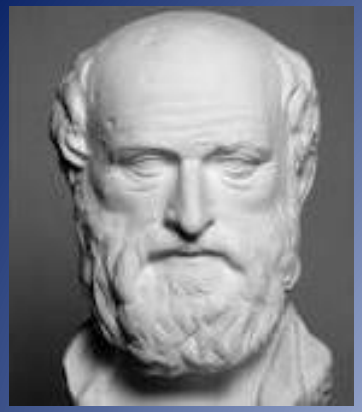
Il analyse qu'à la Lune au 1e quartier, Terre – Lune – Soleil forment un triangle rectangle. Donc, en estimant l'angle β il peut déduire le **rapport des distances Terre – Lune / Terre – Soleil.**



Mesure imprécise de β qui vaut 87° et distance Terre – Lune supposée → **sous-estimation d'un facteur ≈20 de la distance Terre - Soleil**

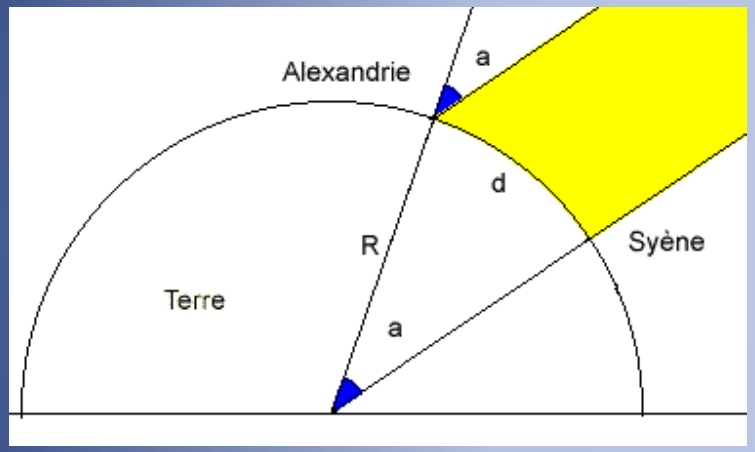
Ces premières estimations de distance astronomique sont erronées, mais la philosophie grecque soumet les astres à des mesures, dépassant leur divinisation pour aborder la question du comment fonctionne le cosmos =

Début de la science



~ 205 av. J-C : première mesure de la circonférence de la Terre

par **Eratosthène** (275, 195 av. J-C)

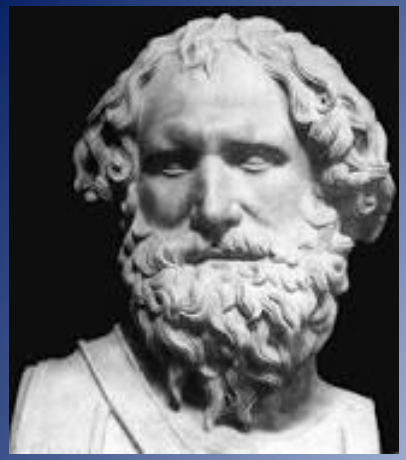


Directeur de la bibliothèque d'Alexandrie, il reprend la méthode d'**Anaxagore.** Avec la sphéricité de la Terre admise au IVe s., il assimile correctement la distance Alexandrie – Syène à un arc de la circonférence de la Terre (les deux cités sur le Nil à peu près sur le même méridien) :

Mesure de la circonférence de la Terre : *5000x360°/7°* ≈ **257 143 stades**

<u>Note</u> : traduction moderne de la mesure liée à la valeur du ''stade égyptien'' = objet de débat. Si 1 stade = 160 m → circonférence de la Terre = 41 143 km !

*Remesurée par l'astronome grec **Ptolémée** (IIe s. ap. J-C) et un astronome arabe (827) = longueur terrestre en ''mille romain'' correspondant à un arc de 1° sur le ciel (repéré par les étoiles) → un globe de ~30 000 km de circonférence. Valeur qui sera utilisée par **Christophe Colomb** (1492) comme argument en faveur de son entreprise maritime !*



127 av. J-C : diamètre et distance de la Lune

par l'astronome grec **Hipparcos** (190, 120 av. J-C)

Avec l'observation d'une éclipse de Lune, il détermine le rapport des diamètres Terre / Lune ≈ 3,6 *(valeur exacte 3,7)* → le diamètre de la Lune à partir de celui de la Terre estimé par **Eratosthène**.

Combiné avec la mesure du diamètre angulaire de la Lune (0,5 ^{0}) il estime **la distance Terre – Lune,** entre **59 et 67 rayons de la Terre**, soit :

entre 375 900 et 426 900 km

(valeur exacte de la distance moyenne 384 000 km)

Malgré une valeur réaliste de la distance Terre – Lune, le rapport Terre – Lune / Terre – Soleil estimé en ~290 av. J-C par Aristarque n'est pas corrigé → **la distance de la Terre au Soleil restera sous-évaluée d'un facteur ≈ 20 pendant 18 siècles !**

Affaire de distance : *la reconnaissance des planètes*

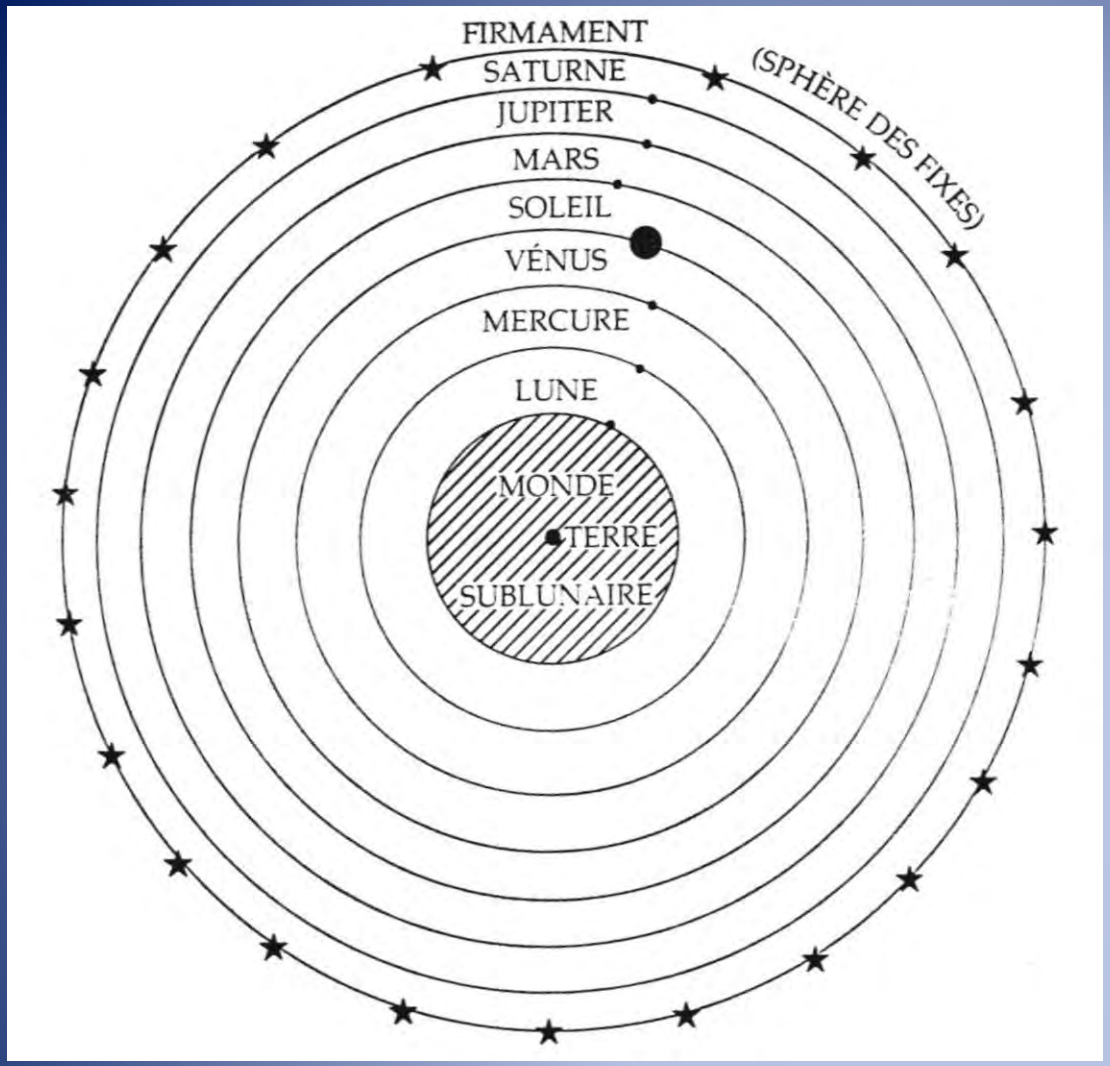
- Observations astronomiques attestées en Mésopotamie (actuel Irak) à partir ~2500 ans av. J.C. : les ***astrologues*** relèvent :
  - les phases de la Lune, base de l'établissement du calendrier,
  - les phénomènes célestes exceptionnels : ***éclipses de Lune et de Soleil***,
  - le déplacement d'astres par rapport aux étoiles groupées en ***constellations*** immuables → **astres en mouvement** ou ***errants = planète*** (en grec).

Ces phénomènes sont interprétés par les astrologues comme des **présages** pour conseiller le roi avant de se lancer dans une conquête. Parmi les ***astres errants*** on distingue ceux qui reviennent régulièrement :

- Désignation de ***7 « astres errants »*** périodiques (noms latins) **:**

Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne

Contient empiriquement l'idée que ces *astres* sont plus proches de la Terre que les étoiles et d'autant plus éloignés que leur période orbitale (retour dans la même constellation) est longue → **premier modèle de l'Univers**



Le modèle géocentrique d'Aristote

(384, 322 av. J-C)

Sera complété par l'astronome gréco-romain **Ptolémée** (~100 - ~170) en introduisant pour le mouvement de chaque planète des cercles appelés *épicycles* afin de mieux rendre compte du mouvement observé.

Sept cercles concentriques (les orbites des *planètes*) avec au centre la Terre, enveloppés par la *sphère des fixes* qui porte les étoiles, donc toutes à la même distance. Le cercle et la sphère sont les formes de la perfection du cosmos.

L'UNIVERS MÉDIÉVAL

Basé sur le modèle antique

7 planètes :

sur des cercles parfaits, entourées par les étoiles fixées sur une sphère, image d'une

Harmonie Universelle

7 comme :

- les **7 jours** de la semaine
- les **7 jours** de la Création
- les **7 dons** de l'Esprit Saint
- les **7 notes** de musique

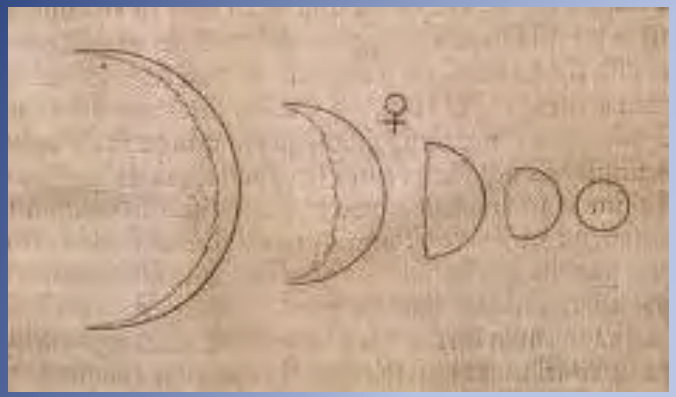
Complété par **l'Empyrée**, la demeure des saints, des anges et de **Dieu**

1609 : Le grand bouleversement

Galilée commence à Padoue ses observations astronomiques avec la lunette qu'il s'est construit. Ce que lui permet de voir ce nouvel instrument conforte le modèle du moine polonais Copernic publié en 1543 où le Soleil est placé au centre et non plus la Terre, mise à sa vraie place de planète.

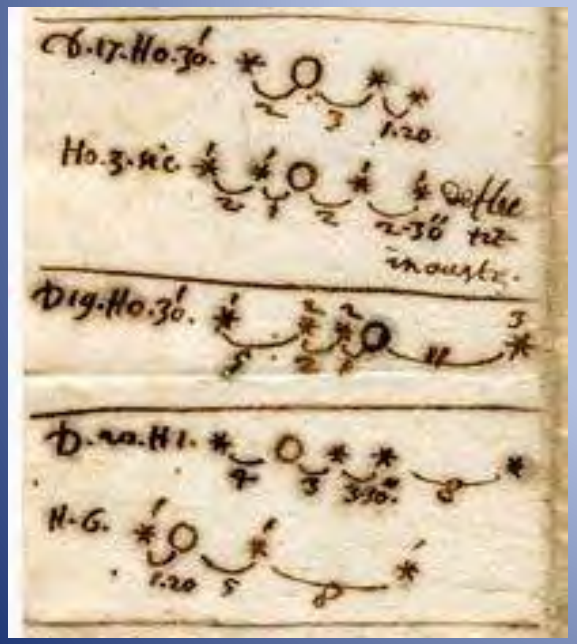
Galilée (1564 – 1642) présente sa lunette au doge de Venise

Deux des observations faites par Galilée



Dessin des phases de Vénus par Galilée

Les phases et le changement de diamètre de Vénus au long de son orbite que Galilée découvre grâce à sa lunette ne peuvent s'expliquer que si Vénus tourne autour du Soleil sur une orbite comprise entre le Soleil et la Terre.



Extrait de son Journal d'observation entre le 17 et le 20 janvier 1611. Découverte de quatre lunes autour de Jupiter avec leurs changements de position d'une nuit à la suivante

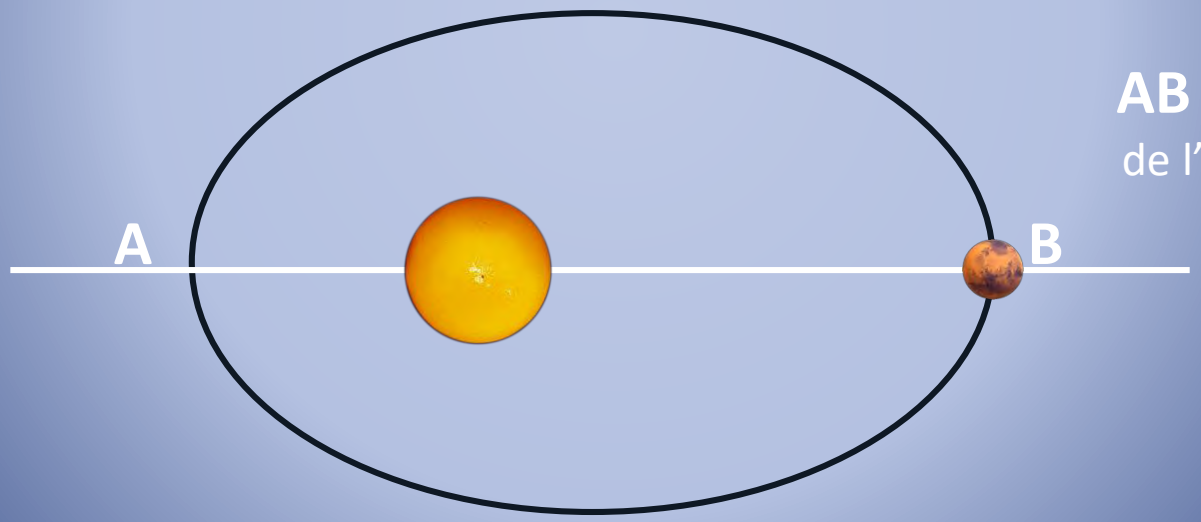
Galilée réalise que Jupiter et ses quatre lunes fonctionnent comme le Système solaire décrit par Copernic : au centre le Soleil et ses six planètes connues alors dont la Terre, en orbite autour.

1609 : KEPLER (1571 – 1630)

et ses lois de la ``mécanique céleste´´

Tandis que Galilée fait ses découvertes avec sa lunette, à partir des observations méticuleuses du mouvement de **Mars** de l'astronome danois Tycho Brahe (1546 – 1601), l'allemand **Johannes Kepler** énonce ses deux premières lois du mouvement des planètes dans le cadre du **modèle de Copernic** :

1. ***Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil est un foyer***



AB = grand axe de l'ellipse = 2 *r*

2. ***La vitesse d'une planète sur son orbite n'est pas constante.*** Vitesse maximum en A (la planète est au plus près du **Soleil**) et minimum en B.

1619 : la troisième loi de Kepler

Dans son ouvrage « *L'harmonie du monde »,* autour de la vision d'une harmonie du mouvement des planètes, publie la loi qui relie la période orbitale ***T*** d'une planète à la dimension de son demi – grand axe ***r*** par :

$$T^2/r^3 = constante$$

Progrès *: cette loi détermine le bon rapport des* ***distances*** *des planètes au Soleil, à partir de leur* ***période orbitale T*** *:*

$$(T_1/T_2)^2 = (r_1/r_2)^3$$

Ex. : T_{Terre} = 1 année, $T_{Jupiter}$ = 11,86 années → r_{Jup} = **5,2** fois la distance Terre - Soleil

Mais pour connaitre leurs ***distances vraies*** *au Soleil. Il faut pour cela mesurer avec précision la distance au moins d'une planète.*

Sera entrepris plus de 50 ans plus tard dans le tout nouvel Observatoire construit à Paris par Louis XIV

1686 : Isaac Newton donnera le sens physique des lois de Kepler avec la loi universelle de la gravitation

1672 : nouvelle mesure de la distance Terre – Soleil

Jean Dominique Cassini (1625 – 1712), premier directeur de l'Observatoire de Paris.

*Par **Cassini**, Picard et Richer à l'Observatoire de Paris juste terminé*

1) Mesures aux mêmes dates de la position dans le ciel de **Mars** à l'opposition (au plus proche de la Terre) par Cassini et Picard depuis **Paris** et par Richer depuis **Cayenne**. Donnent l'angle au sommet du *triangle isocèle Paris – Mars – Cayenne*. Connaissant la longueur de la distance Paris - Cayenne → **distance Terre – Mars.**
2) Par la 3e loi de Kepler : calcul du rapport des distances Terre – Soleil/Terre – Mars → **distance Terre – Soleil :**

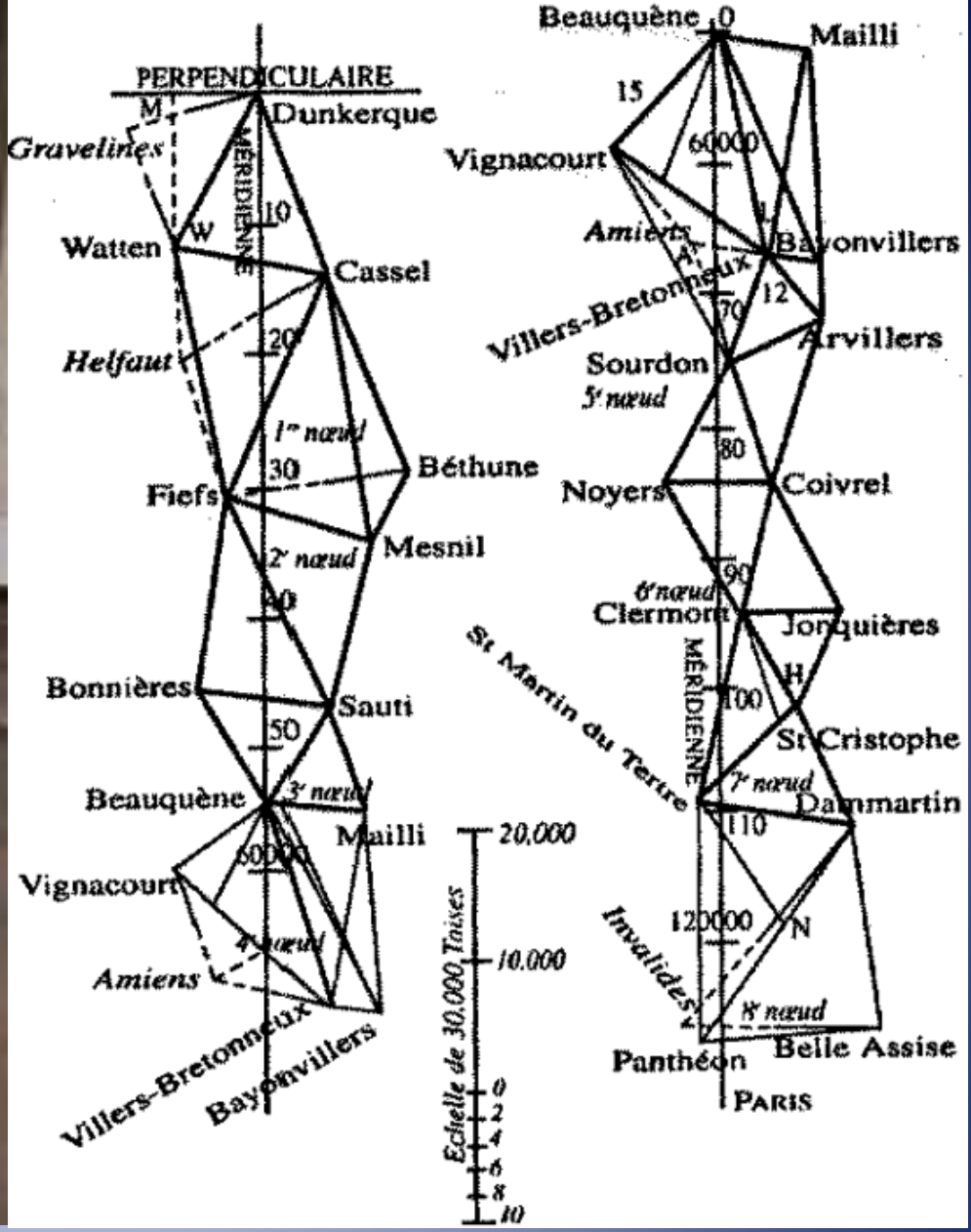
21 600 R_{Terre} ≈ 135 millions km

Valeur moyenne qui parait assez bonne mais large incertitude car « l'angle est mesuré avec beaucoup de peine & d'ambiguïté » (Cassini)

Problème de la mesure de la circonférence de la Terre

- *Anciennes mesures (Eratosthène, Ptolémée) basées sur une Terre parfaitement sphérique. Question au 17e – 18e s. de la **''figure de la Terre''** : aplatie aux pôles par sa rotation selon Newton (**1687**), allongée pour Cassini II d'après sa mesure de la "méridienne de France" (**1718**) par la longueur d'un arc de méridien de 1° vers Dunkerque et vers Collioure.*
- *Même principe de mesure utilisé par une expédition de Maupertuis en Laponie (**1736 – 1737**) et La Condamine au Pérou → confirme **Terre aplatie aux pôles**.*
- *À la Révolution, mesure précise **(1792 à 1799)** de la longueur d'un arc du méridien de Paris entre Dunkerque et Barcelone par Delambre et Méchain pour la **définition du mètre** basée sur la longueur de la circonférence de la Terre = **dix-millionième partie du quart du méridien terrestre**.*

Salle Cassini à l'Observatoire de Paris. Au sol, le tracé du méridien



Triangulation du méridien de Paris. Portion de Dunkerque à Paris (1792 à 1799)

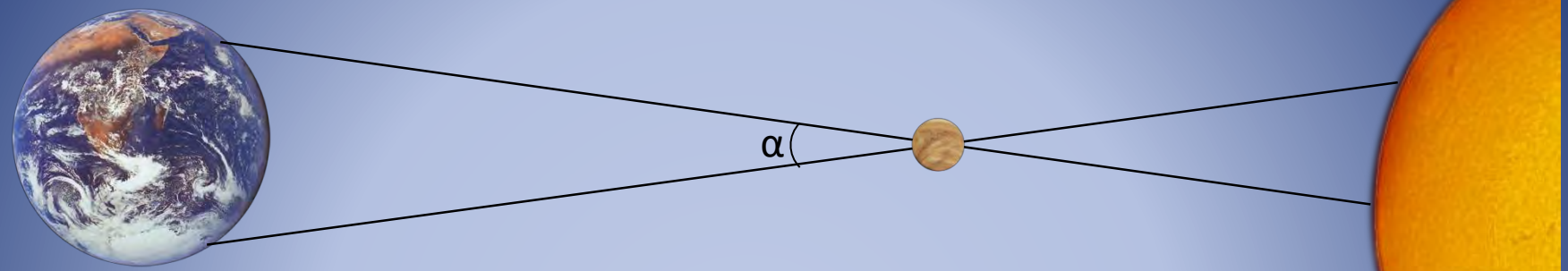
Autre méthode pour mesurer la distance Terre - Soleil : *le passage de Vénus devant le Soleil*

Vues depuis la Terre, les planètes internes **Mercure** et **Vénus** passent devant le Soleil à des dates prévisibles **13 à 14 fois** par siècle pour Mercure, **2 fois** pour Vénus. Grâce aux lunettes astronomiques inventées au début du 17e s. première observation en **1631** du passage de Mercure et en **1639** de celui de Vénus.

A partir de l'observation du passage de Mercure en 1677 l'astronome anglais Edmund Halley (1656 – 1742) imagine une nouvelle méthode basée sur ce type de phénomène pour améliorer la mesure de la distance Terre – Soleil

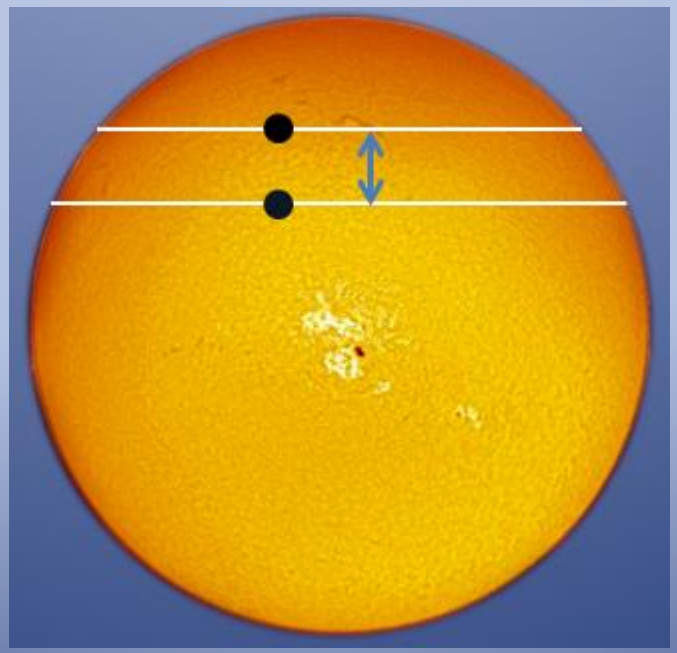
*Images de Vénus devant le Soleil lors du passage du 5 – 6 juin 2012. Prochain : **11 déc. 2117***
Derniers passages de Mercure : 9 mai 2016 , 11 nov. 2019. Prochain : 13 nov. 2032

Méthode du passage de Vénus pour mesurer la distance Terre - Soleil



Halley recommande le passage de Vénus, plus facile à observer que celui de Mercure, car la tache est plus grosse.

Par l'observation du passage de Vénus de deux points sur Terre, éloignés en latitude, mesure de l'angle α en comparant la durée du passage de la planète devant le Soleil depuis les deux sites.



1) distance connue entre les deux points sur Terre et angle α → ***distance Terre - Vénus***

2) Vénus - Soleil/Terre - Vénus par application de la 3e loi de Kepler → ***distance Vénus - Soleil***

Les passages de Vénus au 18e et 19e s.

Motivent des campagnes internationales, françaises (Académie des Sciences), anglaises, russes, autrichiennes … en Norvège, Sibérie, Tahiti, Manille, Pondichéry, … pour les passages de **1761** puis **1769**.

Avec les observations de 1769 l'astronome **Jérôme de Lalande** (1732 – 1807) publie en 1771 une valeur de la distance Terre – Soleil comprise entre **152,4 et 153,8 millions de km**

Nette amélioration par rapport aux précédentes mesures

Auteur aussi de « L'Astronomie des dames » (1786). Nommé en 1795 par les révolutionnaires directeur de l'Observatoire de Paris.

Nouvelles campagnes pour les passages de **1874** (6 expéditions françaises) et **1882** (10 expéditions françaises). Meilleurs résultats publiés en 1890 par l'américain **Simon Newcomb** (1835 – 1909) :

149,665 millions de km

Importance de la méthode au 18e s. et au 19e s.

Représentation allégorique du passage de Vénus devant le char du Soleil au plafond de la Salle du Conseil de l'Observatoire de Paris (1886).

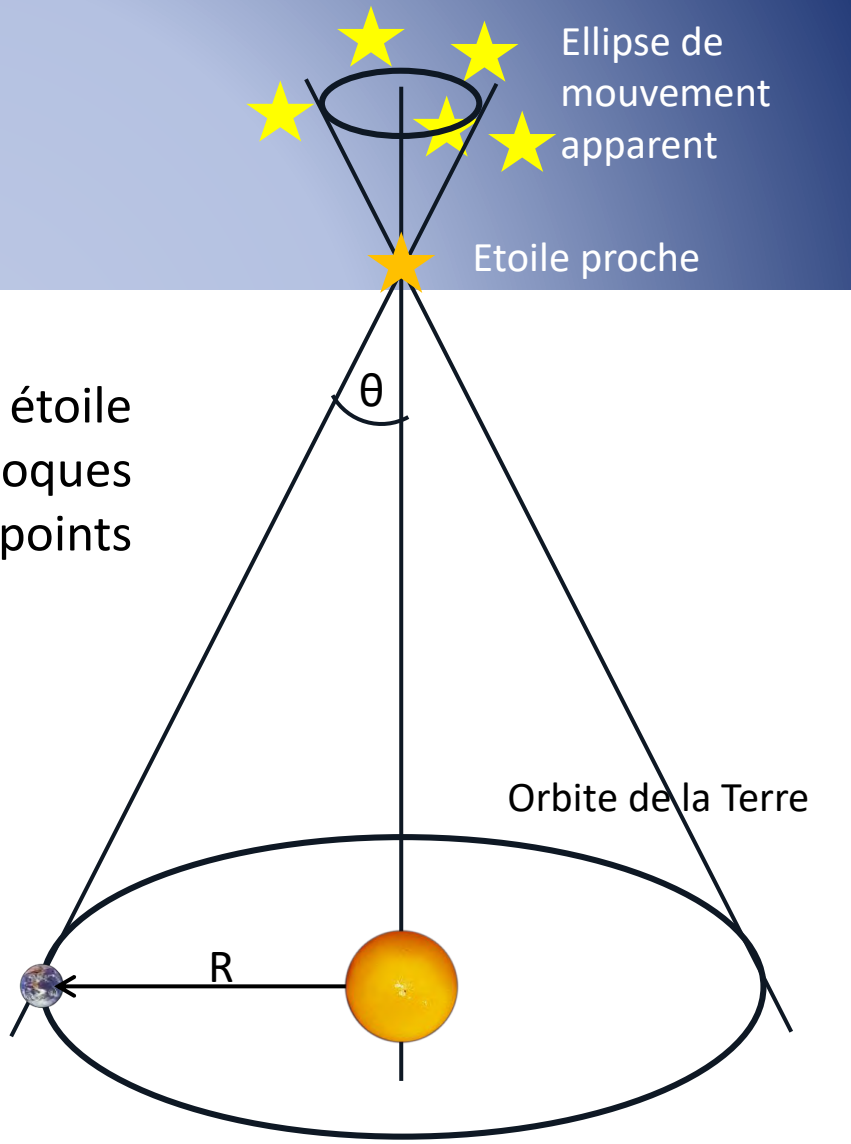
Ainsi jusqu'à la fin du 18e s. "l'Univers" reste limité au Système solaire. Va changer avec enfin la mesure de la distance des étoiles.

II - Mesurer la distance des étoiles

<u>Affirmation jusqu'au 18e s.</u> : **les étoiles toutes identiques** = paraissent + ou – faibles par leur distance. **Les étoiles brillantes = les plus proches**. Publication en 1806 par G. Piazzi (1746 – 1826) des déplacements annuels = *mouvements propres* de 225 étoiles, mesurables seulement sur des étoiles assez proches. Or celui de l'étoile double peu brillante **61 Cygni** est le plus grand → **remise en question de cette affirmation** et établissement de la **méthode dite des parallaxes** pour mesurer la distance des étoiles.

Mouvement apparent d'une étoile vu depuis la Terre = combinaison de son *mouvement propre* et du mouvement de *parallaxe annuelle* dû à la révolution de la Terre autour du Soleil.

La méthode des ``parallaxes´´



Principe : repérage précis de la position d'une étoile proche par rapport au fond d'étoiles, à deux époques séparées de 6 mois = depuis deux points diamétralement opposés de l'orbite de la Terre.

Mesure de **l'ellipse de mouvement apparent** (sa forme dépend de la position de l'étoile).

Angle θ = *parallaxe annuelle.*

Connaissant R le rayon de l'orbite de la Terre

→ ***distance de l'étoile au Soleil = ϑ R***

1838 : première mesure de la distance d'une étoile

par **Friedrich Bessel** (1784 – 1846) : distance de l'étoile double *61 Cygni* par la méthode des parallaxes, **après 2 ans d'observation** !

parallaxe annuelle = ***0,3136 ± 0.040 seconde d'arc***

Angle égal à une pièce de 1€ à 15 km !

Demande une autre unité

→ **distance de 100 000 milliards de km**

: l'année-lumière (a.l.) ≈ 9467 milliards de km → ***10,30 a.l.***

Distance vraie de 61 Cygni = ***107 473 milliards de km ≡ 11,36 a.l.***

Comparaison avec le Système solaire en temps-lumière :

Distance Terre – Soleil ≈ ***150 millions de km ≡ 8 minutes 19 secondes***

Rayon de l'orbite d'Uranus ≈ ***2 870 millions de km ≡ 2 heures 39 minutes***

Les distances d'autres étoiles désormais mesurées par cette méthode :

première prise de conscience des immenses distances des étoiles comparées aux dimensions du Système solaire

Mesure de la distance des étoiles par les parallaxes depuis le sol : *difficultés et limites*

Applicable à des étoiles :

- observables d'un même site à 6 mois d'écart ; idéalement *circumpolaires.*
- assez proches pour que l'angle de parallaxe soit *mesurable.*
- mesure nécessaire aussi du *mouvement propre* pour la correction des *parallaxes.*

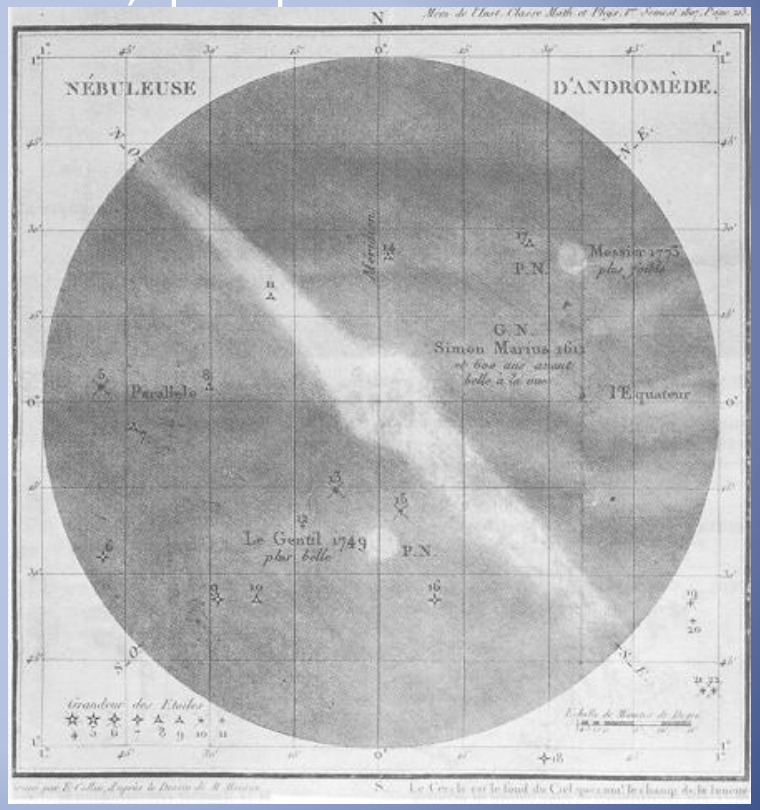
Étalement des images par la turbulence atmosphérique et flexion des instruments →

Précision au mieux ± 0,04''. Jusque dans les années 90 distances max atteintes : ≈ 65 a.l. et ≈ 1000 étoiles. Prolongement par comparaison de la brillance B_p d'une étoile de distance D_p connue par parallaxe à la brillance B_l d'une **étoile de même type** à distance inconnue D_l par $B_l / B_p = (D_p / D_l)^2$

III - Autre question de distance : *celle des "nébuleuses"*

Grâce au progrès des lunettes astronomiques, **Charles Messier** (1730 – 1817) repère dans le ciel des ***sources diffuses*** de nature inconnue**.** Il publie en **1781** un catalogue de 103 sources, porté plus tard à 110, qu'il qualifie de ***nébuleuses***.

Portrait de Charles Messier (1771)



Dessin par Charles Messier de la "nébuleuse d'Andromède" (car située dans la constellation d'Andromède)

Cette ''nébuleuse'' est ce que l'on nomme une **GALAXIE**, voisine de la **VOIE LACTÉE**

Cette identification a été possible : **en estimant sa distance, ce qui a demandé une nouvelle méthode de mesure !**

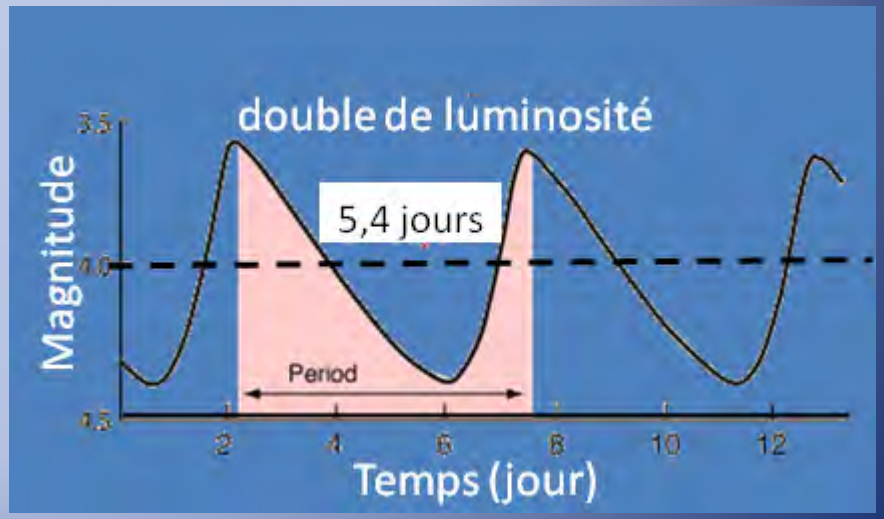
Henrietta Swan Leavitt
1868-1921

Mesure de distances par une relation entre période et luminosité des étoiles variables dites *Céphéides*

Par l'analyse de 300 plaques photographiques, prises sur plusieurs années, des deux "Nuages de Magellan" **Henrietta Leavitt** à l'Observatoire de Harvard repère 1777 étoiles *variables* = dont l'éclat varie au cours du temps. Elle publie la liste en **1908**.

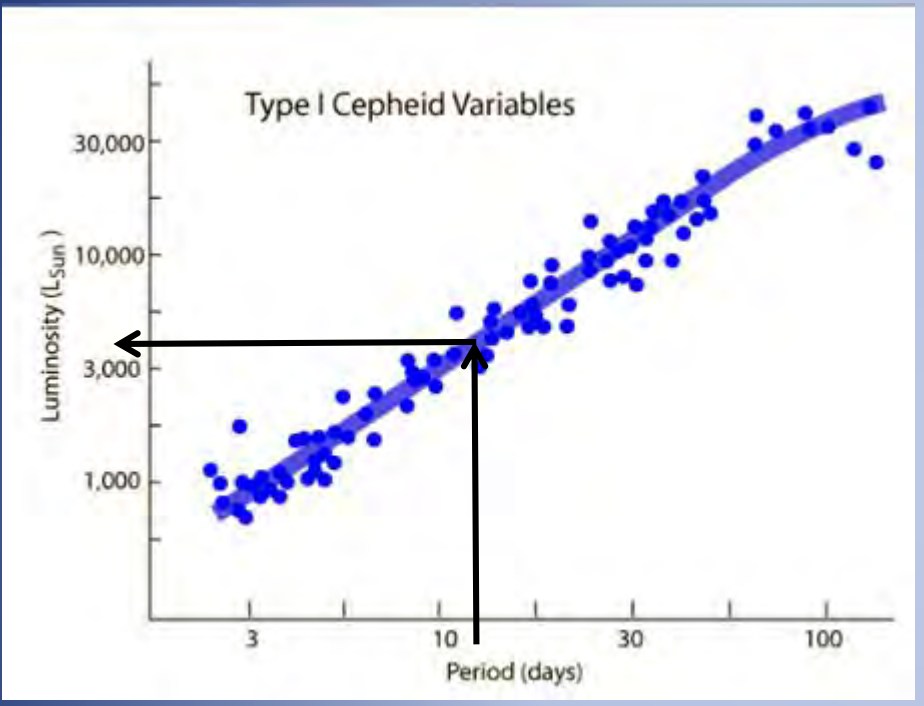
Note celles pour lesquelles elle peut mesurer une **période de pulsation** : « *les plus brillantes ont les périodes les plus longues* » → Relation établie dans la publication en **1912** des périodes et brillances moyennes de 25 de ces étoiles qu'elle nomme ***Céphéides.***

Certaines ont des pulsations régulières d'éclat entre 1 et plusieurs jours : prototype l'étoile **δ Céphée**



Variation de brillance de δ Céphée

Utilisation des Céphéides comme étalon de mesure des distances cosmiques



Les Céphéides identifiées par H. Leavitt **toutes à même distance de la Terre =** appartiennent à un amas d'étoiles, mais dont la distance n'est pas connue. Nécessité de **construire la relation Période – Luminosité avec des Céphéides de distances connues par la méthode des parallaxes.**

1. <u>Construction de la relation calibrée</u> : Céphéides de notre Galaxie. Correction de leur *brillance apparente* B_{app} en *brillance absolue* B_{abs} = à une distance **d_0 = 10 pc** (32,6 a.l.) par :

$$B_{abs}/B_{app} = (d/d_0)^2$$

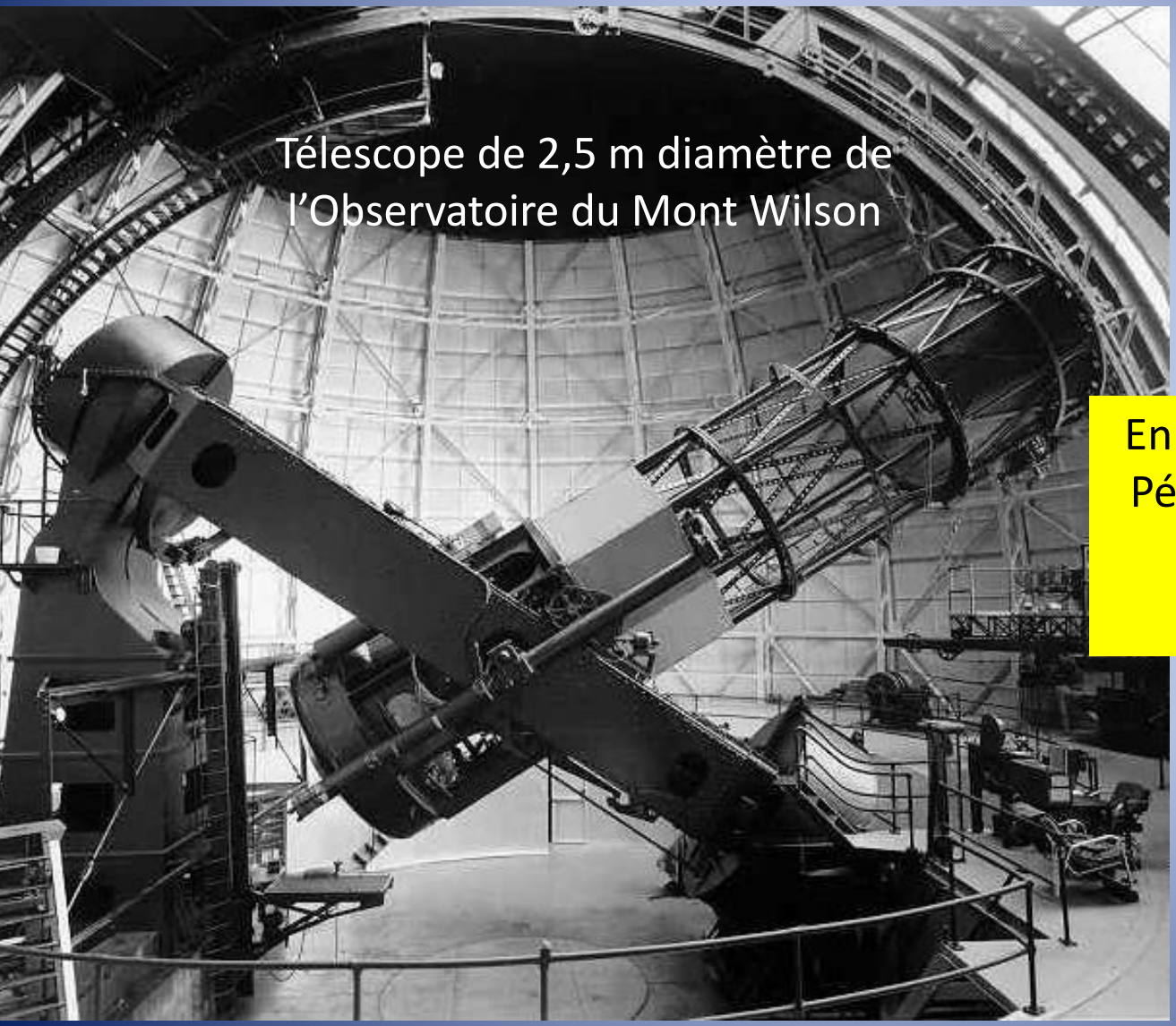
2. <u>Appliquée à une nouvelle Céphéide</u> : de période connue mais de distance inconnue → *brillance absolue* B_{abs}

Relation Période – Luminosité calibrée

3. <u>Mesure de sa *brillance apparente*</u> B_{app} → **calcul de sa distance d** par la formule donnée en 1.
4. Donne la distance de l'amas d'étoiles dans lequel est situé la Céphéide.

1924 : distance de la nébuleuse d'Andromède

Grâce au premier grand télescope (Mt Wilson au-dessus de Los Angeles) **Edwin Hubble (1889 – 1953) peut voir des étoiles** dans la ``nébuleuse d'Andromède'' preuve que ce n'est pas que du gaz comme on le pensait et même identifier des étoiles **Céphéides**.



En leur appliquant la relation Période – Luminosité estime leur distance à :

900 000 a.l.

À une telle distance, l'ensemble d'étoiles auquel elles appartiennent ne peut qu'être situé en dehors de la Voie Lactée :

concept de GALAXIE

Distance des « nébuleuses » (suite)

Cette première mesure de la distance de la "nébuleuse d'Andromède" = **étape décisive dans la compréhension de la structure de l'Univers**. Nous appartenons à une ***galaxie*** et une autre galaxie comparable est voisine de la nôtre.

Note : la distance était sous-estimée d'un facteur ~3 (réelle : 2,54 millions a.l.).

- La méthode des Céphéides permet à Hubble de mesurer la distance d'autres "nébuleuses" du catalogue de Messier et de les identifier comme étant également des galaxies.

Note : 40 des nébuleuses repérées par Messier seront ainsi identifiées

Le modèle d'un Univers formé de galaxies commence à émerger

1929 : l'expansion de l'Univers

La **distance des galaxies** estimée par **Hubble** associée à la **mesure de leur vitesse d'éloignement** (effet Doppler), lui permet de mettre en évidence que les galaxies s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont plus distantes :

→ hypothèse de l'Univers en expansion

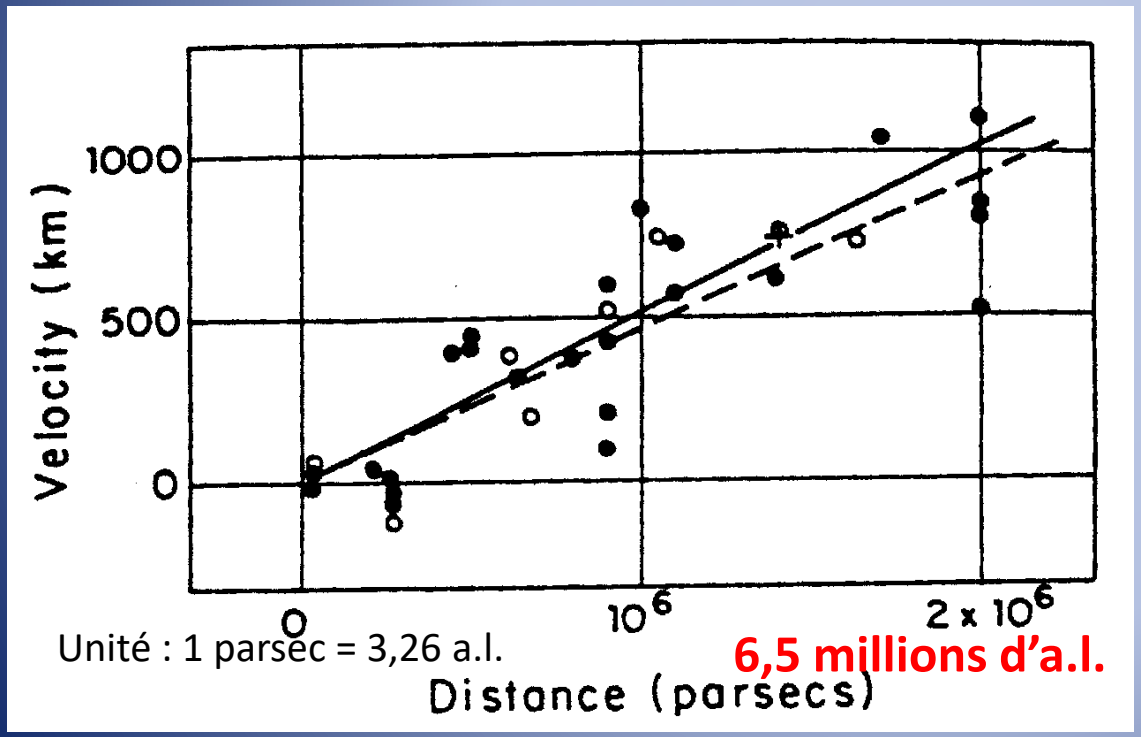


Diagramme vitesse, distance obtenu par E. Hubble

À cette date, par ces observations, la dimension de l'Univers est multipliée par un facteur d'environ 60.

Hypothèse confirmée ensuite par les mesures de distance et de vitesse d'un plus grand nombre de galaxies.

IV - Des progrès décisifs depuis les années 90

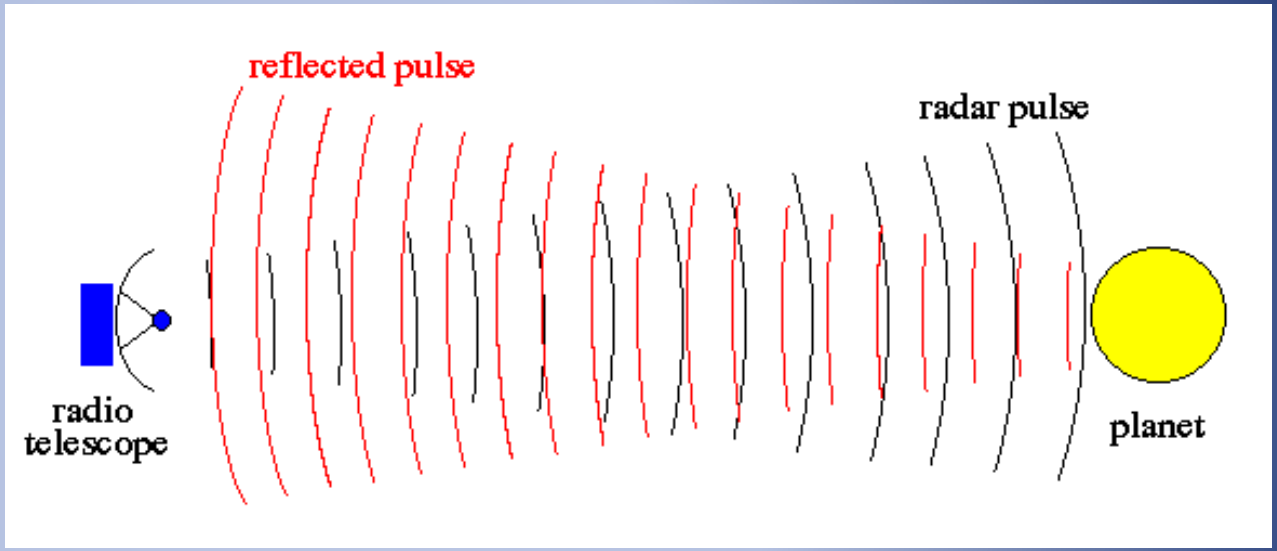
Avec le développement des détecteurs photoélectriques sensibles pour toutes les longueurs d'onde, les grands télescopes au sol (8 et 10 m), les observatoires spatiaux, la puissance des moyens de calcul → **progrès considérables sur la précision** :

- des **orbites des planètes** et des autres corps du système solaire (par de nouvelles techniques : radar, sondes spatiales, laser),
- des **distances d'étoiles** de la Voie Lactée (par des sondes spatiales spécialisées). Augmentation énorme du nombre d'étoiles mesurées.
- des **distances de galaxies** de plus en plus lointaines, détectées par les grands télescopes au sol et dans l'espace.

Développements qui se poursuivent qui permettent de préciser la structure de l'Univers proche et lointain

Méthode moderne de mesure des distances planétaires : *par radar*

Connaissant la vitesse de propagation, délai entre pulse de départ et pulse réfléchi → **distance.** Application en **1946** à la Lune, puis à Mercure, Vénus, Mars, astéroïdes. Précision limitée à Jupiter et Saturne (pas de sol). Au-delà, puissance du radar insuffisante.

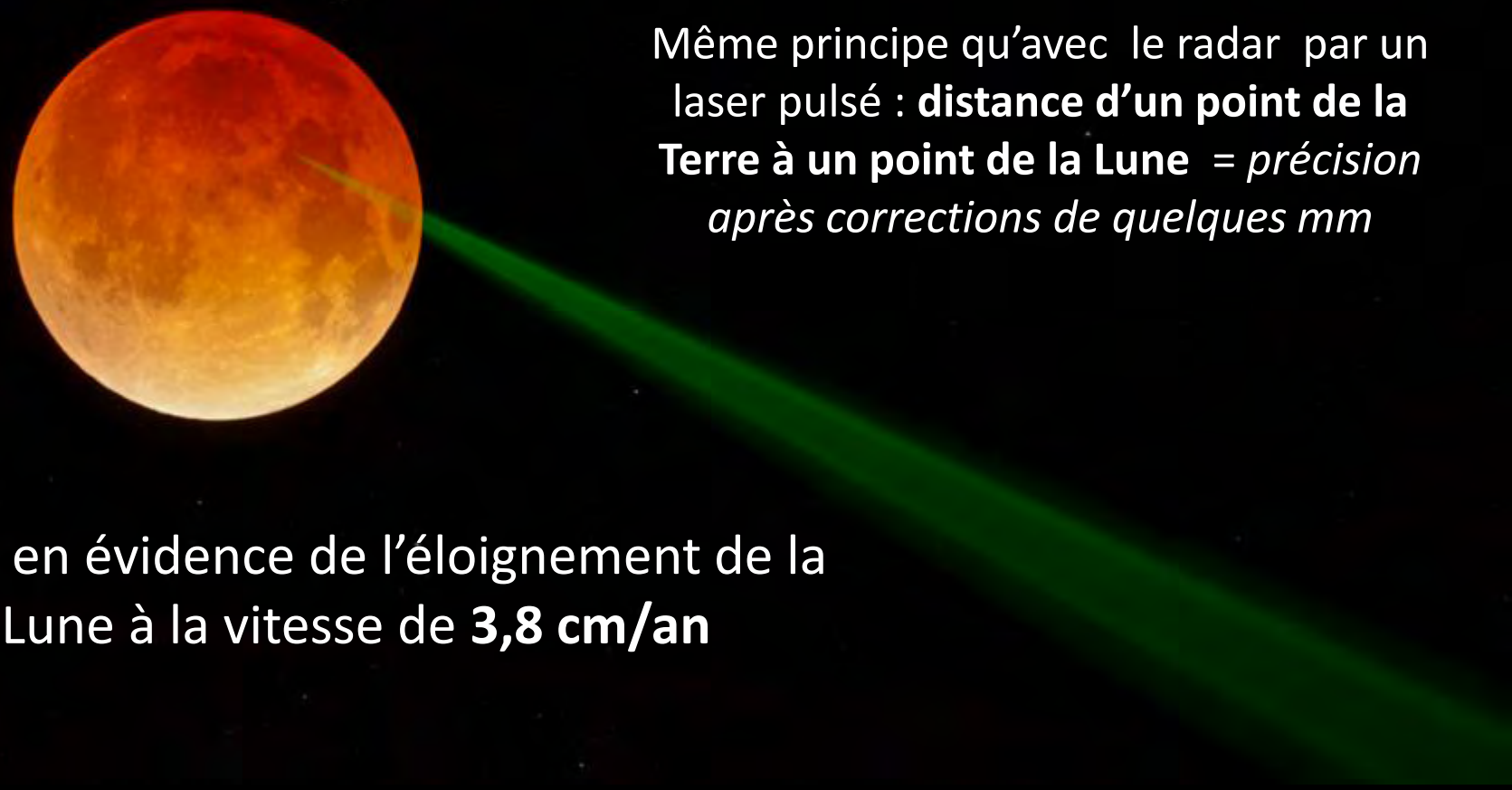


<u>Autre méthode</u> : *analyse des données télémétriques des sondes en survol et en orbite autour des planètes géantes. Précision actuelle de* ***quelques dizaines de mètres****.*
Distance Terre – Soleil redéfinie en 1976 comme référence :

Unité Astronomique : 1 UA = 149 597 870,691 ± 0,030 km

***= rayon de l'orbite circulaire d'une planète fictive autour du Soleil de période orbitale* 365,2568983 jours**

Mesure moderne de la distance Terre – Lune



Même principe qu'avec le radar par un laser pulsé : **distance d'un point de la Terre à un point de la Lune** = *précision après corrections de quelques mm*

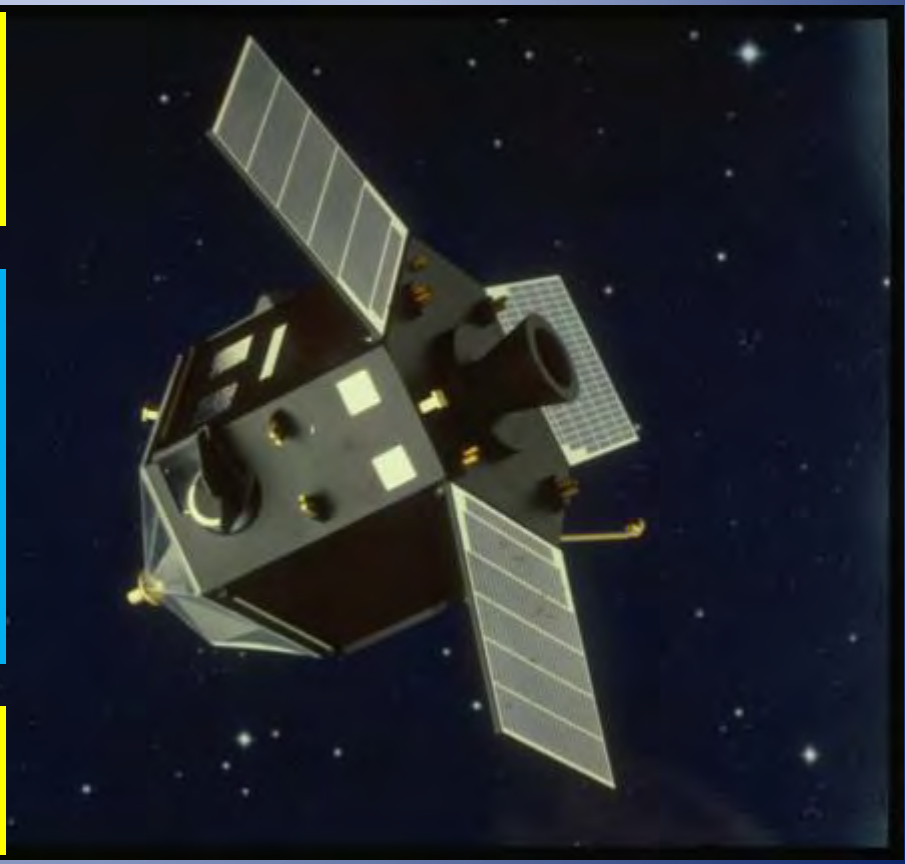
Mise en évidence de l'éloignement de la Lune à la vitesse de **3,8 cm/an**

Pointage de la Lune pendant une éclipse de Lune (couleur rouge) par un laser vert depuis la station de Mt Apache (Nouveau-Mexique). Faisceau de retour obtenu grâce au panneau de rétro-réflecteurs déposé par la mission Apollo 15 en 1971. En France, une station laser-Lune à Grasse.

Mesure des distances des étoiles depuis l'espace

Avantages : - couverture uniforme de l'ensemble du ciel avec le même instrument,
- mesures de parallaxe de grande précision, sans les inconvénients du sol et observation répétée d'une même source sur plusieurs années.

1989 – 1993 : opération du satellite de l'ESA **HIPPARCOS** = **HI**gh **P**recision **PAR**allax **CO**llecting **S**atellite



Grâce à HIPPARCOS :

- distances précises de **118 200 étoiles** (plus éloignées : **~300 a.l.**)
- catalogue moins précis de **2,5 millions** d'étoiles brillantes (**TYCHO 2**)

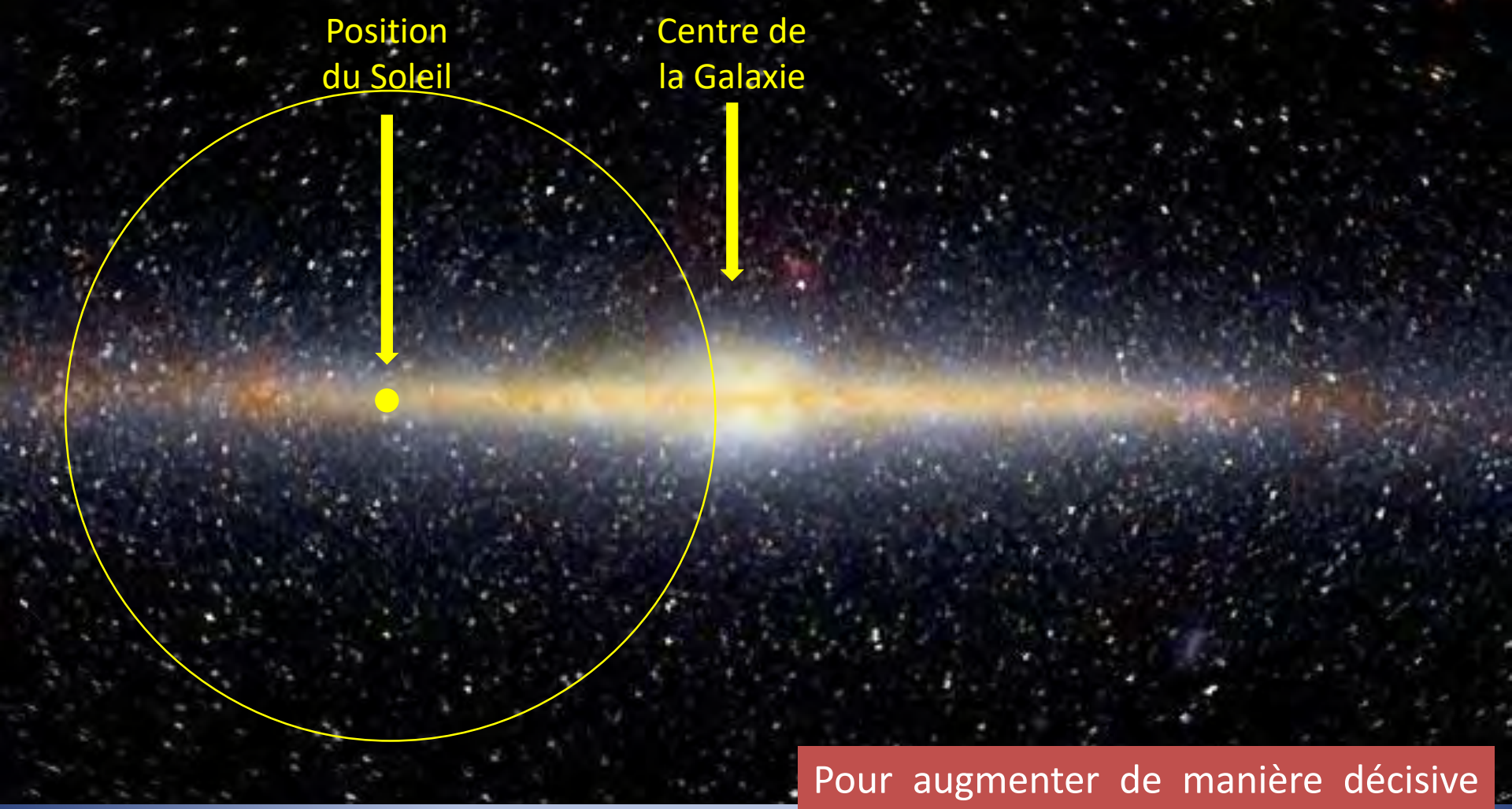
Distances précises de **273** étoiles Céphéides pour la mesure de la distance des galaxies

Distances de galaxies « proches »

Galaxie M63 : distance **28,9 ± 0,3 millions a.l.**

Galaxie M83 : distance **14,9 ± 0,16 millions a.l.**

Galaxie M81 : distance **11,8 ± 1,1 millions a.l.**
À gauche M82 : distance **11,7 ± 1,1 millions a.l.**



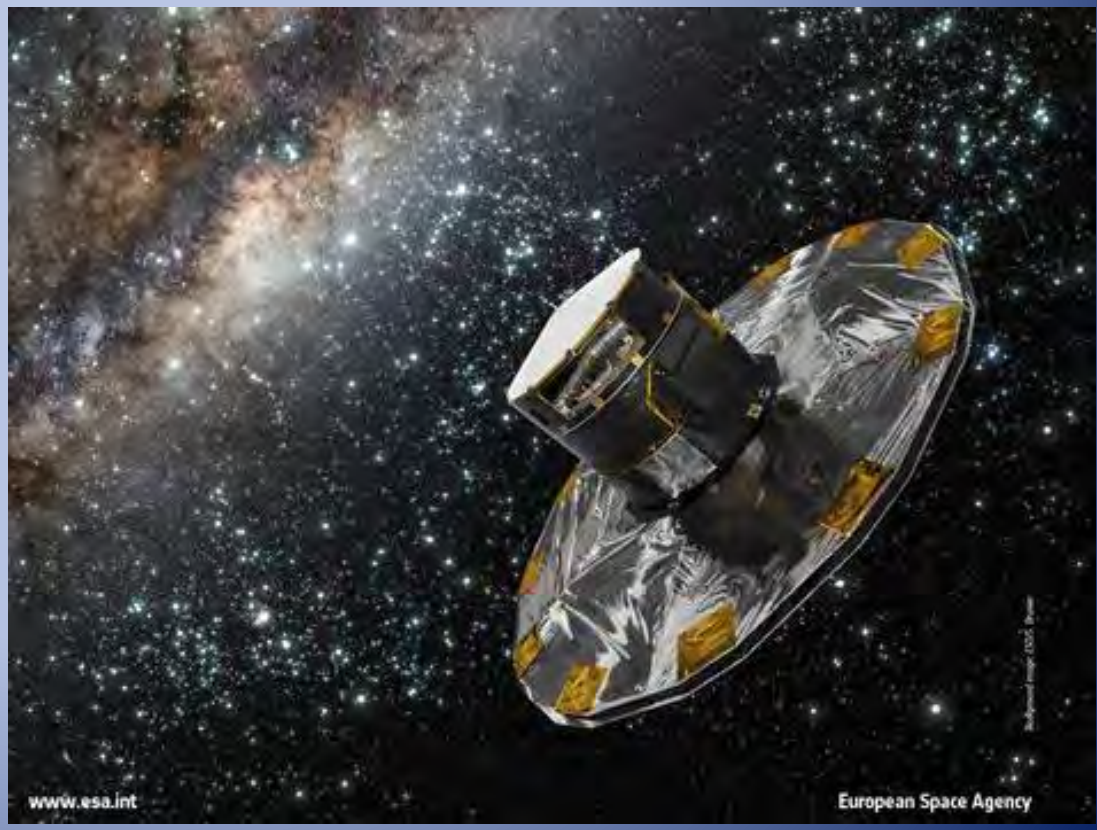
La VOIE LACTÉE :
un disque de **100 000 a.l.** de diamètre
avec environ **200 milliards** d'étoiles

Pour augmenter de manière décisive le volume mesuré dans la **VOIE LACTÉE**, le satellite européen **GAIA (160 instituts, 24 pays)** lancé fin 2013. Reprend le principe de **Hipparcos** mais 100 fois plus sensible. Doit permettre de couvrir le **volume du grand cercle**.

Le satellite européen GAIA

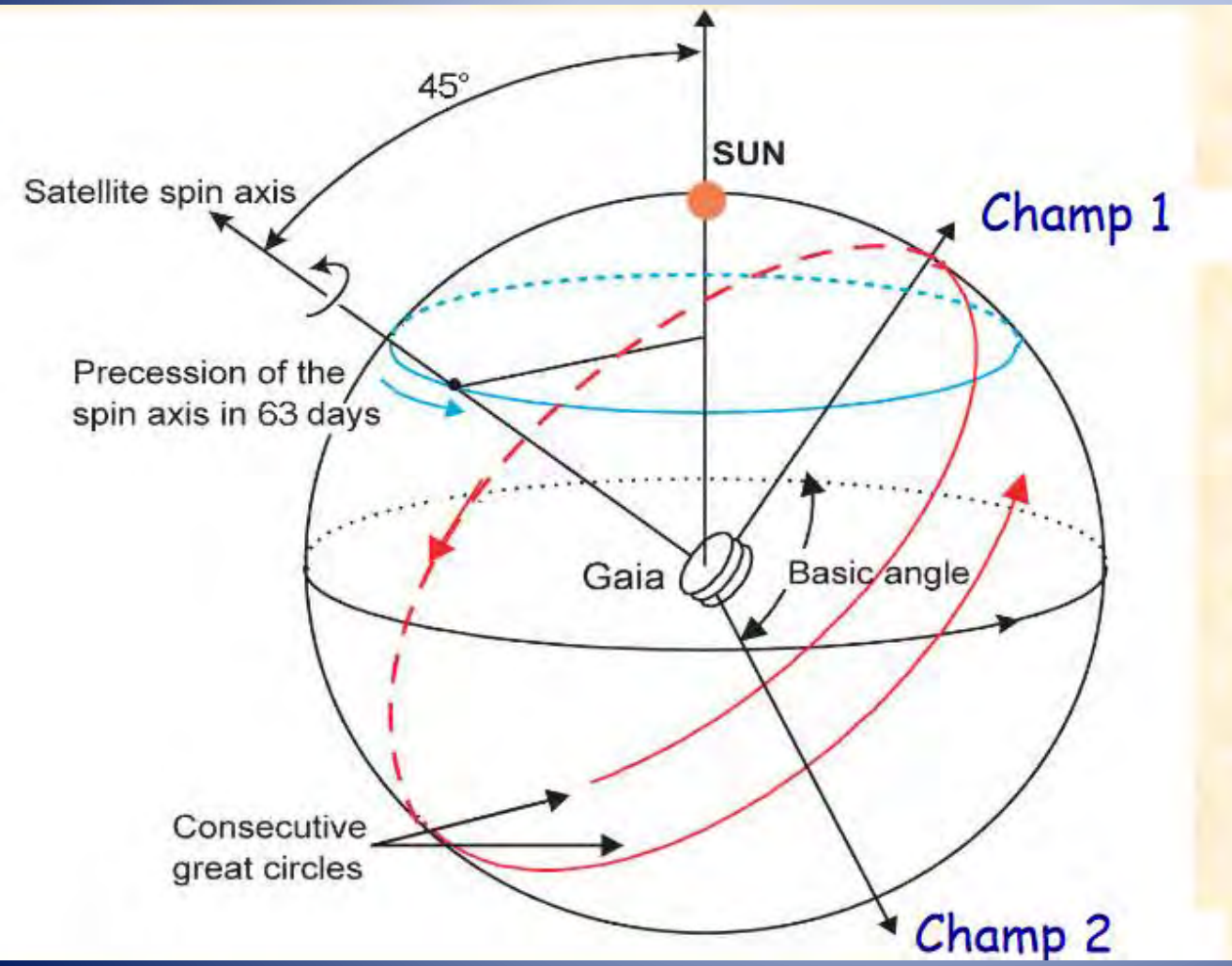
- **19/12/2013 :** Lancement de Kourou. Placé à 1 494 252 km de la Terre.
- **Objectif :** positions, flux, distances de > **1 milliard d'étoiles** + mesures de vitesse et de composition de **~150 millions de sources**.
- **25/07/2014** : Début du balayage du ciel (couverture en 6 mois mais incomplète, Lune à éviter). Couverture complète et précision visée = durée 5 ans. **Arrêt mission fin 2022.**
- **14/09/2016** : mise en ligne des données des 14 premiers mois d'observation (DR1) →

  *positions et intensités de **1,15 milliard** d'étoiles de la Voie Lactée (la moitié nouvelles)*
- **25/04/2018 :** en ligne 2ème catalogue (DR2) : 22 mois de données (25/07/14 – 23/05/16)
- **1er sem. 2020 :** en ligne 3ème catalogue



Principe de GAIA : *balayage consécutif de deux champs*

Deux télescopes (1.45m × 0.5m) avec un plan focal commun



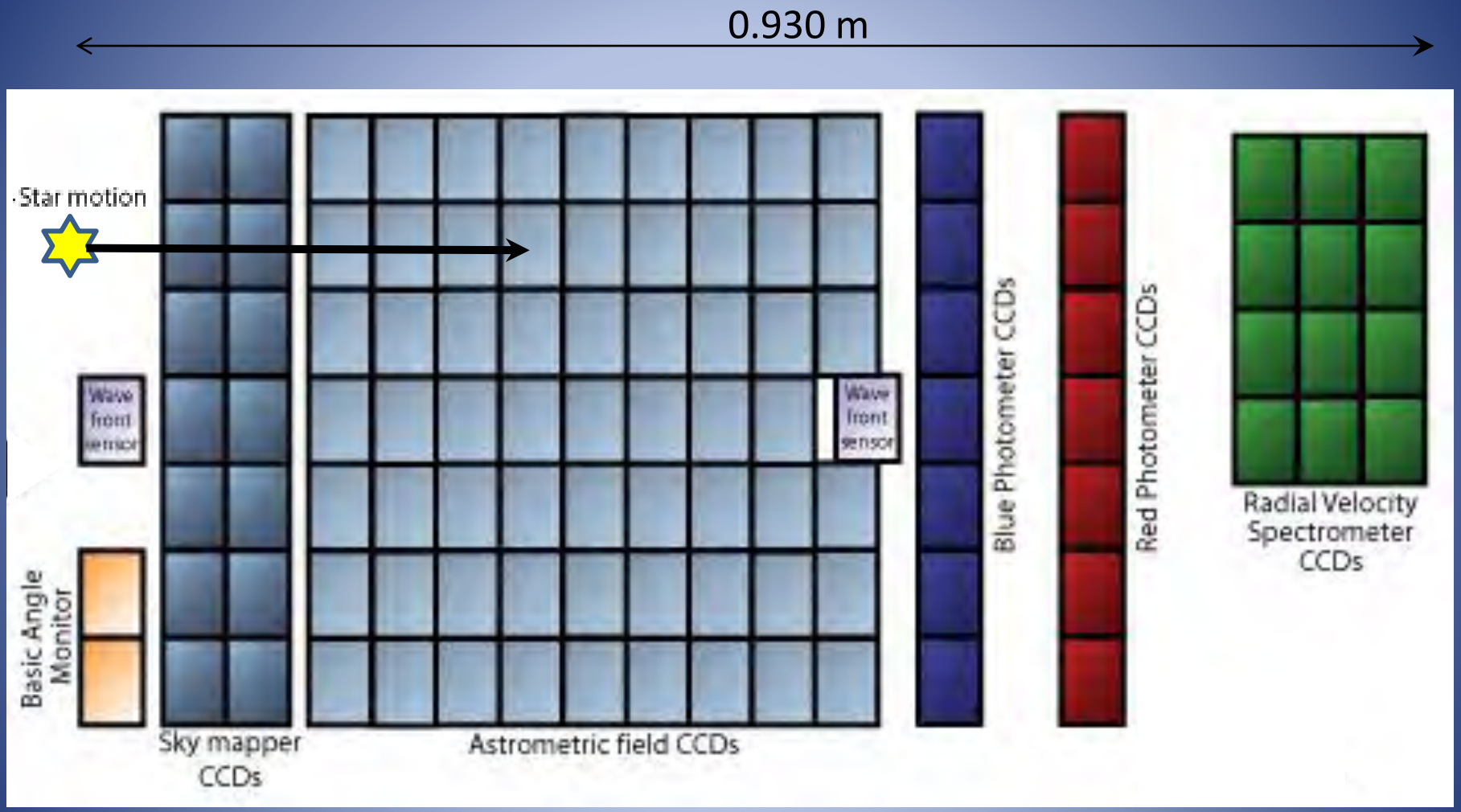
Vitesse de rotation:
60 arcsec/s

Période: 6 heures

Angle de base 106.5 °

Champ 2 observé
106.5 mn après le
champ 1

Plan focal de GAIA



Au total 106 CCD (4500x1966) soit ~ 10^9 pixels
Le plus grand nombre de CCD dans l'espace

Traitement des données

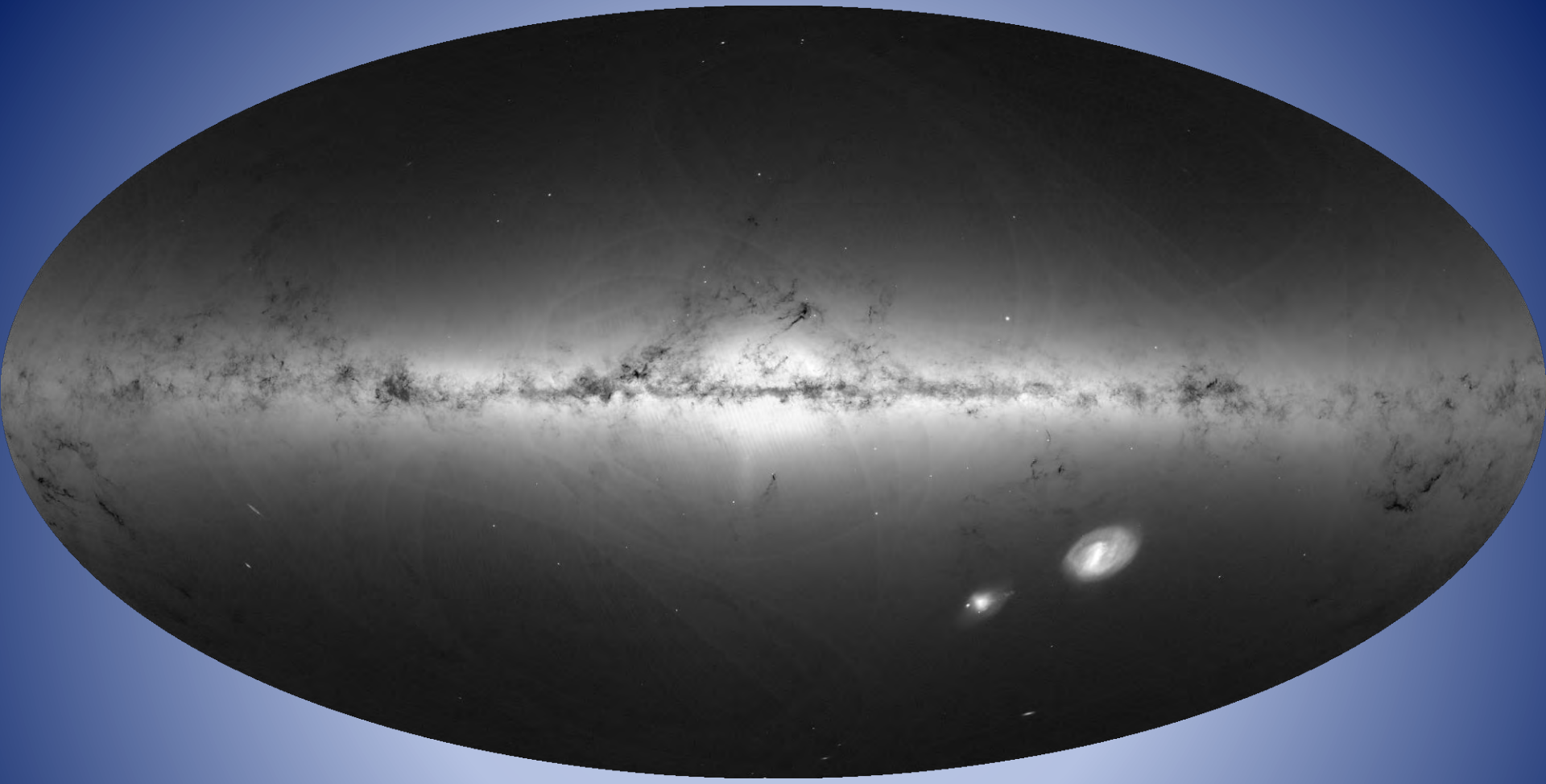
GAIA : un énorme volume de données

- Balayage en continu des **106 CCD** par les deux champs observés simultanément (*100 milliards de transits au 11/04/2018*),
- Trajet apparent très complexe d'une source à reconstituer pour déduire les paramètres *astrométriques :* position (α,δ), parallaxe, mouvement propre (2 oordonnées),
- **70 observations en moyenne par source sur 5 ans (**dépend de la latitude écliptique) soit, avec ~10^9 sources observées, à délivrer :
  - ~ **300 milliards de mesures** *astrométriques,*
  - ~ **300 milliards de mesures** *photométriques* (flux dans 3 bandes, bleue, verte, rouge), courbes de lumière (étoiles variables),
  - ~ **15 milliards de mesures** *spectroscopiques* avec 150 millions de sources observées en spectroscopie.

Contenu du 2ème catalogue GAIA (DR2)

comparé au premier (DR1)

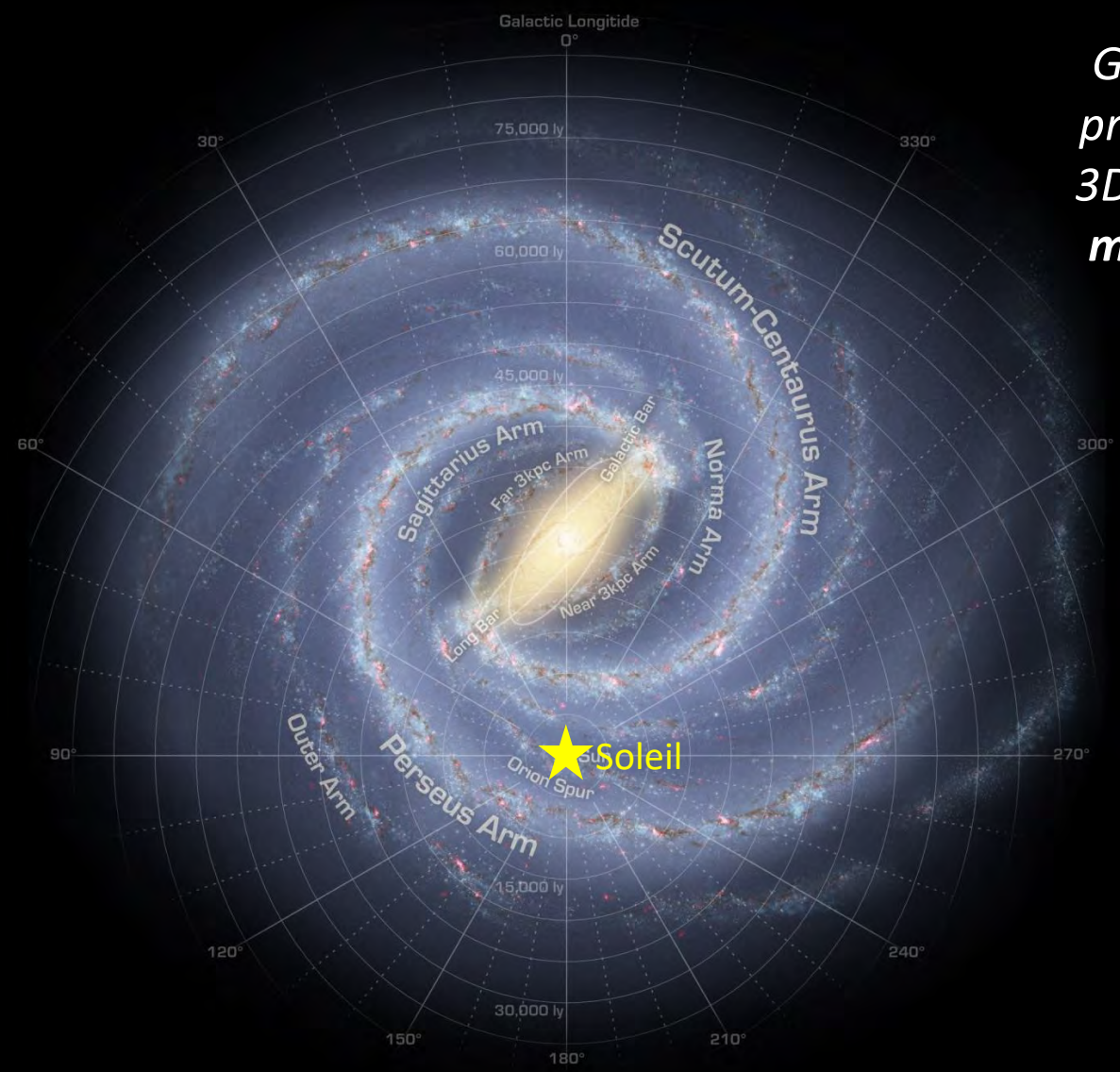
NOMBRE de SOURCES	DR2	DR1
Nombre total	**1,693 milliard**	**1,142 milliard**
Position(2), distance, mvt propre (2), flux (5 paramètres)	1,332 milliard	2 millions
Position, distance (3 paramètres)	3 millions	1,140 milliard
1 magnitude moyenne	1,6 milliard	1,142 milliard
Magnitude dans 3 bandes (verte, bleue, rouge)	1,38 milliard	____
Vitesse radiale	7,22 millions	____
Sources variables (céphéides, RR Lyr, Mira …)	550 737	3194
Astéroïdes connus	14 099	____



Carte de **densité des 1,7 milliard d'étoiles de la Voie Lactée** mesurées par GAIA à partir des 22 premiers mois d'observation (publiée le 25/04/2018).

Précision finale attendue sur les distances : 100 fois mieux que le précédent satellite HIPPARCOS

Carte de la Voie Lactée



GAIA va permettre de préciser la structure en 3D de notre Galaxie → ***mieux comprendre sa formation et son évolution***

Distance des galaxies (suite)

Distance maximum estimée à l'aide des étoiles céphéides : **~ 50 millions d'a.l.**

Mais il existe des galaxies encore plus lointaines !

D'après des images obtenues avec le télescope spatial Hubble (3 mois de pose accumulés) de cette petite région du ciel (2,4'x2,4') : nombreuses "taches" lumineuses allongées = **galaxies très lointaines.**

Plus de 10 000 sur cette image !

Un autre indicateur de distance est nécessaire

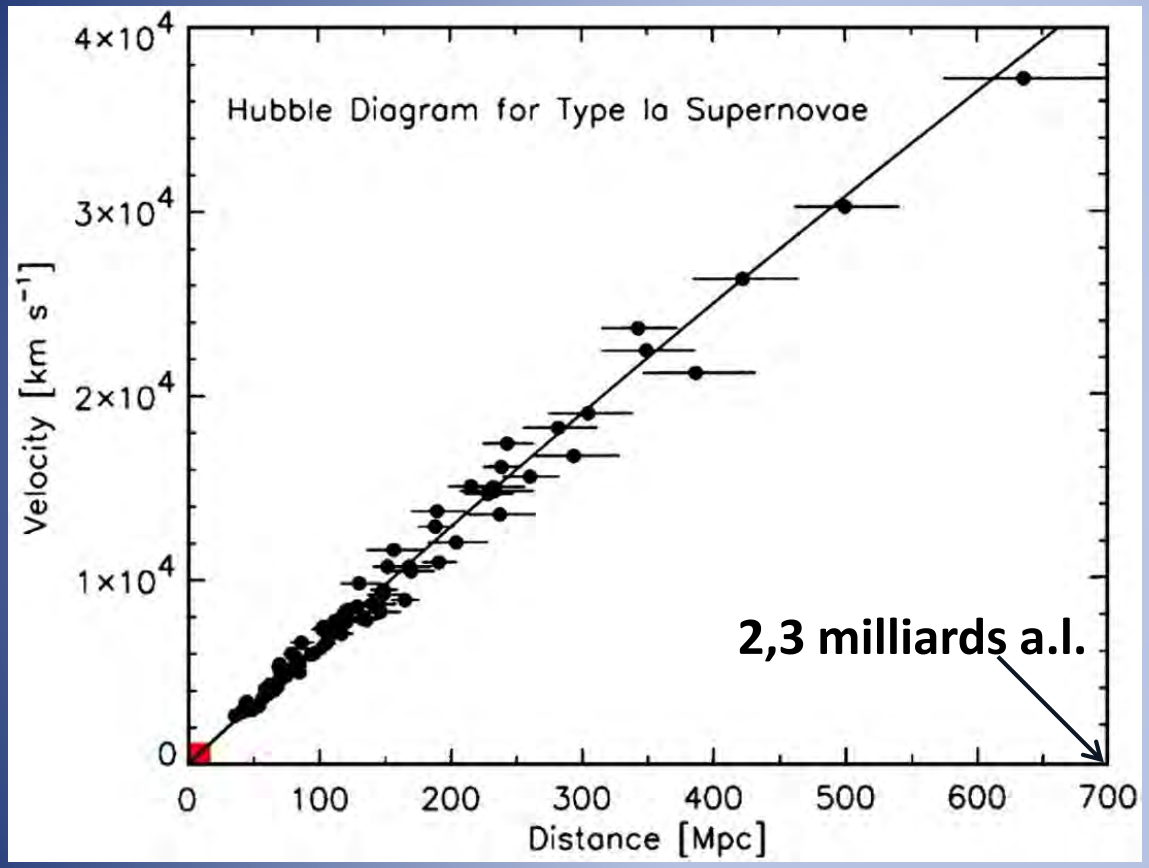
Autre indicateur de distance : **les supernovae = explosion qui marque la mort d'une étoile massive ≈ 100 millions de fois plus lumineuse qu'une étoile brillante normale. Donc détectable dans des galaxies lointaines.**

Images de la galaxie M 101 à 21 millions a.l. de la Terre, en **mars 2011** puis en **septembre 2011** au maximum d'éclat de la supernova détectée le 24 août 2011

Image des restes d'une supernova, (Cassiopée A) apparue dans la Voie Lactée en **1680**. Distance environ 11 000 a.l.

Nouvel estimateur de distance par la loi de Hubble - Lemaitre : $D = v/H_0$

H_0 : constante de Hubble - Lemaitre



Distances atteintes (2003) par l'observation des supernovae dans les galaxies lointaines pour contraindre ***H_0***. ***En rouge*** *: domaine exploré par E. Hubble en 1929.*

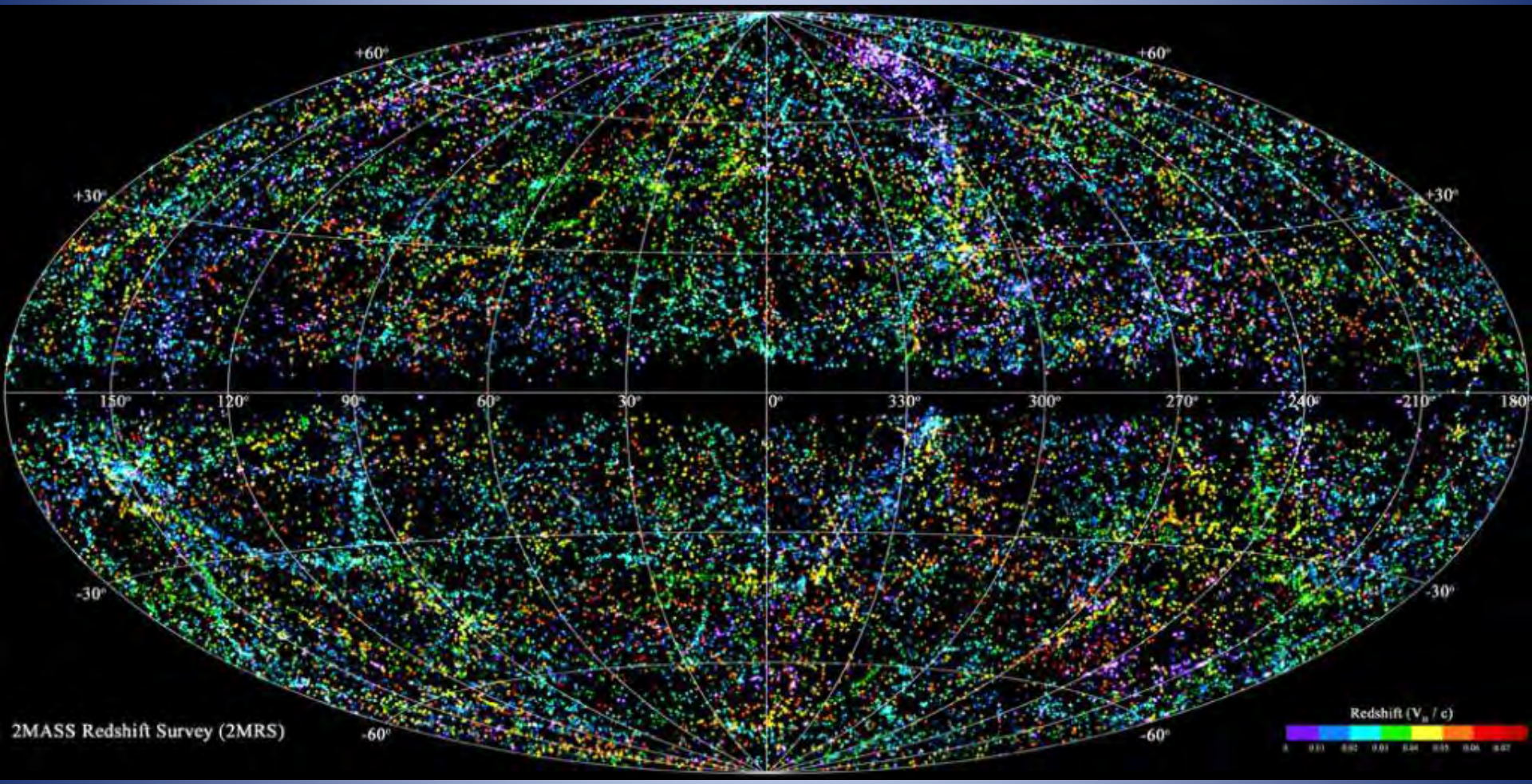
Loi calibrée par les distances de galaxies mesurées à partir des Céphéides, puis des supernovae. Permettent d'atteindre des distances beaucoup plus élevées. Par cette loi, estimation de distance des galaxies par mesure de leur vitesse d'éloignement.

Dernière estimation

(par le satellite Planck 2013)

H_0 = 67,3 ± 1,2 km s^{-1} /Mpc

Carte de « l'Univers proche »

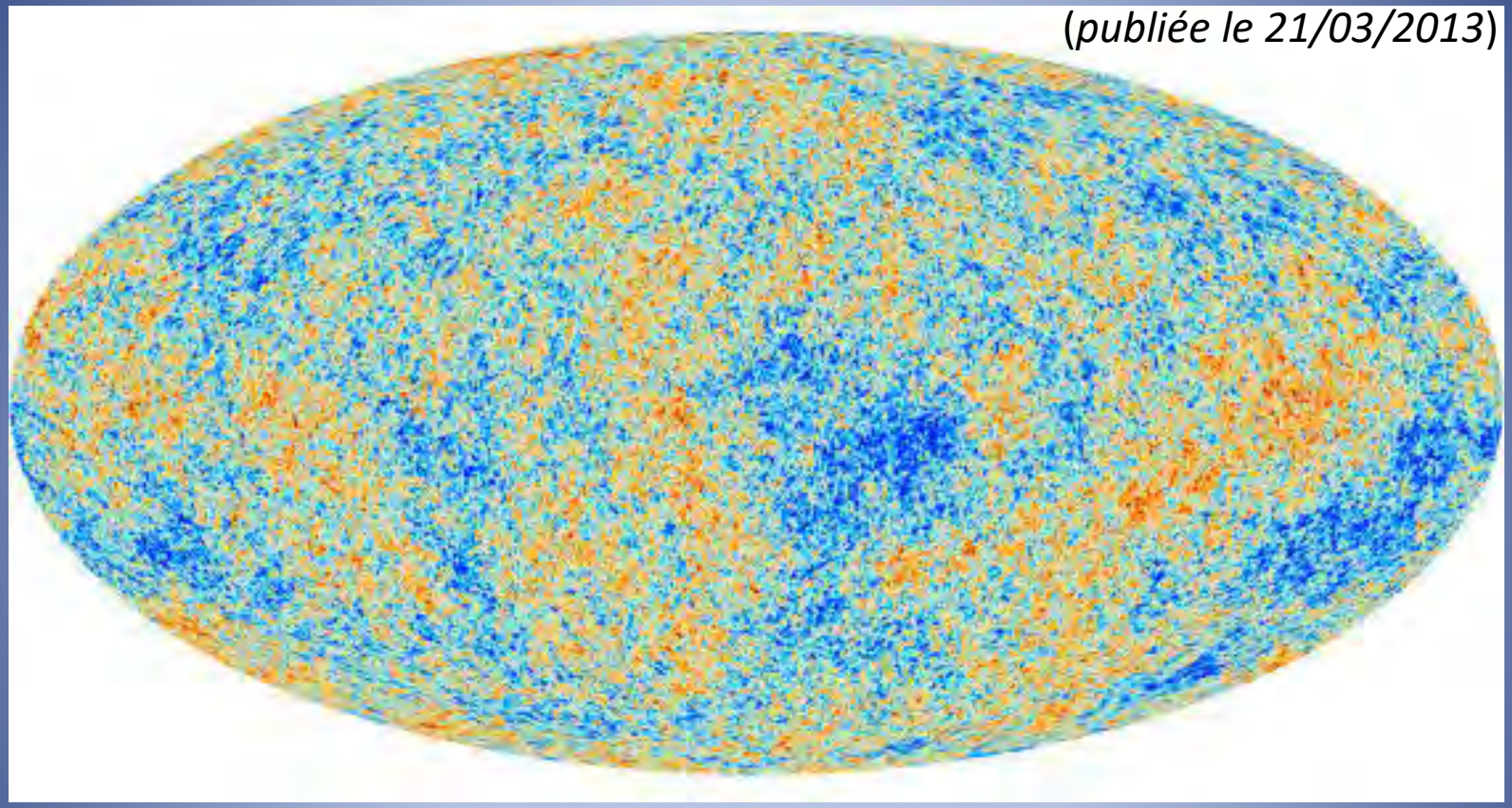


En appliquant la loi de Hubble - Lemaitre, carte de l'Univers jusqu'à **~380 millions d'a.l.** de la Terre. Chaque point (> 40 000) est une galaxie dont la distance est estimée à partir de la mesure de sa vitesse d'éloignement.

Une nouvelle vision de l'Univers

- **L'Univers observable est formé de ≈ 100 milliards de galaxies :**
  - Groupées suivant de vastes filaments autour de grands vides (structure en éponge)
  - Une de ces galaxie est **la Voie Lactée** où s'est formé le Système solaire
- **Signification de l'expansion de l'Univers :**
  - L'espace et le temps se créent ensemble
  - L'observation des galaxies les plus lointaines rapprochent de l'origine de l'Univers
  - L'Univers a un âge et une histoire. Sa reconstitution = **la cosmologie**
- **L'origine de l'Univers est décrite par le modèle du « Big Bang »**
  - L'Univers primitif, extrêmement chaud et compact
  - Refroidissement par l'expansion de l'Univers
  - A l'appui de ce modèle : **la cartographie de la ``première lumière´´**

Carte de la ``première lumière´´



Cette lumière est apparue **380 000 ans** après le début de l'Univers

– crédit ESA et la mission PLANCK (2009 – 2013)

Les zones rouges = régions plus denses → **les futurs amas de galaxies**

Les zones bleues = régions moins denses → **les grands vides**

Résumé de l'histoire de l'Univers