

## La mesure astrométrique du ciel

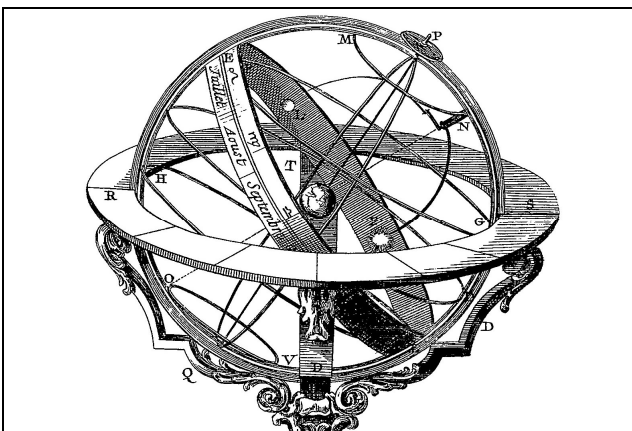
Jean-Eudes Arlot, astronome, ancien directeur de l'IMCCE  
(Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides IMCCE)

*L'article permet de montrer comment on parvint historiquement à déduire de la position et du mouvement angulaire des astres leur distance à la Terre.*

L'observation du ciel pose tout de suite un problème fondamental : comment déduire de la position et du mouvement angulaires des astres célestes leur distance à notre Terre ? L'astronome ne peut mesurer que des angles sur le ciel et donc des variations d'angles et déterminer ainsi les mouvements des astres. À partir de là, les conclusions que l'on peut en déduire sont limitées. Mais c'est bien grâce à de telles mesures que Kepler a pu déterminer la nature des orbites de planètes ou que Bessel a mesuré la première distance d'une étoile. L'astrométrie trouve ainsi sa place : effectuer des mesures d'angle sur le ciel avec la meilleure précision possible pour valider les modèles d'univers.

### Les mesures des anciens

Dans l'Antiquité, la technologie ne permet pas des mesures précises. Mais, en a-t-on besoin ? On a repéré les astres mobiles (« astres errants ») et on en a déduit que les plus rapides sont proches et les plus lents sont lointains : raisonnement et modèle simples mais logiques et pas si faux ! Seul Hipparque va faire de vraies mesures angulaires et va décrire le mouvement de la Lune et du Soleil lui permettant de prédire les éclipses.

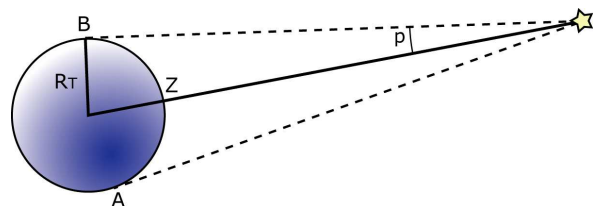


*Fig.1. Sphère armillaire. Des instruments de ce type ont été utilisés dès l'Antiquité pour mesurer des positions d'étoiles, en coordonnées équatoriales ou écliptiques. La précision est un peu inférieure au demi-degré.*

Il va aussi détecter la précession des équinoxes grâce à son catalogue d'étoiles qu'il peut comparer à ce qui a été fait avant lui. Ses mesures vont rester fondamentales pendant des siècles, confortant le modèle de Ptolémée. Il est clair que la précision des observations d'Hipparque était compatible avec le modèle géocentrique. Si la distance Terre-Lune avait été mesurée facilement grâce aux éclipses sans avoir besoin de connaître autre chose que le diamètre de la Terre, la distance Terre-Soleil va rester longtemps inconnue. Le Soleil est loin, c'est tout ce que l'on peut dire.

### La parallaxe

Pour mesurer la distance d'un corps céleste, puisqu'il est impossible d'y aller, il faut appliquer la méthode de triangulation avec une base qui ne peut pas être plus grande que la Terre elle-même. Il faut mesurer une variation d'angle dont le maximum est en fait l'angle apparent sous lequel est vu le rayon de la Terre depuis l'objet visé – c'est ce qu'on nomme « parallaxe horizontale » – pour faire ce calcul de triangulation (figure 2).



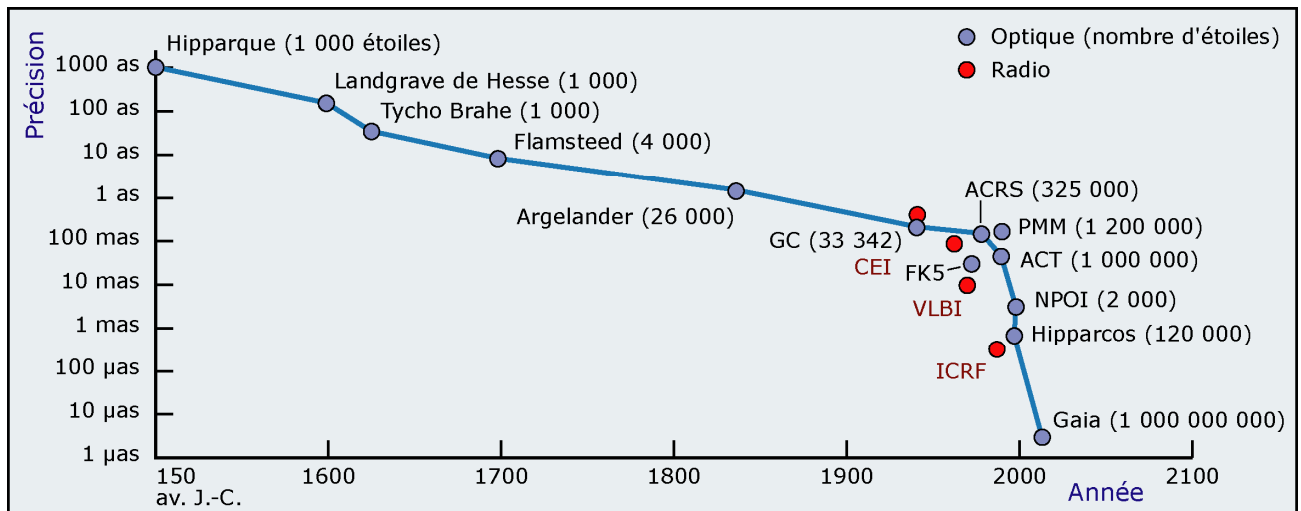
*Fig.2. Parallaxe diurne et parallaxe horizontale. La Terre est vue du nord et le mouvement diurne entraîne l'observateur de A en B faisant varier l'angle de visée d'une planète par rapport à l'angle de visée depuis le centre de la Terre. La variation maximale correspond à l'angle sous lequel on voit le rayon terrestre depuis la planète visée. On l'appelle la parallaxe horizontale (elle est dite horizontale parce qu'on l'observe lorsque la planète est vue à l'horizon du lieu d'observation).*

La parallaxe de la Lune est de 57 minutes d'arc, celle du Soleil est de 8 secondes d'arc et celle de Mars au plus près de la Terre est de 16 secondes d'arc. La figure 1 illustre la parallaxe. On verra que pour les étoiles, la base doit être considérablement élargie. La figure 3, qui donne l'évolution de la

précision de mesure au cours du temps, montre bien que ces calculs étaient impossibles jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle.

Unités d'angle

1°, c'est une pièce de 1 € vue à 1,3 m  
 1' (minute d'arc) = 1/60 ° = une pièce de 1 € vue à 80 m  
 1" (seconde d'arc) = 1/60' = 1 pièce de 1 € vue à 4,8 km



**Fig.3.** Évolution de la précision astrométrique au cours des siècles. La précision (en ordonnée) est indiquée en seconde d'arc (as) milliseconde d'arc (mas) et microseconde d'arc (µas). C'est seulement à partir du XVIII<sup>e</sup> s. que la précision de mesure va permettre d'avancer considérablement dans notre connaissance de la dynamique du Système solaire.

## Les temps modernes

On a vu que la parallaxe du Soleil est de 8 secondes d'arc. Avec une précision de mesure de l'ordre de la minute d'arc, mesurer quelques secondes est impossible, d'autant que le Soleil ne présente aucun point fixe que l'on pourrait viser aisément. Ainsi, la distance au Soleil devait rester inconnue pendant des siècles. Au XVII<sup>e</sup>, Kepler va donner un modèle héliocentrique permettant ce calcul. Utilisant les observations de Tycho-Brahe, il va constater que les planètes n'ont pas une vitesse uniforme et que leurs mouvements sont liés.

Ce seront les lois de Kepler dont la troisième nous dit que si l'on connaît une distance et les périodes de révolution des planètes dans le Système solaire, alors on connaît toutes les distances (encadré). Il ne reste plus qu'à mesurer les positions de la planète la plus proche de la Terre (Mars ou Vénus) pour connaître enfin la distance Terre-Soleil. Ce sera le défi relevé par les astronomes du XVIII<sup>e</sup> siècle.

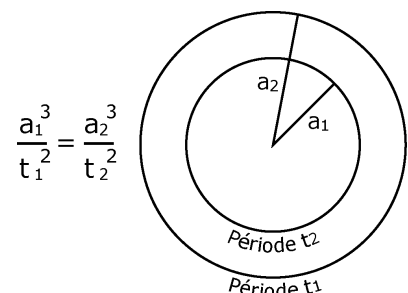


**Fig.4.** Cadran mural de Tycho Brahe. Avec ces grands instruments sans optique, la précision est de l'ordre de la minute d'arc.

### La troisième loi de Kepler

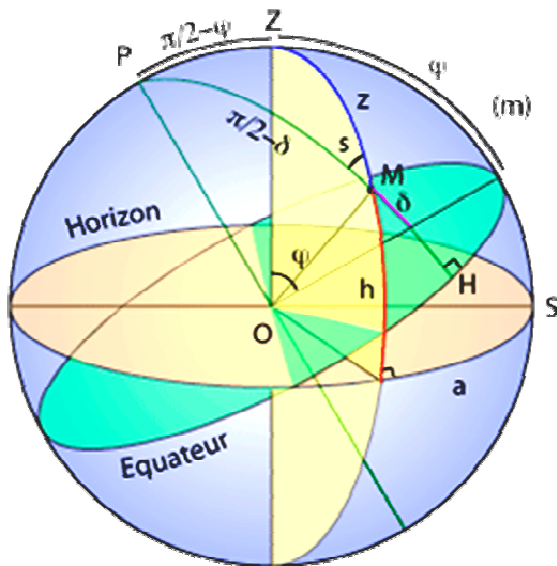
Le cube du demi-grand axe de l'orbite d'une planète divisé par le carré de la période de révolution est une constante pour toutes les planètes du Système solaire (égale à 1 si le demi-grand axe est mesuré en « unité astronomique » et la période de révolution en années).

Avec cette formule on voit qu'il suffit de connaître une seule distance dans le Système solaire (la distance à la planète la plus proche par exemple) et de connaître les périodes de révolution, pour connaître toutes les distances et donc la distance Terre-Soleil ou « unité astronomique ».



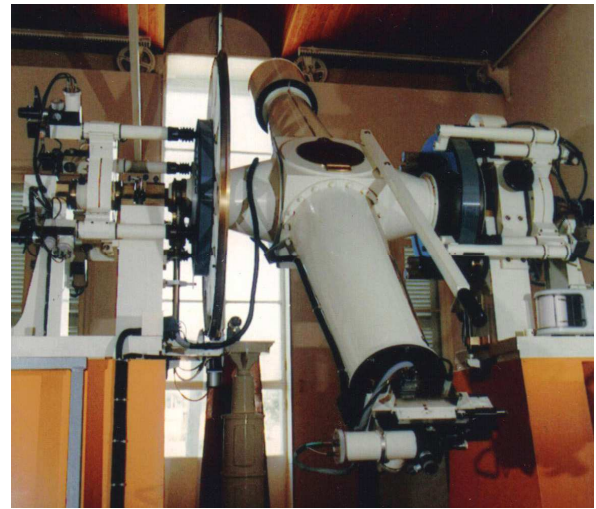
## La mesure des angles

Revenons un instant sur le principe de la mesure des angles sur la sphère céleste. Comme la sphère terrestre, la sphère céleste peut être décrite par des coordonnées sphériques (longitude et latitude que les astronomes désigneront par « ascension droite » et « déclinaison ») dont le pôle sera la projection du pôle terrestre sur le ciel (proche de l'Étoile polaire) et l'équateur la projection de l'équateur terrestre sur le ciel. L'origine sur l'équateur sera fixée au point vernal, lieu où se trouve le Soleil à l'équinoxe quand il passe de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord. Le problème, c'est que ces références ne sont pas écrites sur le ciel et qu'il n'est pas facile de s'y rattacher. En un lieu donné, on n'observe facilement que le zénith et l'horizon et on mesure donc des azimuts et des hauteurs : azimut par rapport à la direction du sud facilement montrée par la culmination des astres et hauteur mesurée au-dessus de l'horizon. Comment relier cet azimut et cette hauteur (qui sont locales) aux coordonnées sphériques « équatoriales » (universelles) ascension droite et déclinaison ?

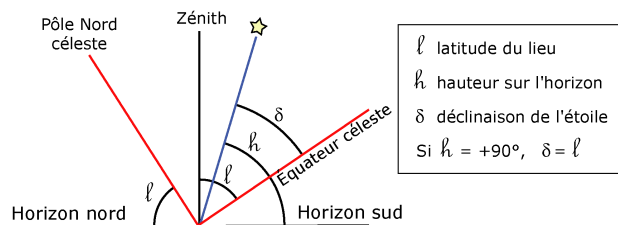


**Fig.5.** Les systèmes sphériques local et équatorial. Le passage de l'un à l'autre nécessite de résoudre le triangle sphérique PZM pour passer de la hauteur  $h$  à la déclinaison  $\delta$ .

La figure 5 montre les deux systèmes imbriqués qui rendent nécessaire la résolution d'un triangle sphérique, calcul compliqué sans ordinateur. Dès le XVII<sup>e</sup> siècle, on comprit que le plus simple était de mesurer la hauteur d'un astre lors de son passage au sud (culmination au méridien du lieu) alors simplement reliée à la déclinaison (figures 6a et 6b). Les mesures furent nombreuses et peu à peu les étoiles furent cataloguées et le mouvement des planètes mieux compris.



**Fig.6a.** Lunette méridienne de l'observatoire de Bordeaux. On peut mesurer la hauteur de l'astre et l'instant précis du passage dans le plan méridien. La précision obtenue sur la position de l'objet est inférieure à  $0,1''$ .



**Fig.6b.** Dans le plan méridien, le triangle sphérique de la figure 5 devient une ligne dans ce cas particulier et la transformation des coordonnées locales (azimut et hauteur) en coordonnées équatoriales (ascension droite et déclinaison) est très simple :

hauteur = déclinaison -  $(90^\circ - \text{latitude})$  donc déclinaison = hauteur -  $90^\circ + \text{latitude}$

azimut = 0 donc l'ascension droite est égale au temps sidéral local ou angle horaire de l'origine des ascensions droites (point vernal). Le temps sidéral local est une fonction du temps connue donnant la position de la Terre autour de son axe.

## La mesure du Système solaire et de l'Univers

Les mesures astrométriques avaient donc pour but premier de mesurer des parallaxes dans le Système solaire afin que la mesure de distance d'une des planètes Mars ou Vénus puisse donner la fameuse distance Terre-Soleil, unité fondamentale de la mesure de l'Univers. Les premières mesures positives de la parallaxe de Mars eurent lieu depuis Paris et Cayenne dès le XVII<sup>e</sup> siècle. Pour Vénus, les mesures angulaires étaient plus difficiles du fait de la phase de la planète (qui apparaît régulièrement sous forme de croissant comme la Lune).

Par contre, la planète Vénus passe régulièrement devant le disque solaire : Halley et Delisle proposèrent des méthodes de détermination de la parallaxe de Vénus sans mesure angulaire. Il suffisait de



mesurer la durée d'un passage de Vénus devant le disque solaire depuis deux lieux éloignés sur Terre. Ce phénomène est rare (deux par siècle) mais les deux passages qui se produisirent au XVIII<sup>e</sup> siècle donnèrent lieu à quantité d'expéditions lointaines et d'observations. Les bons résultats obtenus permirent d'avoir enfin une bonne estimation de la taille du Système solaire et de la fameuse distance Terre-Soleil, si longtemps cherchée<sup>1</sup>.

Cette distance ouvrait aussi la porte sur l'Univers. Si la parallaxe horizontale diurne a pour base la Terre, on pouvait utiliser l'orbite terrestre à six mois d'intervalle pour mesurer la parallaxe des étoiles, dite « parallaxe annuelle » avec une base très importante. Ainsi, les étoiles, qui « étaient très loin de la Terre » purent avoir une distance connue. Une fois encore, ce fut la précision des instruments qui limita le nombre de détermination possible : la plus proche étoile n'avait une parallaxe ne dépassant pas la seconde d'arc. Le progrès des mesures astrométriques associé à d'autres méthodes reposant sur les caractéristiques physiques des étoiles permit d'estimer la taille de notre galaxie et aussi de l'univers visible.

## L'astrométrie par rattachement

Le besoin en précision toujours accrue a nécessité l'utilisation de méthodes plus performantes que l'observation d'un passage au méridien qui limitait les observations d'un astre à une par jour. La technique photographique ou l'imagerie électronique se pratique au foyer d'un télescope où l'on récupère l'image d'une partie du ciel, un « champ » dont la dimension est mesurée en angle sur le ciel. La largeur angulaire de ce « champ » dépend bien entendu des caractéristiques de l'instrument utilisé, en particulier de sa focale.

Une longue focale fournira un « petit champ » (effet de zoom) avec peu d'étoiles tandis qu'une courte focale donnera un « grand champ » de plusieurs degrés-carrés avec beaucoup d'étoiles. Sur l'image ainsi obtenue par le télescope, on mesure des distances en millimètres qu'il va falloir transformer en angle sur le ciel. Un millimètre correspondra à un angle d'autant plus petit que la distance focale du télescope utilisé est grande. Sur ces images, on aura l'objet observé entouré des étoiles du champ. Le nombre d'étoiles visibles sera d'autant plus grand que le diamètre de l'optique du télescope est grand ou que le récepteur est sensible. Pour étalonner notre champ et trouver la position angulaire d'un

astre inconnu, nous allons le rattacher aux étoiles du champ dont nous connaissons la position grâce à des catalogues d'étoiles. Ce processus, appelé "réduction astrométrique du champ", va permettre de calculer l'échelle de l'image qui transformera des millimètres en unités d'angle, de déterminer l'orientation qui indiquera les directions *nord* et *est* par rapport à l'équateur céleste et aussi de corriger les distorsions dues aux imperfections de l'optique du télescope et à la projection de la sphère céleste sur le plan focal (figure 7). Cela nous conduira aux positions en ascension droite et déclinaison cherchées dans le même repère que celui des étoiles du catalogue utilisé (figures 8a et 8b).

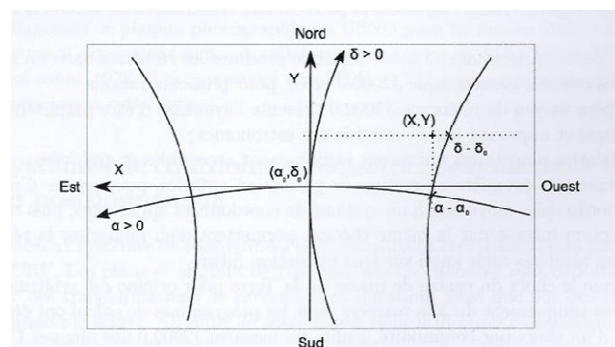


Figure 2.1 - Représentation tangentielle (plane) d'un champ sphérique.

$$X = \frac{\cos \delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

$$Y = \frac{\sin \delta \cdot \cos \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

Fig.7a et 7b. La projection gnomonique

L'image de la sphère céleste est une sphère alors que notre récepteur est plan (à gauche) : la projection déforme l'image et une transformation (à droite) permet de passer du système plan au système sphérique (et vice-versa).

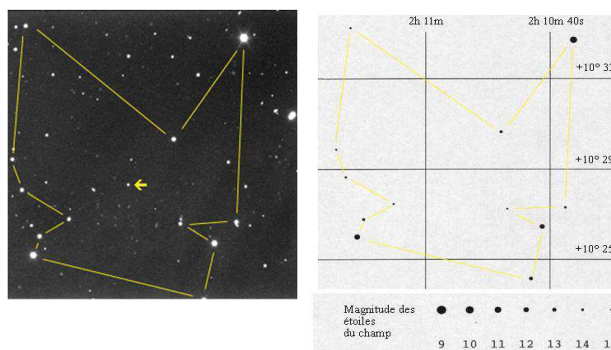


Fig.8a et 8b. Une image d'une portion de ciel contenant un astre dont on veut mesurer la position astrométrique (ascension droite et déclinaison) et la même zone du ciel extraite d'un catalogue d'étoiles. L'objet inconnu va être « rattaché » aux étoiles du catalogue observées en même temps que lui et on obtiendra ainsi son ascension droite et sa déclinaison D.

<sup>1</sup> Voir par exemple les Cahiers Clairaut de 2004.

La précision de ce type d'observation va dépendre de la qualité de l'optique du télescope, du nombre d'étoiles cataloguées du champ et bien entendu de la précision du catalogue utilisé. Les catalogues modernes contiennent beaucoup plus d'étoiles que les premiers catalogues avec une précision de position des étoiles et un rattachement à un système de référence bien meilleurs. La construction des catalogues est le résultat d'un long et lent travail de compilation de mesures de plaques photographiques et d'observations méridiennes. Le catalogue Gaia qui sera publié dans les années à venir sera le résultat des observations d'un satellite astrométrique qui baliera le ciel durant 5 ans sans référence aux anciens catalogues. Sa précision attendue est de l'ordre de quelques millièmes de secondes d'arc alors que les meilleurs catalogues actuels n'ont une précision que de 50 à 60 millièmes de seconde d'arc (cf table 1). Avec une telle précision, combien d'astres apparemment immobiles se découvriront un mouvement qui remettra en cause la dynamique de bien des systèmes, particulièrement le système galactique ? De même combien d'astres distants dont la parallaxe n'est pas mesurable actuellement auront leur distance à la Terre enfin déterminée ?

Les catalogues astrométriques d'étoiles de référence actuels					
Année	Nom	Nb d'étoiles	Mag. limite	Précision en mas	Commentaires
1997	Hipparcos	120 000	12.4	< 0.78	Télescope spatial
2000	Tycho 2	2 500 000	16	< 60	À partir des observations Hipparcos
2001	6SC II	19 000 000		360	À partir de plaques de Schmidt pour le guidage du télescope spatial HST
2003	USNO B1	1 milliard	21	200	Plaques de Schmidt
2004	UCAC 2	48 000 000	7.5 → 16	20 → 70	scans
2004	Bright stars	430 000	< 7.5		Étoiles brillantes à partir des observations du satellite Hipparcos
2005	Nomad	1 milliard			compilation
2003	2MASS	470 000 000	16	60 → 100	Catalogue infrarouge
2015	GAIA	1 milliard	20	< 0.01 mas	À venir

**Table 1.** Les principaux catalogues astrométriques d'étoiles de référence.

Le nombre d'étoiles disponibles dans un catalogue est certes très important puisqu'on va pouvoir se rattacher plus facilement à ces étoiles mais la précision est tout aussi importante. Un grand champ va permettre d'obtenir plus d'étoiles de catalogue sur son observation mais va contenir plus de distortions. Une observation astrométrique est un compromis entre le besoin de précision et la nature du télescope utilisé. Le catalogue UCAC est actuellement le meilleur choix en attendant Gaia.

## L'ère spatiale

L'arrivée de l'ère spatiale au XX<sup>e</sup> siècle a bouleversé nos moyens d'observation : les télescopes purent être mis en orbite (comme Gaia dont nous avons vu la précision à la fin du paragraphe précédent) et les sondes spatiales orbitant autour des planètes purent elles-mêmes observer les positions astrométriques de ces planètes avec une très forte précision (figure 9).



**Fig.9.** Les satellites de Saturne Encelade et Dione vus par la sonde Cassini : pour obtenir des positions astrométriques de ces corps, on utilise les étoiles présentes sur l'image dont la position est donnée par les catalogues d'étoiles. C'est le même principe qu'avec des observations réalisées depuis le sol terrestre.

La radio-science permet des avancées considérables : toutes les observations décrites ci-dessus utilisent la lumière visible et des télescopes optiques qui focalisent la lumière sous forme d'une image mesurable. Les sondes font de même mais il est cependant possible d'observer différemment dans d'autres gammes de longueurs d'onde. La position des sondes est très bien déterminée à partir de puissants radiotélescopes qui les suivent en permanence. Lorsque ces sondes sont en orbite autour d'un corps du système solaire, il suffit d'appliquer les lois de Kepler et en déduire la position du centre de masse sonde-planète qui se confond avec le centre de masse de la planète. Aucun autre système d'observation de la planète ne peut avoir une telle précision. Depuis la Terre, il est aussi possible d'effectuer des tirs radar sur les astres proches (astéroïdes ou Mars). La mesure de la distance Terre-Soleil se fait, depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle, grâce à la mesure de la distance Terre-Mars, d'abord par radar et aujourd'hui par radio avec les sondes posées sur la surface de la planète Mars.