MESURE SIMPLE DE L'EXCENTRICITE DE L'ORBITE TERRESTRE UNE EXPERIENCE POUR LA CLASSE

La plupart des manuels de physique représentent l'orbite terrestre par des dessins montrant une ellipse de grande excentricité. Cela suggère une importante variation de la distance entre le Soleil et la Terre au cours de l'année. En réalité, la valeur de l'excentricité, $e = c/a$, est très faible : $e = 0{,}01675$. [On rappelle que a est le demi grand axe de l'ellipse, b, le demi petit axe, c est la distance focale]. Cette valeur est si faible que cette ellipse ne peut se distinguer d'un cercle : en effet, $b/a = 1{,}00014$). Peut-on imaginer une procédure qui permette de mesurer e par une expérience de classe ?

Une première idée serait de prendre une succession de photos du Soleil tout au long de l'année, au cours de laquelle le diamètre angulaire du disque solaire varie d'environ 3%. Un appareil photo classique de focale 50 mm donne une image du Soleil dont le diamètre sur le film est de 0,4 mm. Espérer déterminer l'excentricité avec une précision de 10% à partir de telles images implique des mesures de différence de dimension à mieux que le micromètre. Cette procédure ne peut donc pas marcher. Il faudrait utiliser un appareil photo de beaucoup plus grande focale, ou un télescope, et être sûr que le grossissement reste bien le même tout au long de l'année. On pourrait envisager aussi de s'affranchir de ces difficultés en mesurant le diamètre du disque solaire grâce au mouvement diurne de la Terre. Il suffirait alors de mesurer sur un écran le déplacement de l'image du Soleil donnée par un télescope fixe. Le diamètre angulaire du Soleil se déduit du temps que l'image met à décrire une marque dessinée sur l'écran, soit environ 2 minutes. La détermination de la variation angulaire à mieux que 10% implique que l'on mesure la durée du passage avec une précision de 0,2 seconde. Cela n'est pas facile. En outre le bord du disque n'est pas facile à déterminer, à cause de son assombrissement. La mesure de l'excentricité de l'orbite terrestre ne semble donc pas si simple.

Il y a cependant une autre façon de la faire ; et nous allons voir que cette méthode fournit un résultat avec une précision de quelques pour cent sans demander d'équipement technique compliqué. Elle repose sur un phénomène qui était déjà bien connu des anciens grecs : les saisons, dont le début et la fin sont donnés par les équinoxes et les solstices, n'ont pas la même durée. Il suffit de consulter un calendrier pour voir que cette différence de durée atteint 5 jours. Dans les temps anciens, on pensait que c'était le Soleil qui se déplaçait autour de la Terre, elle-même au repos. On interprétait donc ces déviations comme étant dues à l'excentricité de l'orbite du Soleil. Nous plaçant dans la vision copernicienne héliocentrique, nous comprenons que cet effet provient de l'excentricité des orbites elliptiques des planètes, découverte par Kepler. Regardez la figure 1 : elle montre la déviation périodique de la position du Soleil, telle qu'on l'observe depuis la Terre, en comparaison avec un mouvement circulaire. On a représenté sur le dessin 4 positions de la Terre, séparées successivement d'un quart d'année. A la position Pe du périhélie et à la position Ap de l'aphélie, il n'y a pas de déviation. Par contre, si l'observateur terrestre est en B ou en C, il voit le Soleil dans une direction qui diffère de l'angle $\Delta\Phi_E$ du cas d'une orbite circulaire. Du fait du mouvement diurne, il en résulte une différence de temps. Quand la Terre est en Ap ou en Pe, le Soleil passe au méridien à midi. Par contre, quand la Terre est en B, le Soleil n'est pas encore au méridien à midi ; on peut dire que le Soleil est en retard.

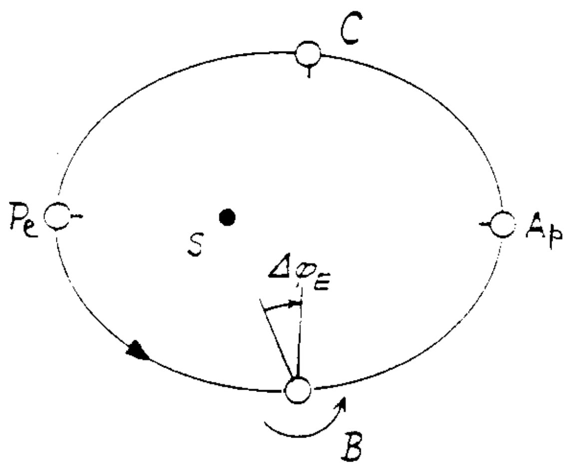


figure 1

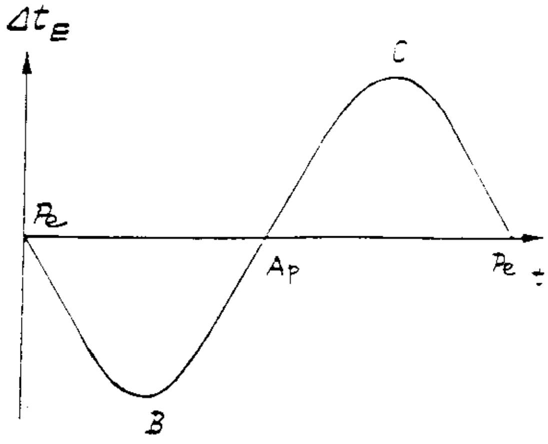
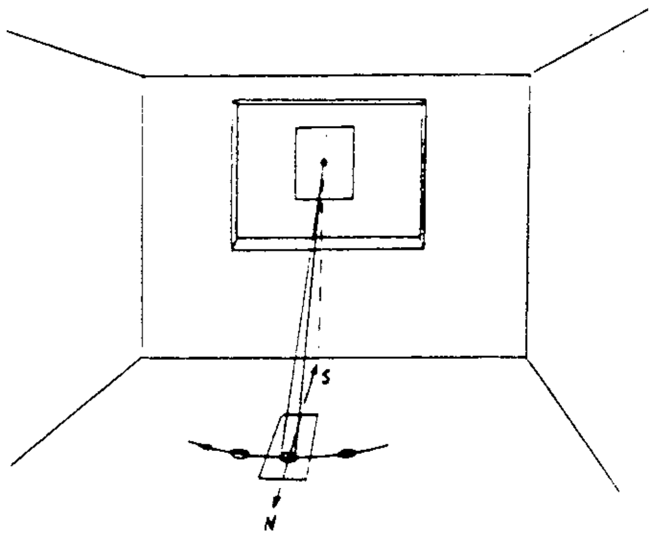


figure 2

En C, le Soleil passe au méridien avant midi. La figure 2 montre la variation de ce retard ou de cette avance au long de l'année. Nous avons maintenant de très bonnes horloges, qui mesurent le déroulement continu du temps avec précision. Nous pouvons donc mesurer aisément ces différences de "temps solaire" en utilisant une échelle de temps indépendante.

On peut montrer facilement cette variation du temps solaire dans la salle de classe en observant un pinceau de lumière solaire à travers un petit trou dans un carton, fixé sur une fenêtre orientée au sud. Il suffit de noter l'heure à laquelle le centre de l'image du Soleil traverse une ligne sur le sol (figure 3).

figure 3



On trouve maintenant facilement des horloges bon marché qui donnent l'heure à la précision de la seconde. En effectuant les observations avec soin, on obtient la mesure de l'heure méridienne avec une précision de 3 s. Pas besoin de lentille : seulement un petit morceau de carton. En classe, il suffira de répéter un petit nombre de fois cette mesure simple, au rythme d'une mesure par semaine. On obtient ainsi une déviation de quelques minutes qui suffit à démontrer l'effet. Il n'est pas conseillé de conduire les observations en classe sur une échelle de temps plus longue. Une fois qu'ils ont été convaincus de l'existence de ce décalage temporel par cette courte observation qu'ils ont effectuée eux-mêmes, les élèves pourront aller rechercher les données dans d'autres sources. Il existe une base de données très bon marché et disponible pour tous : un simple calendrier, qui donne l'heure de lever et l'heure de coucher du Soleil, au moins une fois par semaine. Il suffit de prendre la moyenne des deux pour déterminer le midi. On trouve ainsi la déviation indiquée sur la figure 4, qui est "l'équation du temps". On remarque tout de suite que cette courbe n'a pas la même allure que celle de la figure 2. Avec un peu d'imagination, on peut retrouver la courbe attendue dans les deux extrema les plus prononcés, à gauche et à droite. Il est clair qu'un effet supplémentaire, de période double, tel celui indiqué dans la figure 5, s'est superposé au précédent.

figure 4

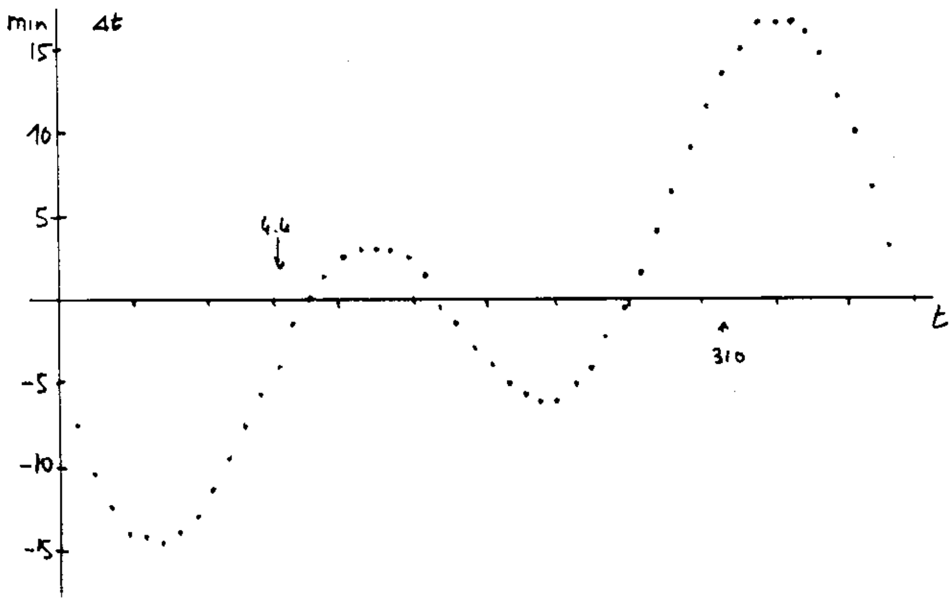
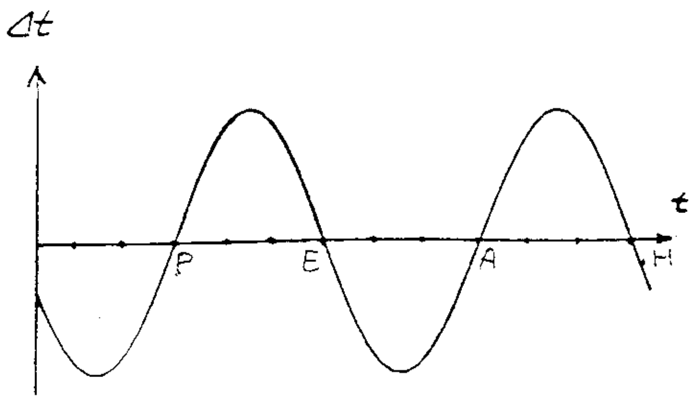


figure 5



Pour trouver l'origine de ce second effet, considérons un cadran solaire classique. Si l'on implante un style vertical sur un sol horizontal, les lignes horaires indiquant des heures rondes ne sont pas équidistantes. Pour qu'elles le soient, il faut orienter le style parallèlement à l'axe de rotation de la Terre et le plan de lecture des heures parallèlement au plan de l'équateur terrestre. On voit alors que la non équidistance est un artefact dû à la projection oblique, quand le cadran solaire est incliné par rapport à l'axe de rotation.

L'inclinaison du plan du plan équatorial de la Terre sur le plan orbital provoque un artefact similaire, en ce qui concerne la période annuelle. Pour l'observateur terrestre, le Soleil ne se déplace pas au long de l'année dans le plan de l'équateur, mais dans celui de l'écliptique, qui est incliné de 23,5° (figure 6). Si le Soleil était animé d'un mouvement uniforme dans le plan équatorial, un observateur situé sur la Terre en rotation diurne, verrait le Soleil passer à son méridien tout au long de l'année à des intervalles de temps égaux. Mais le Soleil, dont on suppose le mouvement uniforme le long de l'écliptique, passe au méridien de l'observateur un peu plus tôt, comme on peut le voir sur la figure 6, quand il est entre P et E. Au contraire, entre E et A, il passe au méridien en retard.

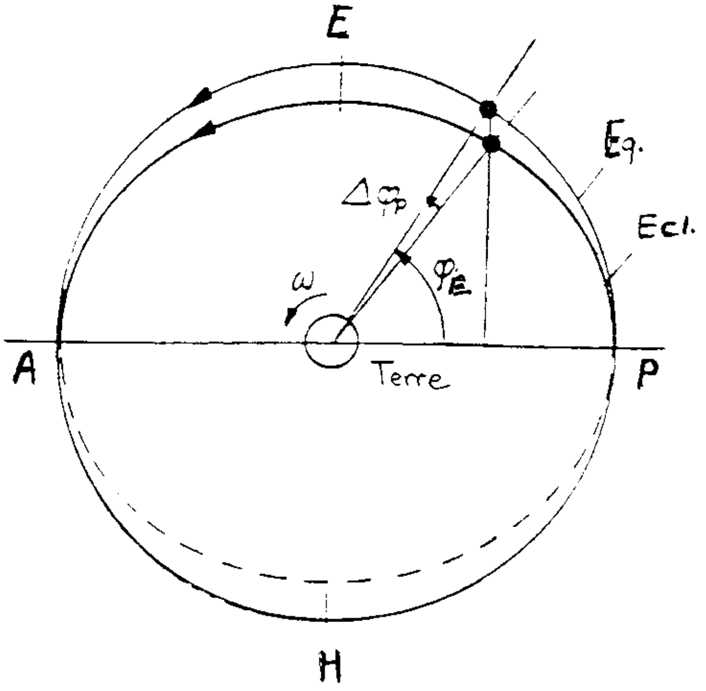


figure 6

L'erreur projetée, $\Delta\Phi_P$ s'annulle 4 fois dans l'année : aux deux équinoxes, P et A, de printemps et d'automne, et aux deux solstices E et H, d'été et d'hiver. Ce sont les débuts de chacune des saisons. Cette fonction $\Delta\Phi_P$ a donc bien la double périodicité que nous recherchions. Des considérations géométriques sur la figure 6 conduisent à :

$$\Delta\Phi_E = \Phi_{AE} - \arctan(\cos 23{,}5° \tan \Phi_{AE})$$

On peut calculer cette fonction et la convertir en différence temporelle Δt, en utilisant la vitesse angulaire de la rotation terrestre, 1° correspondant à peu près à 4 minutes. Puisqu'on connait les dates des équinoxes et des solstices qui correspondent à des zéros, on peut alors retrancher cette fonction des données empiriques de la figure 4. On obtient alors la courbe empirique de la figure 7, qui a le comportement attendu. Les zéros de cette dernière courbe donnent les dates de passage au périhélie et à l'aphélie. On peut apprécier d'avoir ainsi obtenu ces dates, avec des erreurs de moins de 2 jours, par des moyens aussi simples, en se rappelant que la forme de l'orbite terrestre ne diffère pas significativement de celle d'un cercle.

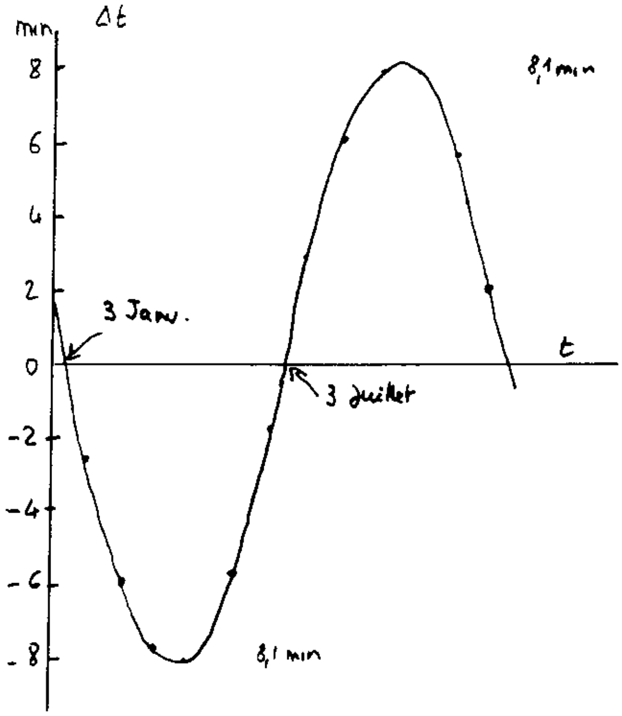


figure 7

Nous pouvons maintenant calculer la valeur numérique de l'excentricité. Considérons le point C de la figure 8 atteint exactement au milieu de l'intervalle de temps entre les passages en Ap et Pe. Du fait de la seconde loi de Kepler, les secteurs elliptiques SApC et SCPe ont la même aire. On peut remplacer le calcul de ces aires par la méthode approchée qui consiste à échanger les deux aires hachurées de la figure 8, ce qui permet d'obtenir deux aires égales qui sont des quarts d'ellipse. Les deux surfaces hachurées sont pratiquement des triangles égaux, si l'on assimile la petite partie courbe à un segment de droite, ce qui est justifié par la faible excentricité. On a alors dans le triangle qui contient l'angle $\Delta\Phi_E$ la relation :

$$\tan \Delta\Phi_E = 2c/p \approx 2e$$

On peut alors transformer $\Delta\Phi_E$ en Δt_E par la relation qui fait correspondre 1° à 4 min. En examinant les figures 7 et 8, on voit que la date du passage au point C est très proche de celle du maximum de la courbe. Il est donc justifié de prendre l'amplitude de la courbe de la figure 7 pour $\Delta\Phi_E$ =, ce qui donne e = 0,01768. La comparaison avec la valeur exacte e = 0,01675, montre une précision de 5% . Si l'on se souvient que nous avons simplement utilisé les heures de lever et de coucher du Soleil du calendrier des Postes, ce résultat est tout à fait satisfaisant.

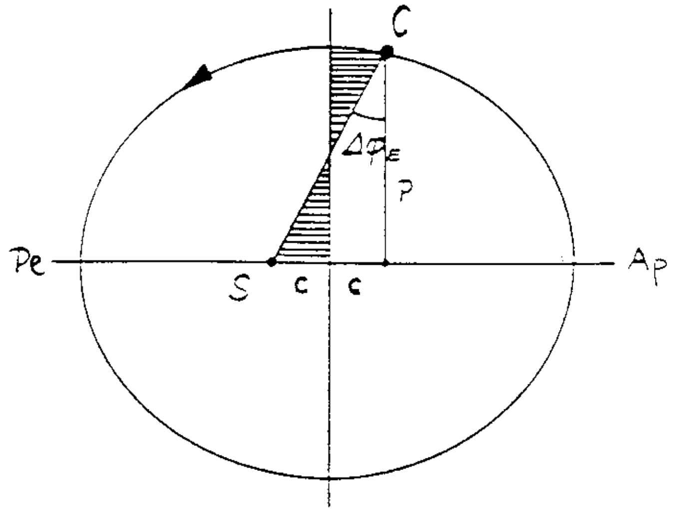


figure 8

Il y a encore une correction, assez évidente, à faire. Les heures de lever du Soleil sont données dans le calendrier pour un lieu précis (en France, Paris), qui n'est en général pas situé sur le méridien central du fuseau qui définit l'heure légale. Il en résulte un décalage de la ligne zéro de la figure 7, vers le haut ou vers le bas. Cet effet a été corrigé sur la figure 7. Mais ce décalage n'est pas important pour le calcul de l'excentricité : on peut l'oublier, puisqu'on se sert seulement de l'amplitude, qui se lit simplement sur la figure 7 entre le maximum et le minimum.

Roland Szostak

KEPLER - MERCURE ET LE SOLEIL

Mercure passe rarement devant le Soleil, guère plus de treize fois par siècle, et le plus souvent en mai et novembre quand les orbites de la Terre et de Mercure sont correctement alignées. En mai 1607, Kepler pensa avoir observé un tel passage et, impatient d'en informer son protecteur, l'empereur Rodolphe II de Habsbourg, parcourut au pas de course le trajet le séparant du château. Ce n'est que bien plus tard qu'il réalisa qu'il avait vu en réalité une tache solaire - phénomène inconnu jusqu'à ce que F abricius, Scheiner et Galilée en soient les témoins plusieurs années après. "Avais-je pris la tache que je vis pour Mercure? se demandait Kepler en 1617. Une chance pour moi, j'étais le premier du siècle à avoir observé les taches solaires". Kepler avait prédit un réel passage de Mercure en 1631, mais il mourut l'année précédente et n'assista pas à l'événement.