Mesurer des distances dans le système solaire

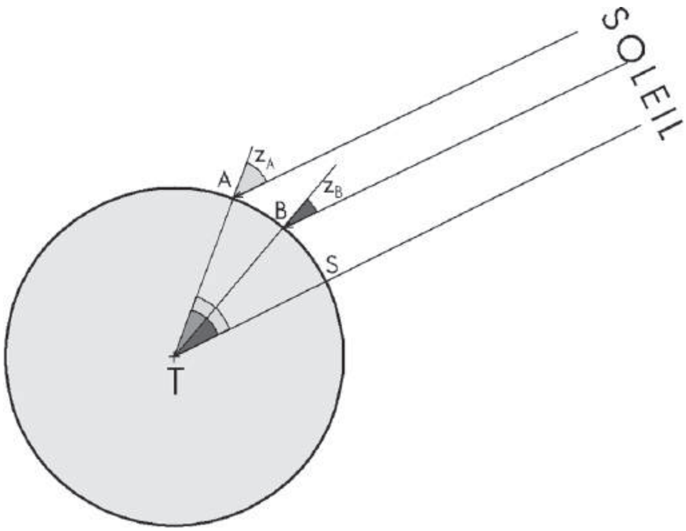
Pierre Causeret(*)

Après avoir rappelé les principales méthodes pour mesurer des distances dans le système solaire (dont plusieurs sont réalisables avec des élèves), l'atelier a consisté à déterminer la distance du Soleil à partir de photos du passage de Vénus réalisées le 8 juin 2004 depuis Dijon et l'île de La Réunion.

Première partie : les distances dans le système solaire

1. Mesure du rayon de la Terre

Cette mesure est à la base de presque toutes les mesures de distances qui suivent. La méthode est connue sous le nom de méthode d'Ératosthène et est au programme de sciences physiques de seconde.
Elle peut être réalisée depuis deux villes quelconques situées approximativement sur le même méridien et distantes au minimum d'une centaine de km.



Mesures réalisées le 10 septembre 2000 à 13h37 (midi solaire local)
Depuis Esbarres (ville A) : $z_A = 47,72°$.
Depuis Mâcon (ville B) : $z_B = 48,45°$.

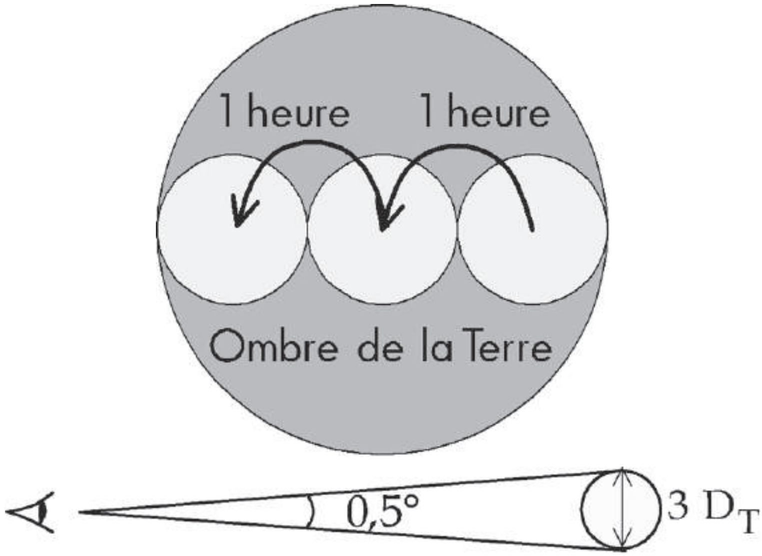
$\widehat{ATB} = z_A - z_B = 0,73°$.
Distance AB lue sur une carte : 90 km.

(*) Comité de Liaison Enseignants et Astronomes.

Circonférence de la Terre : 90 / 0,73 × 360 ≈ 44 380 km.
Rayon de la Terre : 44 380 / (2π) ≈ 7060 km.
Le résultat est trop grand d'environ 11% mais les deux villes sont proches et surtout ne sont pas sur le même méridien.
Une technique précise de mesure de la hauteur du Soleil est décrite sur le site du CLEA à l'adresse http://www.ac-nice.fr/clea/Erat2000.html

2. Distance de la Lune et durée d'une éclipse

La Lune avance de son diamètre apparent (0,5°) en une heure.
La durée maximale de la phase totale d'une éclipse de Lune est de 2 heures.
On peut donc mettre 3 lunes dans l'ombre de la Terre.
Si on considère l'ombre de la Terre cylindrique, le diamètre de la Terre est égal au diamètre de l'ombre. Pour Aristarque : Diamètre de la Lune ≈ 1/3 du diamètre de la Terre.

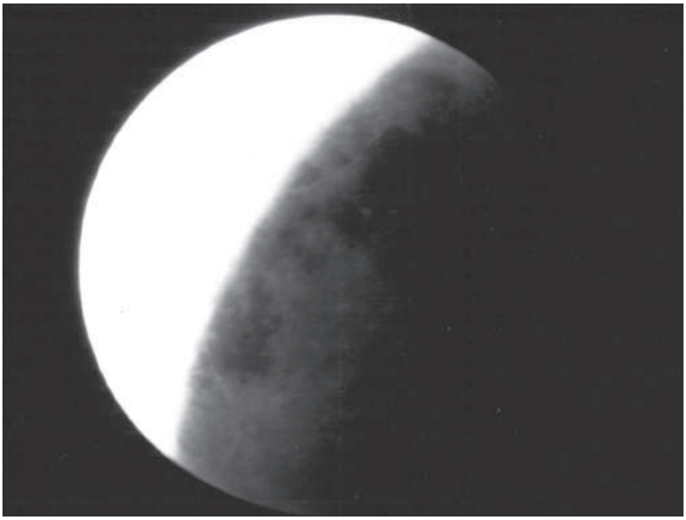


Connaissant le diamètre apparent de la Lune de 0,5°, on en déduit alors que la Lune est située à environ 40 diamètres terrestres.

En réalité, la durée d'une éclipse est un peu plus courte et le diamètre de l'ombre est inférieur à 3 diamètres lunaires. De plus, l'ombre de la Terre est conique. On peut montrer que le diamètre de la Terre est égal au diamètre de son ombre à la distance de la Lune augmenté d'un diamètre lunaire. On trouve ainsi que le diamètre de la Terre vaut environ 3,7 fois celui de la Lune et que la distance Terre Lune est de 30 diamètres terrestres seulement.

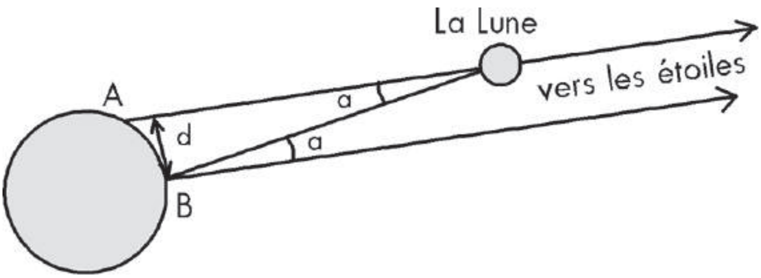
On peut utiliser une méthode analogue à partir d'une photo d'éclipse partielle de Lune.

Une construction géométrique simple (à partir de médiatrices de cordes ou de tangentes) permet de reconstituer le disque ombre de la Terre. On trouve alors que son diamètre vaut environ 2,5 fois le diamètre de la Lune.
Les mêmes considérations que dans le paragraphe précédent nous donnent un diamètre terrestre égal à 3,5 diamètres lunaires et une distance de la Lune égale à 33 diamètres terrestres, soit un peu plus de 400 000 km.



3. Distance de la Lune et parallaxe

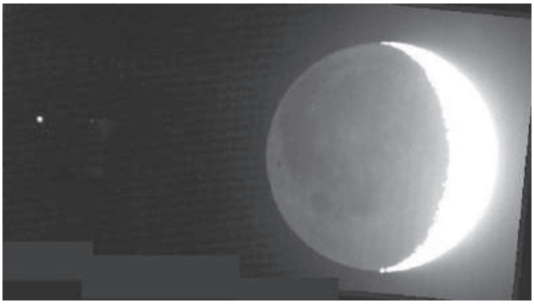
Principe :
Vue depuis deux points éloignés de la Terre, la Lune n'a pas la même position par rapport au fond d'étoiles lointaines. La mesure de l'angle *a* et la connaissance de la distance entre les deux points d'observation permettent de déterminer la distance de la Lune.



En 1751, les astronomes Lalande à Berlin et La Caille au Cap effectuent la première mesure précise de la parallaxe lunaire.

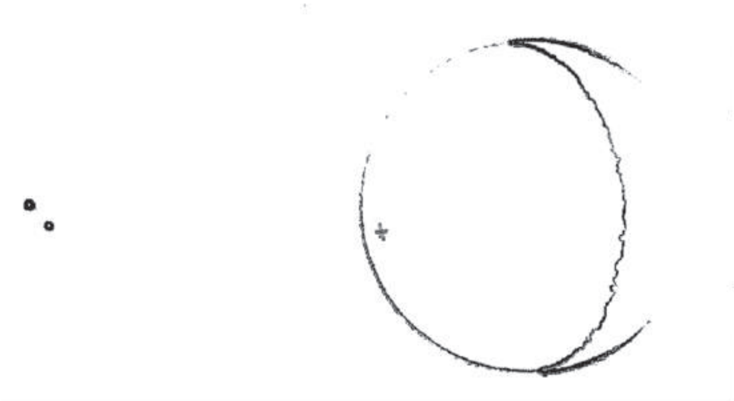
Exemple de mesures réalisées avec des élèves : la Lune a été photographiée le 12 décembre 1999 à 18h TU à proximité de la planète Mars (le point lumineux à gauche de chaque photo). On considère que la planète est suffisamment lointaine pour servir de toile de fond.

Depuis Lorgues (Var) 6,32° E et 43,48° N

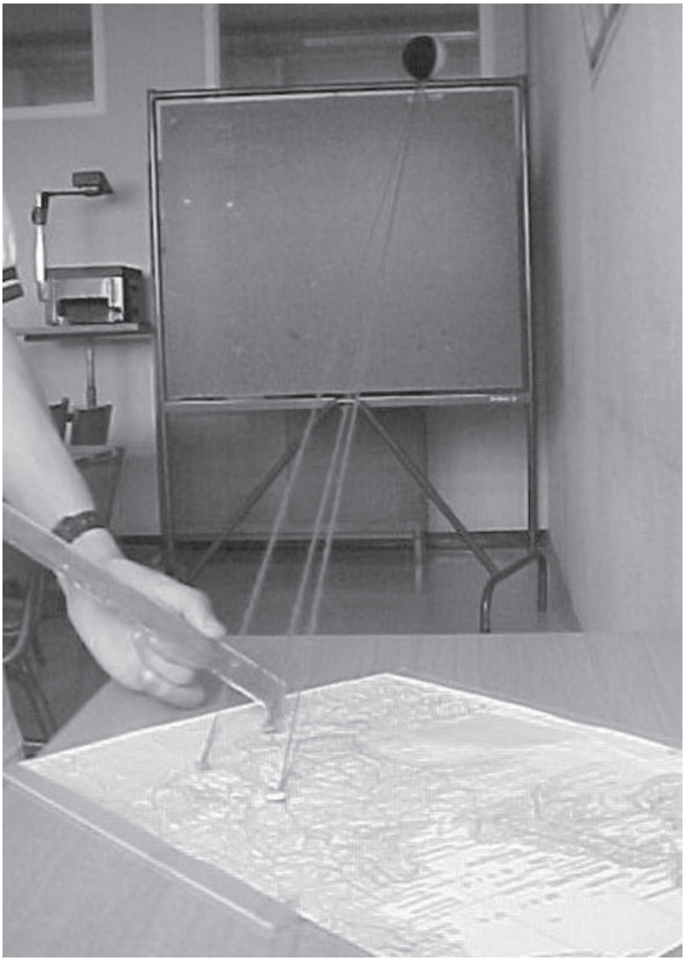


Depuis Esbarres (Côte d'Or) 5,22° E et 47,10° N

Superposition des deux lunes des photos ci dessus. On observe le déplacement relatif de Mars par rapport à la Lune de 0,05°.

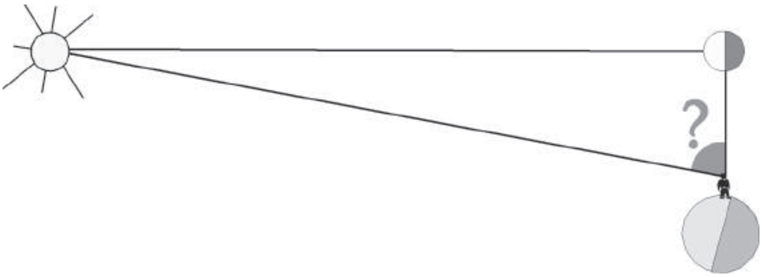


À partir des deux photos ci-dessus, superposées à gauche, on a mesuré le déplacement a : on a trouvé le dixième du diamètre apparent de la Lune, soit 0,05°.
Une maquette a permis de déterminer la distance d : 320 km (photo ci-dessous).
Le calcul donne alors une distance de la Lune de 367 000 km.
Elle était en réalité de 400 000 km ce jour-là. L'erreur est inférieure à 10%.



4. Distance du Soleil et premier quartier

Cette méthode, imaginée par Aristarque, consiste à mesurer l'angle formé par les directions de la Lune et du Soleil au premier (ou au dernier) quartier.



Cet angle est en réalité très proche de l'angle droit (89,86°) d'où la difficulté de la mesure. Il faudrait déterminer l'instant précis du Premier Quartier, ce qui est difficile visuellement, et même tenir compte de la réfraction atmosphérique.

Cette méthode permet néanmoins de montrer que le Soleil est beaucoup plus éloigné que la Lune.

5. Parallaxe de planètes proches

On connaît le plan du système solaire depuis Copernic et encore plus précisément depuis Kepler (voir encadré). Il ne manque que l'échelle. Celle-ci peut être obtenue à partir de n'importe quelle mesure de distance dans le système solaire. Toutes les autres distances peuvent ensuite être calculées.

En 1672, Richer et Cassini ont mesuré la distance de Mars par la méthode de la parallaxe. Ils en ont déduit la distance du Soleil, 130 millions de nos kilomètres.

En 1931, l'astéroïde Éros est passé à proximité de la Terre, à 22 millions de km seulement. La mesure de cette distance a donné 150 000 000 km pour la distance du Soleil.

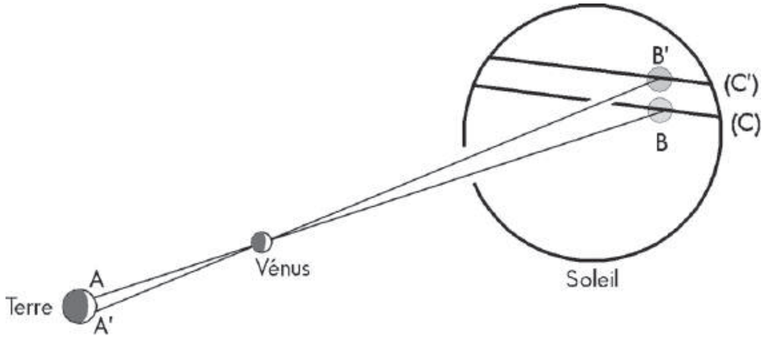
La troisième loi de Kepler
Elle relie la période de révolution T d'une planète au demi grand axe de son orbite a par la relation $\frac{T^2}{a^3}$ = constante.
La mesure de la distance d'une seule planète permet de calculer cette constante p puisque l'on connaît T. On peut en déduire ensuite le demi-grand axe de l'orbite de n'importe quelle autre planète à partir de sa période de révolution.

6. Passage de Vénus

Un passage de Vénus (ou transit) devant le Soleil est relativement rare, le plan de l'orbite de Vénus étant incliné de 3,4° par rapport au plan de l'orbite terrestre. Depuis 1716, année où Edmund Halley développa cette méthode, il n'y en a eu que cinq (en 1761, 1769, 1874, 1882, 2004). Les prochains auront lieu les 6 juin 2012 et 10 décembre 2117.

Aux XVIII^{e} et XIX^{e} siècles, à chacun de ces passages, des équipes d'astronomes se sont déplacées sur toute la Terre pour mesurer la distance du Soleil. Lors du transit de 1874, 6 expéditions furent organisées par des français dont une au Japon confiée aux astronomes J. Janssen et F. Tisserand. Janssen filma ce transit avec un revolver photographique de sa conception.

Le principe :
Pour l'observateur A, Vénus semble être sur le disque solaire en B. Quand elle tourne autour du Soleil, on la voit décrire la corde (C).
Même chose pour A′, qui verra Vénus décrire la corde (C′), plus courte. La durée du passage de Vénus vu par A est supérieure à la durée mesurée par A′. Ces mesures permettront de calculer BB′ (ou plutôt l'angle $\widehat{BAB'}$) en minute d'arc.



D’autre part, la mesure de la base AA′ en km nous donne par un calcul simple BB′ en km puisque l’on connaît le rapport des distances de Vénus et de la Terre au Soleil. On déduit ensuite de ces deux résultats la distance Terre-Soleil en km. L’intérêt de cette méthode est qu’il faut mesurer des temps de passage et non de très petits angles comme pour la parallaxe, et cela semble plus facile.
Dans la pratique, les résultats n’ont pas été très bons, les instants des contacts étant difficiles à déterminer.

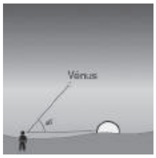
7. Autres méthodes

On a utilisé un écho radar sur la Lune en 1946, sur Vénus en 1961, un écho laser sur la Lune depuis 1969. La mesure du temps que met la lumière à faire l’aller et retour donne immédiatement la distance. La précision est de l’ordre du cm pour la Lune et du km pour les planètes.
On arrive maintenant à obtenir des mesures très précises pour la distance Terre Soleil en mesurant la période d’un pulsar situé assez près du plan de l’orbite terrestre. Quand la Terre s’approche du pulsar, la période est diminuée et elle est augmentée quand la Terre s’en éloigne (effet Doppler-Fizeau). La mesure précise de ces périodes donne la vitesse de la Terre et on en déduit sa distance au Soleil.

Deuxième partie : calcul de la distance du Soleil à partir de deux photos du 8 juin

1. Vue depuis la Terre, Vénus ne s’éloigne jamais à plus de 46° du Soleil. C’est ce qu’on appelle son élongation maximale.

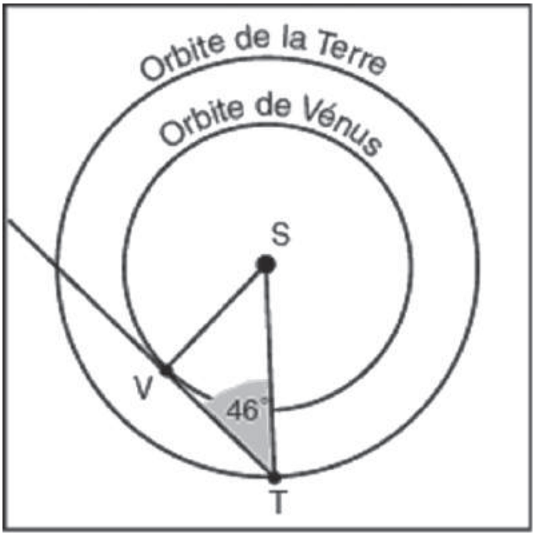
Le 29 mars 2004, l’angle entre la direction du Soleil et celle de Vénus était maximal et mesurait 46°.



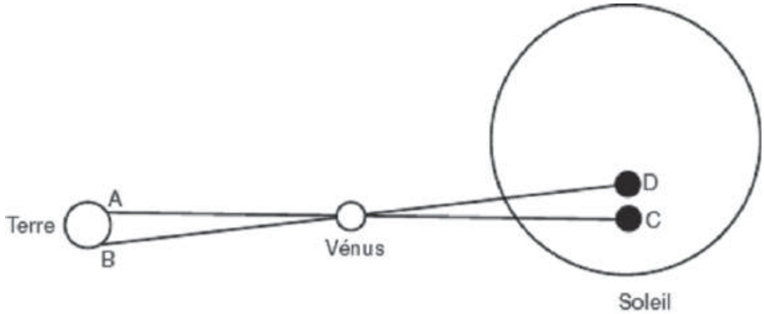
On considère que les orbites de la Terre et de Vénus sont des cercles centrés sur le Soleil.

a. Sur ce schéma, on place Vénus sur son orbite pour que l’angle $\widehat{STV}$ soit maximal.

b. Sachant que cet angle vaut alors 46°, on en déduit $\dfrac{SV}{ST} = \sin 46° \approx 0{,}72$.

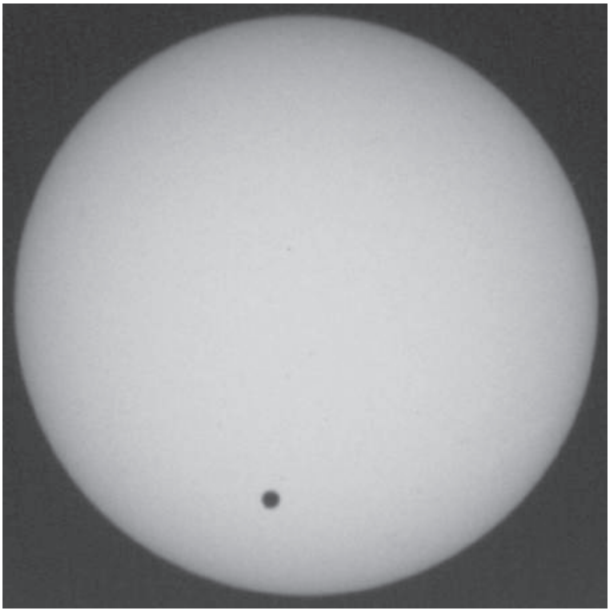


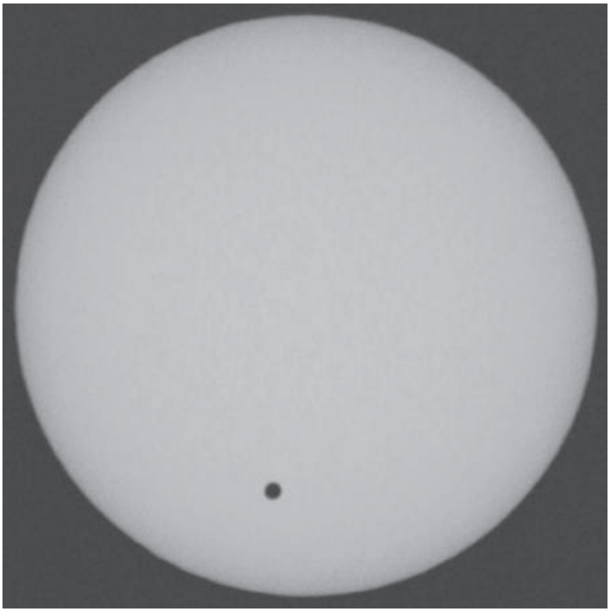
2. Le 8 juin 2004, on a observé le passage de Vénus devant le Soleil depuis deux lieux éloignés, Dijon (A) et La Réunion (B).
Ces deux observateurs voient Vénus devant deux points différents du Soleil, C et D.



Les deux photos de la page suivante ont été prises exactement à la même heure (8h30 en Temps Universel) et orientées de la même manière (le nord en haut).

On superpose les deux photos, on mesure l'écartement entre les deux positions de Vénus et on compare au diamètre du disque solaire.
Sachant que le diamètre apparent du Soleil était de 0,525° ce jour là, on trouve que les deux positions de Vénus sur le Soleil sont distantes de 0,008° environ.



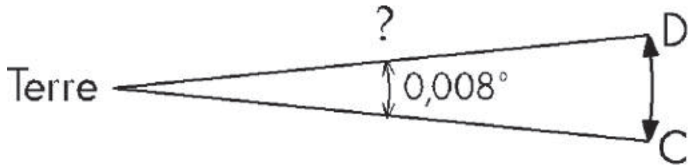


3. On a matérialisé sur un globe terrestre la direction du Soleil observé depuis La Réunion et depuis Dijon à l'heure des photos.
Sachant que le diamètre de la Terre est de 12 740 km, on calcule l'écartement entre les deux lignes de visée considérée comme parallèles : on obtient 8 200 km environ.

(Pour faire la photo de droite, le photographe s'est placé de telle manière que la ligne de visée soit perpendiculaire au plan contenant les deux bâtonnets).

4. On considère (AB) et (CD) parallèles.
On sait que SV / ST = 0,72 et que AB = 8 200 km.
Un peu de Thalès et on trouve CD ≈ 21 000 km.

5. Il reste à trouver à quelle distance on est du Soleil pour voir un segment de 21 000 km sous un angle de 0,008°.
Plusieurs méthodes sont possibles. On peut utiliser la trigonométrie, des radians ou simplement des proportions en assimilant le segment de 21 000 km à un arc de cercle centré sur l'observateur :



0,008° $\rightarrow$ 21 000 km. En divisant par 0,008 puis en multipliant par 360 :
360° $\rightarrow$ 945 000 000 km. En divisant par 2π, on obtient une distance de 150 000 000 km environ.
Si compare à la distance officielle (elle était de 151 800 000 km ce jour-là) ce n'est pas mal.
Étant donnée la précision de l'orientation des photos, de la mise à l'échelle et des mesures, on peut admettre que l'incertitude sur les calculs ne dépasse pas 20%.

Conclusion : on peut affirmer que la distance Terre Soleil est comprise entre 120 et 180 millions de km.
Ce n'est pas très précis, mais obtenir un ordre de grandeur correct de la distance Terre Soleil, c'est déjà bien !

La fiche pédagogique complète sur le calcul de la distance du Soleil à partir des images du passage de Vénus est parue dans le n° 108 des Cahiers Clairaut, la revue du Comité de Liaison Enseignants Astronomes.
Vous trouverez de nombreux renseignements sur leur site : www.ac-nice.fr/clea