

La mesure des distances astronomiques

par **Jean-Luc COLAS**

Lycée Duplessis Mornay - 49408 Saumur

j1.colas@libertysurf.fr

RÉSUMÉ

Le nouveau programme de seconde suscite des questions sur la mesure des distances en astronomie. Voici quelques éléments de réponse. Pour plus de détails consulter la bibliographie ci-après, ou d'autres ouvrages d'astronomie traitant le sujet.

1. DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Dans l'Antiquité grecque, le rapport des distances Terre-Soleil sur Terre-Lune avait été estimé à environ 20 (au lieu de 400, valeur actuelle) par Aristarque de Samos (– 310 à – 230) à partir d'une hypothèse fautive (le Soleil n'est pas très éloigné de la Terre par rapport à la Lune - ce qui est faux) et de mesures entachées d'une grosse erreur (les instants du premier et du dernier quartier lunaire) :

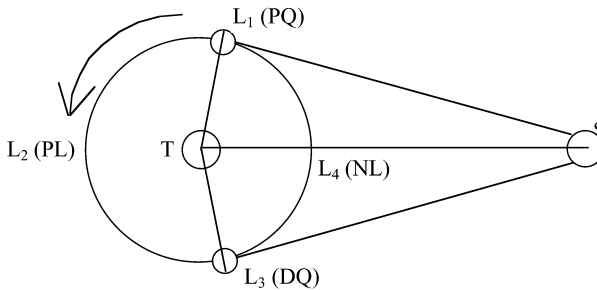


Figure 1

La durée $L_1L_2L_3$ est théoriquement plus longue que $L_3L_4L_1$. Leur différence permettrait d'atteindre l'angle L_1TS , et le rapport TS/TL . Mais le Soleil étant très éloigné, l'angle L_1TS est en réalité proche de 90° et les durées sont pratiquement égales, à quelques heures près, ce qui est l'ordre de grandeur de la précision de la mesure pour l'époque antique.

Le diamètre de la Lune avait été estimé à partir de l'observation des éclipses lunaires, toujours par Aristarque, puis d'une manière plus précise par Hipparque (– 190 à – 125) : les éclipses totales de lune les plus longues, les éclipses centrales, durent environ deux heures et comme la Lune se déplace dans le ciel d'un angle égal à son diamètre en

une heure, on en déduit que son diamètre est trois fois plus petit que celui de la Terre, en supposant que l'ombre terrestre est cylindrique (en fait c'est un cône d'angle $0,5^\circ$) :

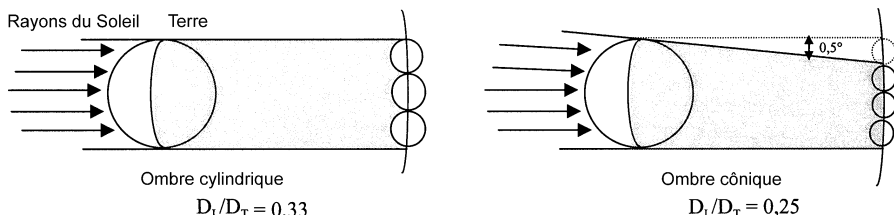


Figure 2

En réalité ce rapport vaut 0,27. Connaissant le diamètre apparent de la Lune ($0,5^\circ$) et le diamètre de la Terre (12 800 km), on en déduit la distance de la Lune : $\alpha = D_L / TL$
 $TL = D_L / \alpha = 0,27 \times 12800 / 0,5 \times 0,01745 = 396000$ km. La distance moyenne Terre-Lune est 384 000 km. Pour obtenir cette valeur il faut utiliser des données plus précises : le diamètre apparent lunaire moyen est $0,5182^\circ$, le rapport D_L / D_T vaut $3\,473 / 12\,800 = 0,2713\dots$

La mesure précise de la distance Terre-Lune par la méthode des parallaxes a été réalisée en 1751 par Lalande et La Caille, l'un à Berlin, l'autre au Cap en Afrique du Sud, situés approximativement sur le même méridien. Chacun a mesuré l'angle entre la direction du zénith et la direction du centre de la Lune lorsqu'il passe au méridien :

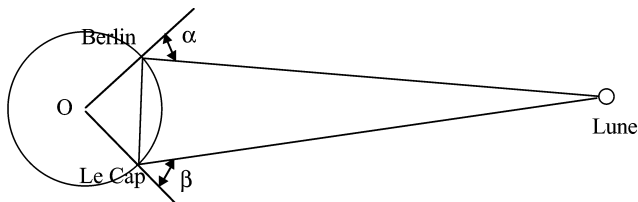


Figure 3

Les mesures de α et de β permettent de calculer OL si l'on connaît la base BC .

En 1946 la méthode de l'écho radar a été utilisée pour la première fois. Actuellement on utilise le tir laser. Un télescope sert de guide au tir d'un rayon laser vert sur un des réflecteurs catadioptriques déposés sur la Lune par les astronautes américains ou les sondes russes. Le tir dure un temps très bref : un trait de lumière d'un mètre se propage vers la Lune où il fait une tache de 100 m de diamètre ; une faible partie de la lumière se réfléchit sur le réflecteur et retourne dans le télescope où elle est détectée et contrôlée par une horloge atomique. La durée de l'aller-retour divisée par deux et corrigée des effets atmosphériques terrestres donne la distance Terre-Lune avec une précision extraordinaire de l'ordre du centimètre. Cette méthode est appliquée depuis les années 1970 (en 1973 la précision était de 10 m).

La distance du Soleil et des planètes : à partir du rapport TS/TL égal à environ 20 selon Aristarque, les Anciens estimaient la distance du Soleil à 9 millions de kilomètres, valeur qui fût utilisée jusqu'au XVII^e siècle. C'est Cassini qui donna en 1672 une valeur plus proche de la réalité en appliquant la troisième loi de Képler et en utilisant des mesures de la parallaxe de la planète Mars à Paris et à Cayenne lors d'une opposition particulièrement proche de Mars. La troisième loi de Kepler $a^3/T^2 = \text{cte}$ permet d'avoir les grandeurs relatives des demi-grands axes « a » des orbites des planètes à partir de leur période de révolution T . Il suffit de mesurer une seule distance « a » pour en déduire toutes les autres. Cassini trouva une distance Terre-Soleil égale à 146 millions de kilomètres (la valeur moyenne admise actuellement est de 149,6 millions de kilomètres). Une variante de la méthode des parallaxes a été proposée par Halley, utilisant une planète inférieure, Mercure ou Vénus lors de son passage devant le Soleil. Ce phénomène est très rare du fait que les plans orbitaux ne sont pas coplanaires avec celui de l'écliptique (écart de 7° pour celui de Mercure, de 3° pour Vénus). La méthode a été appliquée pour la première fois aux passages de Vénus de 1761 et 1769. Elle a l'intérêt de substituer à des mesures de très petits angles parallactiques des mesures de durées (durée du passage de la planète devant le disque solaire, dont le diamètre apparent n'est pas petit), qui au XVIII^e siècle étaient plus précises que les premières.

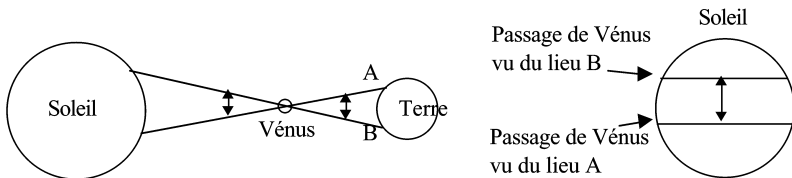


Figure 4

Il est à noter que le prochain passage de Vénus devant le Soleil se produira en 2004.

Enfin, une dernière méthode toute différente des précédentes est signalée par Lucienne GOUGUENHEIM dans son livre [1] : les raies du spectre d'une étoile située dans le plan écliptique subissent un décalage périodique annuel alternativement vers le rouge et vers le bleu par effet Doppler-Fizeau ; la mesure de l'amplitude du décalage maximal (crête à crête : 0,12 nm sur un an pour $\lambda = 600$ nm) permet de calculer la vitesse tangentielle de la Terre sur son orbite (30 km/s), d'où la longueur de l'orbite annuelle et son rayon.

2. A L'EXTÉRIEUR DU SYSTÈME SOLAIRE

La distance des étoiles

◆ Les parallaxes trigonométriques

La méthode repose sur le principe de la triangulation, mais au lieu de prendre comme base la distance entre deux observatoires terrestres, on prend deux positions de

la Terre à six mois d'intervalle, ce qui fournit une base de 300 millions de kilomètres. Les premières parallaxes stellaires ont été mesurées en 1838 par l'allemand Bessel sur l'étoile 61 du Cygne (0,3"). Alpha du Centaure (0,75") et Véga (0,12") ont été triangulées la même année par d'autres astronomes. C'est α Centauri qui possède la parallaxe la plus importante de toutes les étoiles : 0,754", et même 0,765" pour une petite étoile proche de α Centauri appelée pour cette raison « proxima Centauri ». On appelle « parallaxe annuelle » d'une étoile l'angle π sous lequel on voit le demi grand-axe de l'orbite terrestre depuis cette étoile. C'est donc la moitié du déplacement annuel apparent de l'étoile par rapport au fond d'étoiles lointaines.

Les angles π étant très petits, on a :

$$\pi = ST_1 / D = 1 \text{ UA} / D$$

UA = unité astronomique
= distance moyenne Terre-Soleil
= 149,6 millions de kilomètres.

Plus d'un siècle avant Bessel, l'anglais James Bradley avait tenté de mesurer des parallaxes stellaires ; au lieu de cela il découvrit le phénomène de l'aberration de la lumière (1726), qui donne à toutes les étoiles un mouvement annuel en forme d'ellipse plus ou moins aplatie selon leur latitude écliptique, d'amplitude 20,5", et dû au fait que l'astronome doit incliner son télescope pour recevoir la lumière provenant d'une étoile sur son miroir, la Terre se déplaçant sur son orbite, un peu comme lorsqu'on marche sous la pluie on doit incliner le parapluie. (C'était une preuve tardive du mouvement de la Terre).

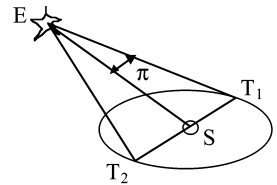
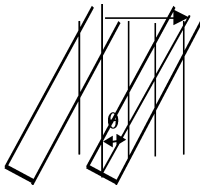


Figure 5



En Δt seconde, la lumière provenant de l'étoile a avancé de $c \cdot \Delta t$ vers le bas alors que le télescope s'est déplacé horizontalement de $v \cdot \Delta t$ (v : vitesse orbitale de la Terre).

$$\tan \theta = v / c = 30 / 300000$$

$$\theta = 1.10^{-4} \text{ rad} = 20,5'' \text{ pour toutes les étoiles.}$$

Figure 6

L'extrême petitesse des parallaxes stellaires, toujours inférieures à 1", explique pourquoi les Anciens ne les avaient pas observées. C'est d'ailleurs en se basant sur cette non-observation qu'Aristote argumentait quant à l'immobilité de la Terre. Ce fut aussi l'un des arguments forts des opposants au système héliocentrique de Copernic. Quand celui-ci s'imposa, on réalisa que l'absence de parallaxes plaçait les étoiles à des distances très grandes par rapport au système solaire. On a ainsi mesuré les parallaxes de quelques milliers d'étoiles, mais la précision de la méthode n'atteint 10 % que pour environ 700 d'entre elles, jusqu'à soixante-cinq années-lumière, pour des valeurs de $\pi = 0,05''$. En effet la précision de la mesure est limitée par la diffraction dans les instruments qui fait que l'image d'un point est une tache (le disque d'Airy) de rayon angulaire $r(\text{rad}) = 1,22 \times \lambda / D$ (D : diamètre de l'instrument, λ : longueur d'onde) ; pour le visible $\lambda = 600 \text{ nm}$ d'où $a = 0,15'' / D (m)$ qui représente le pouvoir séparateur de l'instrument (l'image de deux étoiles est séparée par au moins cette valeur angulaire). Pour

les instruments de gros diamètre le pouvoir séparateur est meilleur que pour les petits mais il est limité par la turbulence atmosphérique qui produit des variations aléatoires de direction de l'ordre de la seconde (au mieux 0,25", correspondant au pouvoir séparateur d'un instrument de 60 cm de diamètre). Le traitement statistique d'un grand nombre de mesures permet d'atteindre des parallaxes très inférieures à ces valeurs. La méthode a été appliquée aux étoiles nous entourant dans un rayon d'environ 650 années-lumière, avec une précision décroissante avec la distance (environ 10 000 étoiles dans cette sphère). Les astronomes utilisent le parsec (pc) comme unité de distance : c'est la distance d'une étoile dont la parallaxe est de une seconde ; $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ a-l}$. Le satellite Hipparcos lancé par l'ESA a mesuré entre 1989 et 1993 les positions de 120 000 étoiles avec une précision de 0,001" rendue possible par l'absence d'atmosphère. Pour plus de détails, voir le site de l'ESA (en anglais) :

<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos/further.html>

◆ *Les parallaxes séculaires*

On utilise comme base la distance parcourue en un an (ou plus) par la Terre entraînée par le système solaire vers l'apex à la vitesse de 20 km/s ; en dix ans la base est vingt fois plus grande que le diamètre de l'orbite terrestre. Mais les étoiles ont des mouvements propres et il est difficile de distinguer dans le déplacement observé la part due au mouvement d'entraînement du système solaire de celle due au mouvement propre de l'étoile. Des méthodes statistiques permettent de le faire, en considérant un grand nombre d'étoiles dont le mouvement propre est en moyenne nul...

◆ *La méthode des courants d'étoiles*

Les étoiles faisant partie d'un même amas sont animées d'un mouvement d'ensemble ; si l'amas est proche du Soleil, l'observation des mouvements propres de ces étoiles sur une longue période montre des déplacements convergents si l'amas s'éloigne, divergents s'il se rapproche (comme la pluie ou les arbres vus d'une voiture en mouvement, à travers le pare-brise ou la lunette arrière). On détermine la direction du point de convergence pour l'amas, ainsi que la vitesse radiale V_r de l'étoile par effet Doppler-Fizeau, et son mouvement propre apparent annuel μ''/an .

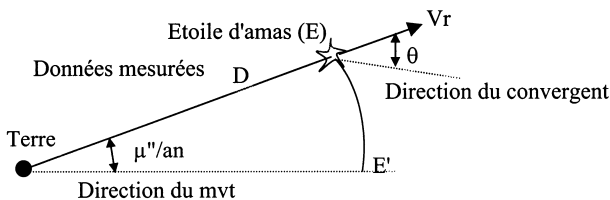


Figure 7

On calcule $V(t)$ la vitesse tangentielle par $V(t) = V_r \times \tan \theta$, la comparaison de $V(t)$ avec le mouvement propre apparent donne la distance D : en une année l'arc $EE' = \mu \times D = Vt \times N$ en appelant N le nombre de secondes dans un an. La parallaxe π

(en rad) valant $1UA/D$ (en UA), on obtient après calculs :

$$\pi'' = 4,74 \mu'' / Vr. \tan \theta$$

Cette méthode a été appliquée à l'amas des Hyades dans le Taureau, et a donné une distance de 41 pc, prouvant ainsi que l'étoile brillante Aldébaran située plus près ne fait pas partie de l'amas. L'intérêt de la méthode réside dans le fait qu'elle a permis de déterminer la luminosité de certaines étoiles comme les céphéides qui servent d'étalon pour les distances des galaxies.

Les parallaxes spectroscopiques : les étoiles ont été classées par type spectral (O, B, A, F, G, K, M) et deux astronomes (Hertzsprung et Russell) mirent en évidence vers 1913 une relation entre la classe spectrale et la luminosité intrinsèque d'une étoile, en étudiant des étoiles dont les distances étaient connues (diagramme HR). La magnitude absolue est la magnitude apparente qu'aurait l'étoile si elle était placée à une distance de 10 pc. Une étoile dont on ne connaît pas la distance peut être placée dans le diagramme d'après son type spectral. On obtient ainsi sa magnitude absolue. La magnitude apparente mesurée par des méthodes photométriques permet de calculer sa distance. Cette méthode peut être appliquée jusqu'à 100 000 pc avec une précision de 20 %.

◆ *La relation période-luminosité des céphéides*

En 1906 une astronome américaine de Harvard, Miss Leavitt, fût chargée d'étudier les clichés des Nuages de Magellan pris depuis 1900 à l'observatoire du Pérou. Elle repéra 800 étoiles variables dans le Grand Nuage et 969 dans le Petit Nuage. Après que les courbes de lumière aient été établies pour chacune de ces étoiles, 95 % se sont révélées être du type de δ Céphée. Comme toutes les étoiles de chacun des nuages sont pratiquement à la même distance de nous, Miss Leavitt remarqua que la période de variabilité était, pour chaque étoile, d'autant plus longue que l'étoile était plus brillante. Il y avait donc une relation entre la période et la magnitude absolue de l'étoile. Il suffisait de trouver des céphéides dont la distance était connue pour étalonner une nouvelle méthode de détermination des distances.

Mais les céphéides ne se trouvent pas dans l'environnement proche du Soleil. C'est Shapley qui a réalisé cet étalonnage, en utilisant onze céphéides galactiques dont les distances avaient été évaluées par la méthode des parallaxes séculaires. Une fois cet étalonnage réalisé, on peut calculer la distance d'une céphéide inconnue à partir de la mesure de sa période et de sa magnitude apparente (l'écart entre magnitude absolue et magnitude apparente est lié à la distance). Les céphéides sont appelées variables d'amas car on en trouve beaucoup dans les amas globulaires. Shapley a pu ainsi déterminer les distances d'une vingtaine d'amas globulaires. Tous ne contiennent pas de céphéides. Pour les autres il a utilisé une méthode statistique consistant à calculer l'éclat moyen d'une population d'étoiles d'un amas connu, et celui d'une population semblable dans un amas inconnu. La comparaison des éclats donne la distance de l'amas inconnu. Vers 1915 il avait placé une centaine d'amas globulaires et constaté qu'ils étaient répartis symétriquement de part et d'autre du plan galactique, entourant notre Galaxie comme les abeilles autour d'un

essaim. On en connaît actuellement environ un millier. Les premières estimations des dimensions de notre Galaxie ont ainsi pu être faites. Elles ont été corrigées plusieurs fois depuis, en tenant compte en particulier de la présence de poussières intergalactiques diminuant les magnitudes apparentes.

Cette méthode de mesure des distances par les céphéides peut s'appliquer tant qu'on observe des céphéides au sein d'une galaxie, c'est-à-dire en pratique à la demi-douzaine de galaxies qui entourent la nôtre dans ce que l'on nomme « l'amas local », jusqu'à une distance de l'ordre de six millions d'années-lumière.

3. LES GALAXIES LOINTAINES

Pour les galaxies lointaines on utilise comme indicateur de distance d'autres étoiles plus brillantes, comme les novae qui atteignent au moment de leur éclat maximal la magnitude absolue de $-6,5$ (résultat connu à partir de novae observées dans notre galaxie ou dans des galaxies de distance connue). On peut observer dans de bonnes conditions des novae jusqu'à des distances de 4 mégaparsecs soit environ 12 millions d'années-lumière. Les supernovae, dont le maximum d'éclat leur donne une magnitude absolue de -17 environ, permettent d'aller jusqu'à 300 Mpc, soit un milliard d'années-lumière. Mais ces étoiles n'existant que de façon très fugace dans les galaxies, on doit faire appel à d'autres techniques pour estimer leurs distances.

◆ *Les parallaxes photométriques*

Cette méthode consiste à établir un éclat propre pour une famille d'astres donnés, éclat obtenu par traitement statistique sur une population dont les distances ont été mesurées par d'autres méthodes. Puis pour un astre de même type situé à une distance inconnue, la mesure de son éclat apparent, comparé à son éclat absolu, donne sa distance. On utilise ainsi comme indicateur de distance à l'échelle intergalactique les amas globulaires qui entourent les galaxies. On estime leur magnitude absolue moyenne à $-7,5$. Cela permet de mesurer des distances allant jusqu'à 15 Mpc, soit 45 millions d'années-lumière.

Les galaxies elles-mêmes sont classées en catégories (selon leur morphologie, leur dimension), catégories dont on calcule la magnitude absolue moyenne à partir de celles qui sont connues et on applique cette valeur à celles de même catégorie qui sont inconnues, d'où leur distance après mesure de leur magnitude apparente.

Enfin, la loi de Hubble sur le décalage vers le rouge permet d'atteindre les confins de l'Univers visible. Cette loi, vérifiée sur des galaxies de distances connues donc relativement proches, énonce que le décalage vers le rouge des raies du spectre (ou la vitesse de fuite) est proportionnel à la distance de l'objet à l'observateur : $V = H \times D$; $V =$ vitesse de fuite en km/s ; $D =$ distance en Mpc ; $H =$ constante de Hubble = 50 ou 100 km/s / Mpc. Les difficultés d'application de cette loi viennent du fait que la constante H n'est pas connue avec précision ; sa valeur a été révisée plusieurs fois depuis 1928, date à laquelle on lui avait attribué la valeur de 500 km/s / Mpc. De plus les objets lointains sont de plus

en plus jeunes et leurs propriétés ne sont peut-être pas les mêmes que celles des objets qui nous entourent, plus anciens dans l'évolution de l'Univers, ce qui fausserait l'application des lois statistiques. Enfin les galaxies ont des mouvements propres à l'intérieur des amas, mouvements qui se superposent au mouvement d'ensemble d'expansion de l'Univers.

CONCLUSION

Pour résumer, on a vu que pour atteindre les confins de l'Univers on a utilisé différentes méthodes dont le calibrage était réalisé sur des objets dont les distances avaient été mesurées par une autre méthode. Chaque méthode rencontre ses limites du fait que les astres qu'elle utilise comme indicateurs de distance ne sont plus visibles ou en tout cas plus utilisables au-delà d'une certaine distance ; mais elle est prise en relais par une autre méthode qui permet d'aller plus loin. A la base de tout il a la dimension de la Terre, le diamètre de son orbite et les parallaxes trigonométriques. Les erreurs sur les données primaires se répercutent sur les résultats obtenus par les méthodes secondaires. La précision annoncée pour ces méthodes secondaires est souvent de 30 %, mais lorsqu'un fait nouveau intervient et amène à une révision des distances, c'est parfois de beaucoup plus qu'il faut les modifier. Ainsi en 1952 au congrès de l'Union Astronomique Internationale, à Rome, l'astronome américain W. Baade des Monts Wilson et Palomar, annonça que toutes les distances extragalactiques devaient être multipliée par deux. La galaxie d'Andromède passait ainsi de 750 000 années-lumière à 1 500 000 années-lumière. La cause en était la découverte d'une erreur dans l'utilisation des céphéides comme indicateur de distance pour les objets extragalactiques. Après les travaux de Miss Leavitt et de Shapley on découvrit que les céphéides devaient être partagées en deux types de variables : celles de courte période, inférieure à un jour, appelées RR Lyrae n'ont pas la même loi que celles de période plus longue, de un jour à un mois, les céphéides proprement dites. Miss Leavitt avait établi sa loi sur les céphéides des Nuages de Magellan, toutes à longue période. Shapley l'avait calibrée sur des céphéides galactiques, toutes à courte période, les RR Lyrae, moins brillantes et inobservables dans les objets extragalactiques.

En 1955, au congrès de Dublin, il avait fallu encore reculer Andromède à deux millions d'années-lumière, à cause de l'éclat de ses amas globulaires trouvé beaucoup trop fort comparé à ceux de notre Galaxie. Au congrès suivant de 1958 à Moscou, c'est par un facteur 5 à 10 qu'il a fallu multiplier toutes les distances extragalactiques, sauf pour l'amas local. La population des céphéides s'était révélée moins homogène qu'on ne le croyait, et l'estimation des distances à partir de l'éclat des novae, dont la magnitude au moment du maximum tient entre des limites très serrées, s'est montrée plus sûre, ce qui les a fait adopter comme meilleur indicateur que les céphéides.

BIBLIOGRAPHIE

On trouvera beaucoup de détails supplémentaires sur le sujet dans les ouvrages sui-

vants :

- [1] GOUGUENHEIM Lucienne, professeur à l'université de Paris-Sud. *Méthodes de l'astrophysique*, comment connaître et comprendre l'univers. Hachette-CNRS, collection « Liaisons scientifiques ». 300 pages.
- [2] ACKER Agnès, professeur à l'université de Strasbourg. *Astronomie*, introduction. Masson, collection « De Caelo ». 350 pages.

SITES INTERNET

◆ *Des liens sur le sujet (en anglais)*

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/distance.htm>

http://www.astro.washington.edu/labs/parallax/stellar_parallaxes.html

◆ *Animation java*

<http://www.astro.washington.edu/labs/parallax/solar.html>

◆ *Mesures sur champs stellaires (blink-microscope)*

http://www.astro.washington.edu/labs/parallax/parallax_distance.html

◆ *Des diagrammes HR*

<http://astro.pas.rochester.edu/~afrank/A105/LectureVIII/LectureVIII.html>

◆ *Le site de l'ESA sur le satellite Hipparcos*

<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos/hipparcos.html>

◆ *Page donnant la précision des mesures d'Hipparcos (0,0000003°) :
(longue à charger à cause de belles images)*

<http://astro.estec.esa.nl/Hipparcos/education-extra.html#old>

◆ *Des animations : (un film de 2,2 Mo sur l'amas des Hyades en 3D)*

<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos/animations.html>

◆ *Toutes les informations sur la mission Hipparcos*

<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos/further.html>

Cet article est disponible sur le site académique de Nantes :

<http://www.ac-nantes.fr/peda/disc/scphy/index.htm>