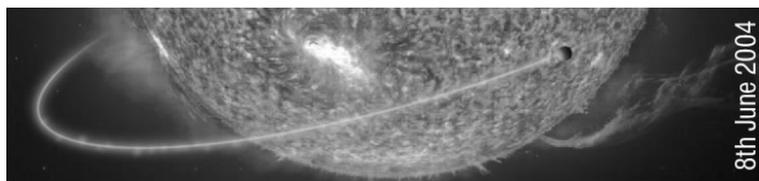


Le transit de Vénus du 8 juin 2004 : un événement astronomique exceptionnel !

Soyez les premiers vivants à voir Vénus passer devant le Soleil !

Bernard De Saedeleer*

Namur, Février 2004



Avertissement : !!! ATTENTION !!! DANGER POUR LES YEUX !!!

N'observez jamais le Soleil, que ce soit à l'œil nu ou avec un instrument : quelques secondes à peine suffisent à entraîner des lésions irréversibles (cécité) avant même qu'on ait ressenti une douleur quelconque. Il est très fortement conseillé d'opter pour une observation par projection sur une surface blanche, comme HORROCKS (voir Fig. 1). Différents dispositifs sont possibles et détaillés un peu partout. Pour le procédé par projection : ôtez les viseurs, faites passer le bout de votre télescope par un trou percé dans un carton mince, et projetez l'image sur un autre carton muni d'une surface blanche (voir "Brève présentation" sur le site [1]). Pour le procédé "chambre obscure" ("camera obscura") : voir [2]. Alternative : on peut aussi se procurer un solarscope [3] tout fait. Toutefois, si vous choisissez tout de même l'observation directe, adoptez alors des précautions encore plus drastiques que lors d'une éclipse de Soleil. Méfiez-vous des fausses protections qui sont inefficaces car elles laissent passer entre autres les infrarouges (verres fumés, films photos ou radios, lunettes de soleil, etc.). Par contre, peuvent exclusivement convenir : de bonnes lunettes d'éclipse

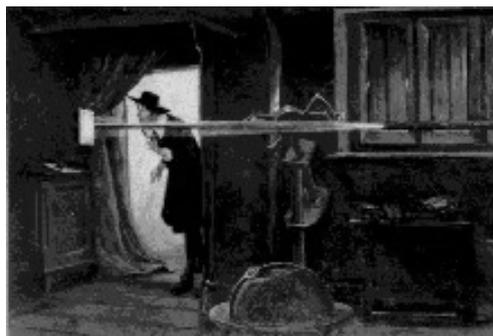


FIG. 1: HORROCKS observant par projection (chambre noire avec lunette) le passage de Vénus du 4 décembre 1639.

*FUNDP (Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix), Département de Mathématique, Rempart de la Vierge, 8, B-5000 Namur, Belgium, Email : Bernard.DeSaedeleer@fundp.ac.be

neuves (avec la mention CE), du filtre Mylar, ou des verres de soudeur à l'arc de densité #14. Renseignez-vous encore plus complètement via [4, 5, 6]. Limitation de responsabilité : l'auteur du présent article a pris toutes les mesures raisonnables afin d'informer le lecteur du danger ; par ailleurs, il ne garantit pas que les informations sont complètes ou exactes ; sa responsabilité ne pourrait donc en aucun cas être engagée. A l'aide d'une paire de lunettes protectrices, Vénus sera aisément visible comme une tache noire sur le disque du Soleil. Attention à ne pas confondre avec les taches solaires du moment [7]. En cas de pénurie de lunettes, fabriquez une "chambre obscure" d'appoint : prendre un carton, percer un petit trou à l'aide d'un clou, diriger le carton entre une feuille de papier ou un mur (clair) et le Soleil.

1 Mobilisation mondiale + intérêt pédagogique = participez !

Le monde entier s'apprête à vivre un moment astronomique de très grande envergure le 8 juin 2004 : Vénus passera devant le Soleil. Aucune personne actuellement en vie sur Terre n'a pu observer un tel transit : le dernier remonte à 1882. D'autre part, après les transits de 2004 et 2012, il faudra patienter jusqu'en 2117 ! Avec un peu de chance (la météo de début juin devrait être favorable), nous devrions être en mesure de faire des observations historiques en 2004. On s'organise de toutes parts afin de coordonner les observations : une campagne internationale de mesures a été mise sur pied. Plusieurs sites internet donnent beaucoup d'informations diverses sur le passage de Vénus (ESO [4], IMCCE [1], NASA [8], [9]). Allez explorer de préférence le site officiel du transit de Vénus [4]. Vous pouvez vous y inscrire comme équipe participante ; toutes les observations y seront centralisées. Le site du planétarium de Bruxelles [10] regorge également d'informations très pertinentes et clairement présentées. Un congrès spécifique à cet événement astronomique se déroule à Preston (GB) la semaine du transit [11], sur les lieux mêmes d'où HORROCKS effectua la première observation d'un transit de Vénus (celui du 4 décembre 1639).

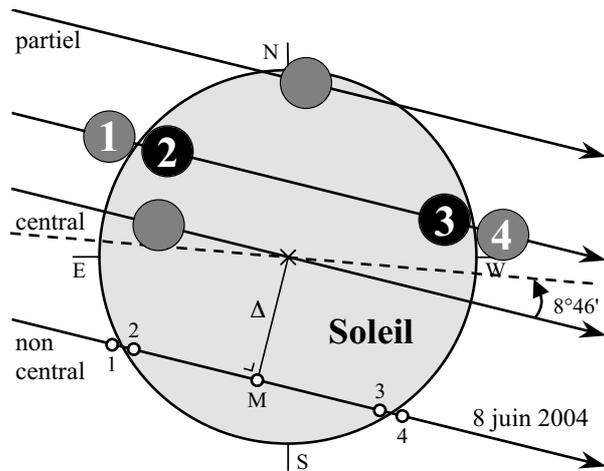


FIG. 2: Les 3 types de passages. Numérotation des contacts et définitions : le contact extérieur (1) et intérieur (2) à l'entrée ; le point M où la distance est minimale par rapport au centre du Soleil (et vaut Δ) ; le contact intérieur (3) et extérieur (4) à la sortie. Trajectoire vue à partir du centre de la Terre ; la ligne en traits interrompus représente l'écliptique 2004 et N le Nord de la sphère céleste (système équatorial).

Le passage de Vénus 2004 est une chance pour les professeurs de physique, de mathématique et d'histoire désireux de réaliser un travail susceptible d'éveiller l'intérêt des élèves. Les activités pédagogiques associées sont riches : à la fois interdisciplinaires et

transfrontalières. Des tas d'explications et de documents utiles sont disponibles (voir par exemple [1, 12, 13, 14]). Dans cet article nous expliquons ce qu'est au juste un transit de Vénus, pourquoi c'est *vraiment* exceptionnel et pourquoi c'est si rare et si régulier. Nous décrivons brièvement l'ampleur de ce phénomène ainsi que sa portée historique et scientifique. Nous donnons des informations assez complètes sur le transit de Vénus du 8 juin 2004. Nous faisons également tous les rappels utiles de Mécanique Céleste et donnons explicitement les outils afin que vous puissiez calculer assez précisément la position des planètes Vénus, Terre, Mars. Cela vous permet entre autres de recalculer vous-même la date de l'opposition de Mars en 2003 et du transit de Vénus 2004. Pour ce dernier, nous décrivons la méthode de HALLEY qui permet de calculer une valeur de l'UA (l'*Unité Astronomique*) et les phénomènes qui limitent sa précision.

Des institutions (l'ESO, l'IMCCE, l'EAAE, etc.) vous invitent conjointement à participer personnellement à la campagne internationale de mesures : mesurez précisément les instants des 4 contacts (voir Fig. 2) et transmettez-les en même temps que vos coordonnées géographiques (latitude et longitude — que vous pouvez trouver sur [15]) via la page de l'ESO [4]. L'IMCCE centralisera ensuite ces données et calculera la distance moyenne Terre-Soleil (l'UA). Vous aurez un retour sur la qualité de vos propres mesures et des informations internationales (des mesures effectuées autre part sur Terre) pour vous permettre de recalculer vous-même l'UA. De plus, un concours vidéo est ouvert à tous les participants (astronomes amateurs ou pas). La totalité du transit de Vénus 2004 sera diffusée sur les sites [1, 4] entre autres ; il est toutefois largement préférable d'y assister en direct !

2 C'est quoi au juste un transit ?

Rappelons avant tout que notre système solaire comprend 9 planètes qui tournent toutes quasiment dans le même plan (appelé plan de l'*écliptique*) et dans le même sens autour du Soleil. Si on dessine les orbites, il s'agit donc grossièrement de cercles (plus exactement d'ellipses) concentriques. Les 4 planètes les plus proches du Soleil sont, dans l'ordre de distance croissante : Mercure, Vénus, Terre et Mars. Mercure et Vénus sont des planètes dites *inférieures* car elles se trouvent plus près du Soleil que la Terre. Elles peuvent donc à un moment donné se trouver juste entre le Soleil et la Terre : c'est ce que l'on appelle un *transit*. En regardant le Soleil (attention danger ! : voir l'**Avertissement**) ou mieux en le projetant, on voit alors un point noir (d'une certaine taille) qui s'y ballade : c'est la planète en transit ! Il peut y avoir différents types de passages suivant la façon dont Vénus passe devant le Soleil (la vision dépendant d'ailleurs aussi de l'endroit où l'on se trouve sur Terre) : *central* (par le centre du Soleil), *non-central* et *partiel* (voir Fig. 2). La Figure 3 montre le transit non-central de Mercure du 7 mai 2003 dernier.

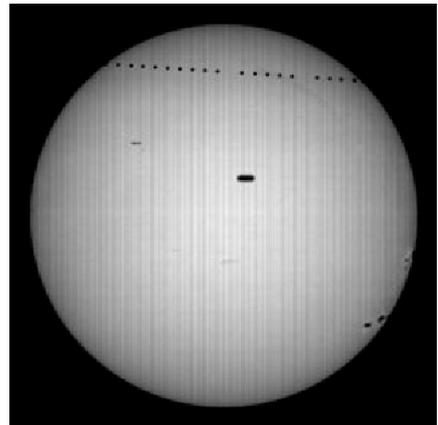


FIG. 3: Transit de Mercure du 7 mai 2003 [16].

On définit le *transit* (ou *passage*) comme le passage d'un corps céleste devant un autre de plus grand diamètre apparent. Le *diamètre apparent* d'un corps céleste est l'angle sous lequel on le voit à partir de la Terre (soit à une distance de 1 UA = $1.495\,978\,70 \times 10^{11}$ m). Il prend donc en compte un effet de perspective (voir Fig. 4). Pour fixer les idées, calculons quelques diamètres apparents (pour les planètes, on considère les diamètres apparents maximaux, c'est-à-dire lors d'une conjonction inférieure — voir plus loin) :

$$DA_{\text{Soleil}} = 2\beta = 2 \arcsin(6.96 \times 10^8 \text{ m}/1 \text{ UA}) \approx 32'$$

$$DA_{\text{Vénus}} = 2 \arcsin(6\,051.9 \times 10^3 \text{ m}/((1 - 0.723) \times 1 \text{ UA})) \approx 60'' = 1'$$

$$DA_{\text{Mercure}} = 2 \arcsin(2\,439.7 \times 10^3 \text{ m}/((1 - 0.387) \times 1 \text{ UA})) \approx 11''$$

(rappel : un angle de 1° se divise en $60'$ et $1'$ en $60''$). Notons que Mercure nous apparaît environ 5 fois plus petit que Vénus. Malgré cela, un transit de Mercure est déjà observable (voir Fig. 3) — à l'aide d'un instrument grossissant tout de même. Pour le transit de Vénus, pas besoin d'instrument par contre (juste des lunettes protectrices). Retenez l'ordre de grandeur : le long d'un diamètre solaire apparent, on peut aligner visuellement environ 175 Mercure ou 32 Vénus (alors que le rapport des diamètres réels est de 285 et de 115 respectivement). A la Figure 2, on a représenté à l'échelle le transit de Vénus du 8 juin 2004. Remarquons aussi que le $DA_{\text{Lune}} \approx 31'$, ce qui fait que la Lune peut occulter presque totalement (et même quelquefois totalement) le Soleil (c'est ce que l'on appelle alors une *éclipse de Soleil*).

Nous aurons également grand besoin d'une autre définition monumentale : celle de la *parallaxe solaire* α : c'est l'angle sous lequel on verrait le rayon de la Terre R_T (6.378×10^6 m) depuis le centre du Soleil. En étendant la définition de la parallaxe aux planètes, on a :

$$\alpha_{\text{Soleil}} = \alpha = \arcsin(R_T/1 \text{ UA}) \approx 8''.794.$$

$$\alpha_{\text{Vénus}} = \arcsin(R_T/((1 - 0.723) \times 1 \text{ UA})) \approx 32''.$$

$$\alpha_{\text{Mercure}} = \arcsin(R_T/((1 - 0.387) \times 1 \text{ UA})) \approx 14''.$$

Un transit s'apparente donc un peu à une éclipse ; la nuance tient surtout au fait que lors d'une éclipse, la planète cache quasiment totalement l'autre corps céleste (Lune ou Soleil), tandis que lors d'un transit elle le cache à peine (*éclipse* \equiv assombrissement d'un corps céleste causé par son passage dans l'ombre d'un autre corps céleste). Tout le monde se souvient de l'éclipse totale de Soleil du 11 août 1999 : la Lune passait devant le Soleil, le cachant totalement. Le spectacle était splendide (surtout pour ceux qui n'ont pas eu de nuages). La baisse de luminosité lors d'un transit est par contre imperceptible.

Une dernière remarque : si vous comptez observer et que vous maintenez votre matériel fixé à la Terre (repère horizontal) durant le transit, vous observerez alors une trajectoire courbée (voir Fig. 5) au lieu d'une ligne droite dans le cas d'un repère équatorial (monture équatoriale).

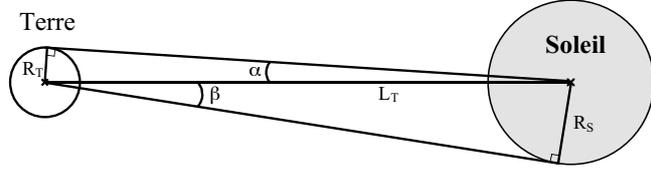


FIG. 4: Diamètre apparent du Soleil (2β) et parallaxe solaire α .

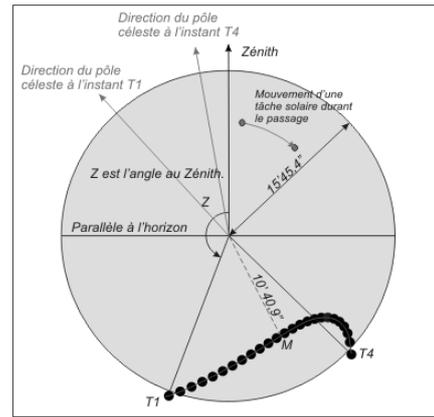


FIG. 5: Aspect courbé du trajet de Vénus en 2004 (repère horizontal).

3 Pourquoi est-ce *vraiment* exceptionnel ?

Un transit est avant tout exceptionnel parce qu’il permet d’estimer l’UA (principe : voir Chap. 8) par un calcul qui peut être relativement simple ; c’est d’ailleurs pour cette raison que les transits de Vénus ont eu un impact historique considérable. La valeur de l’UA est actuellement fixée à $1 \text{ UA} = 1.495\,978\,70 \times 10^8 \text{ km}$. Il n’est pas aisé techniquement d’estimer une distance aussi grande ; il a été tout aussi difficile par le passé d’imaginer qu’elle puisse être aussi grande : toutes les estimations antérieures sous-estimaient largement sa valeur réelle.

On peut ensuite s’interroger : à cette fin astronomique, vaut-il mieux observer un transit de Mercure ou de Vénus ? La réponse est, et de loin : un transit de Vénus. La raison principale sera donnée au Chapitre 8. On peut néanmoins déjà dire que Vénus est plus facilement observable (disque apparent plus grand) que Mercure, d’où une meilleure précision absolue sur les instants de contact. La durée d’un transit de Vénus est également plus longue, d’où une meilleure précision relative sur les mesures. Par le passé, le mouvement orbital de Mercure devait également être moins bien connu (très excentrique entre autres). Bref un transit de Vénus permet une détermination bien plus précise de l’UA qu’un transit de Mercure. Il y a eu un transit de Mercure le 7 mai 2003 ; celui-ci a surtout servi de “répétition générale” pour l’observation du transit de Vénus du 8 juin 2004.

Pour pouvoir observer un transit de Vénus, il faut au minimum que 4 conditions soient réunies : qu’il ait lieu, que l’on puisse le prédire avec assez de précision, que l’on dispose d’un bon matériel et que le ciel soit dégagé.

Que le transit ait lieu n’est pas évident car le phénomène est extrêmement rare. Il n’y en a qu’environ 1,4 par siècle (contre 13,3 par siècle pour ceux de Mercure). L’Homme n’a d’ailleurs observé que 5 transits de Vénus jusqu’à ce jour en tout et pour tout (voir Fig. 6). Aucune personne actuellement en vie sur Terre n’a pu observer un transit de Vénus.

De surcroît, même s’il a lieu, il s’agit de se trouver au bon endroit sur Terre : un transit n’est pas visible en totalité de partout sur la Terre car il existe toujours bien une “face cachée de la Terre” qui ne voit pas le Soleil (voir Fig. 7) ; le dernier transit de Vénus visible en totalité en France date de 1283 et le suivant sera en 2247. Celui de 2004 sera visible en totalité de chez nous (pas celui de 2012) : une aubaine à saisir absolument ! D’autant plus qu’aucun des 5 transits historiques observés n’a eu lieu chez nous en totalité : il a fallu voyager !

Date	Nœud	Intervalle [ans]
7 déc 1631	A	$\Delta t = 105.5$
☿ 4 déc 1639	A	$\Delta t = 8$
☿ 6 juin 1761	D	$\Delta t = 121.5$
☿ 3-4 juin 1769	D	$\Delta t = 8$
☿ 9 déc 1874	A	$\Delta t = 105.5$
☿ 6 déc 1882	A	$\Delta t = 8$
*** 8 juin 2004	D	$\Delta t = 121.5$
6-7 juin 2012	D	$\Delta t = 8$
11 déc 2117	A	$\Delta t = 105.5$
6 déc 2125	A	$\Delta t = 8$
11 juin 2247	D	$\Delta t = 121.5$
9 juin 2255	D	$\Delta t = 8$

FIG. 6: Les dates de 12 transits consécutifs de Vénus. Le symbole ☿ signifie qu’il a été observé par l’Homme. $A \equiv Ascendant$, $D \equiv Descendant$.

Que les prédictions soient assez précises ne pose plus de problèmes actuellement; il a toutefois fallu attendre KEPLER pour disposer enfin d'éphémérides suffisamment précises (les fameuses Tables rudolphines de 1627). KEPLER (1571–1630) prédit les transits de Vénus et de Mercure de 1631; il mourut malheureusement juste avant. Disposer d'un bon matériel d'observation ne pose également plus vraiment de problèmes non plus; mais dans le passé, il a fallu attendre l'avènement des lunettes astronomiques, qui ne furent popularisées que vers 1610 (GALILÉE). Pour assurer la qualité des mesures, il fallait également pouvoir déterminer ses coordonnées géographiques avec assez de précision (la longitude posant le plus de difficultés) — et disposer d'une bonne horloge, ce qui n'a pas toujours été simple. Quant à la météo, nous en sommes toujours tributaires... tant que l'on observe dans (sous) l'atmosphère!

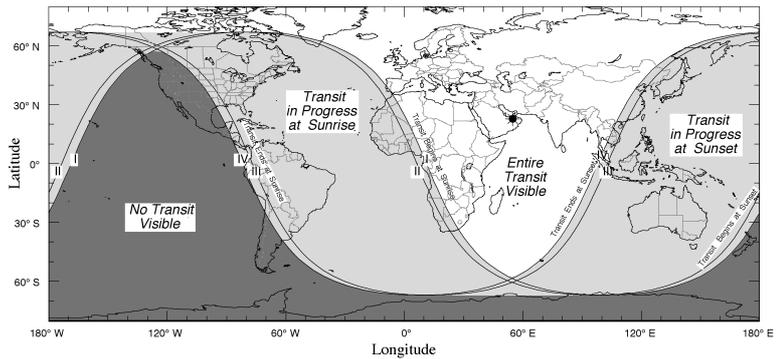


FIG. 7: Carte de visibilité du transit de Vénus 2004 [17].

Le transit de Vénus 2004 sera également particulier par le fait que son observation ne sera plus réservée à une élite mais sera à la portée du grand public. Il faut également considérer le saut technologique de 1882 à 2004 : on va pouvoir filmer le transit cette fois!

En conclusion, on peut bien dire que c'est un événement *vraiment* exceptionnel!

4 Un peu d'Histoire sur les 5 transits de Vénus vus par l'Humanité

Le transit du 7 décembre 1631 ne fut pas observé suite aux imprécisions des Tables rudolphines : celles-ci prévoyaient en effet que le passage ne serait pas observable en Europe car il aurait lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre 1631, alors qu'en réalité la fin du passage fut visible depuis l'Europe centrale. Par contre, le premier transit à avoir été observé par l'Humanité (PIERRE GASSENDI à Paris en l'occurrence) est celui de Mercure du 7 novembre 1631.

Le transit du 4 décembre 1639 n'aurait été observé que par 2 personnes : WILLIAM CRABTREE et JEREMIAH HORROCKS (tous deux en GB). Le succès d'HORROCKS provient du fait qu'il dénicha l'intervalle de 8 ans, pouvant ainsi prédire précisément que le prochain passage aurait lieu le 4 décembre 1639, soit beaucoup plus tôt que les 120 ans d'intervalle prédits par KEPLER. HORROCKS se trouvait à Hoole (à 5 miles de Preston), et prévint son correspondant attitré CRABTREE qui lui se trouvait à Manchester et l'exhorta fortement à observer. CRABTREE n'eut toutefois pas de chance (ciel couvert) tandis qu'HORROCKS put l'observer (il prit "3 mesures à la hâte avant le coucher du Soleil" : à 15h15, 15h35 et 15h45 — voir Fig. 1). HORROCKS fit plusieurs calculs, dont celui de la position du nœud de Vénus (voir Chap. 6).

En observant le transit de Mercure en 1677 sur l'île de Sainte-Hélène, HALLEY (1656–1742) se rendit compte qu'en mesurant précisément les instants de contact visuel entre Vénus et le Soleil (voir Fig. 2) il devait être possible d'en déduire la parallaxe solaire α et donc l'UA (voir Chapitre 8). Sachant qu'il ne verrait pas le prochain passage qui n'était qu'en 1761, il lança en 1716 un appel aux générations futures, appel resté très célèbre [18]. L'appel a été largement suivi puisqu'on a organisé de grandes expéditions pour observer les passages de 1761 et 1769.

Le transit du 6 juin 1761 est mémorable : il s'agit de la première campagne internationale d'observations coordonnées sous l'impulsion de HALLEY : Océan indien (LE GENTIL & PINGRÉ), Sibérie (ABBÉ CHAPPE D'AUTEROCHE), Vienne (CASSINI), Arkangelsk (LOMONOSOV), etc. On recense 120 observations sur 62 stations ; la parallaxe solaire α est estimée être comprise entre 8''5 et 10''6 (et donc l'UA entre 125 et 155 millions de km), ce qui n'apporta malheureusement pas vraiment d'amélioration par rapport aux mesures antérieures sur Mars. L'apparence d'une auréole diffuse autour de la planète (visible entre les contacts intérieurs et extérieurs) fait suspecter pour la première fois l'existence d'une atmosphère autour de Vénus.

Huit ans après a lieu le transit du 3 juin 1769 : nouvelle campagne internationale, de plus grande ampleur encore : Océan indien (LE GENTIL), Caraïbes (PINGRÉ), Mexique (ABBÉ CHAPPE D'AUTEROCHE), Océan indien & pacifique (Capitaine COOK à Tahiti [20]), etc. Les épopées sont fascinantes et parfois tragiques ; les mésaventures de LE GENTIL sont célèbres [21] ! Une bande dessinée (en 2 tomes [22]) raconte agréablement l'expédition dirigée par BOUGAINVILLE, emmenant l'astronome VÉRON à l'Île de France. On recense 151 observations sur 77 stations ; la parallaxe solaire α est alors estimée être comprise entre 8''5 et 8''9 (et donc l'UA entre 145 et 155 millions de km) ; des résultats satisfaisants (meilleurs qu'en 1761), mais loin des espérances de HALLEY (voir Chapitres 8 et 9).

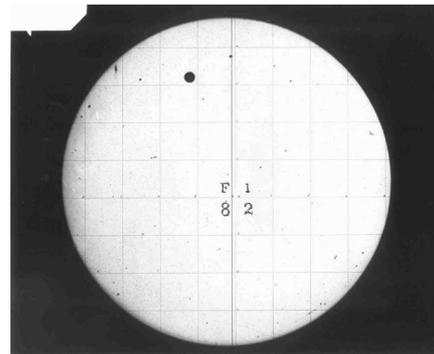


FIG. 8: Photo (rare) du transit de Vénus de 1882 (Crédit : U.S. Naval Observatory [19]).

Le transit du 9 décembre 1874 sera suivi de celui du 6 décembre 1882 qui sera immortalisé : ce sont les premières observations photographiques. En 1874 on a utilisé des plaques trempées à l'iodure de brome, tandis qu'en 1882 on disposait de plaques sèches avec une émulsion de collodion. La Figure 8 est l'une des 11 plaques seulement qui survécurent aux expéditions américaines de 1882 ; tandis que toutes les plaques de 1874 furent perdues. Sur la figure, Vénus va de gauche (Est) à droite (Ouest). Les estimations de α ne sont à nouveau pas exceptionnelles.

5 Les 2 prochains transits de Vénus : 2004 et 2012

Une nouvelle campagne internationale coordonnée est mise sur pied [4] ; ce seront aussi les premières observations vidéo. Le transit du 8 juin 2004 se déroulera de 5h13m29s à 11h25m59s environ (phases géocentriques en TU \equiv *Temps Universel*). On définit les *phases* du phénomène comme les instants des entrées et des sorties d'un point donné de la

Terre dans les cônes d'ombre et de pénombre de la planète. Les phases *générales* concernent un point de l'ellipsoïde terrestre tandis que les phases *géocentriques* concernent le centre de la Terre. On définit par ailleurs les *circonstances locales* qui résument la situation globale pour un lieu donné à la surface de la Terre. Attention aussi au système d'heure local : pour avoir l'heure locale en Belgique, il faut ajouter 1h au TU (voir [23]) en hiver, et 2h en été (le changement d'heure a lieu dans la nuit de samedi à dimanche le dernier week-end de mars et d'octobre).

Par exemple, pour Uccle ($50^{\circ}47'9N - 4^{\circ}21'5E$), le transit aura lieu de 7h19m56s à 13h23m21s heure locale. Ce transit (non central) aura donc une durée d'environ 6h ; un transit pouvant durer jusqu'à 8h (transit central). Vous pouvez consulter via une page de la NASA [24] une liste des moments des contacts du transit 2004 pour des centaines de villes dans le monde. Pour Preston (GB) les instants des contacts sont les suivants : I=6:19:46, II=6:39:41, G=9:22:33, III=12:03:55, IV=12:23:28 (heure locale d'été — *BST*).

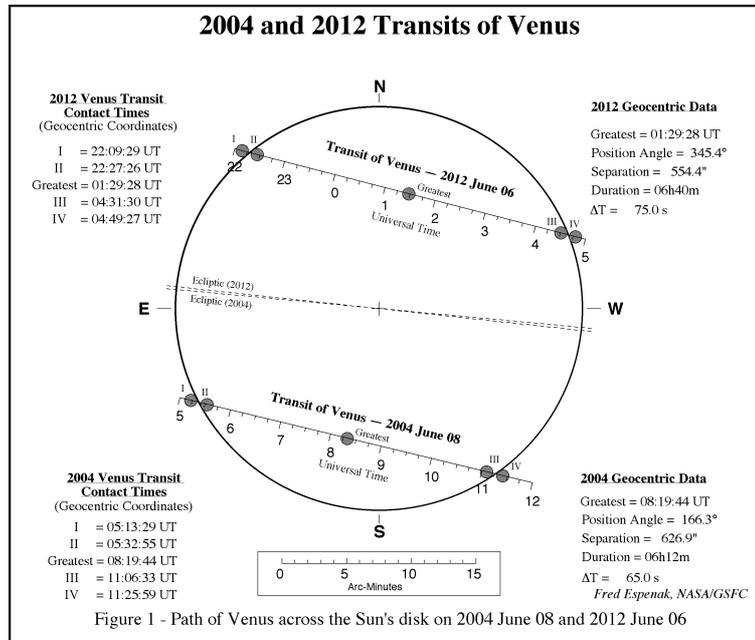


FIG. 9: Carte des transits de Vénus 2004 et 2012 [8].

Voyons à présent comment on peut calculer la date d'un transit ; un calcul que vous pourrez refaire intégralement par vous-même. Comme nous l'avons vu, un transit correspond à un alignement (dans l'ordre) des corps Terre, Vénus et Soleil. On définit la *conjonction* comme le phénomène par lequel 2 corps ont soit la même longitude céleste (système écliptique), soit la même *ascension droite* (système équatorial) à partir d'un 3^e corps. Quand Vénus et le Soleil ont la même longitude vue du centre de la Terre, il s'agit d'une *conjonction géocentrique*. Elle est de surcroît dite *inférieure* si Vénus se trouve entre le Soleil et la Terre (*supérieure* sinon). Une conjonction ne signifie pas qu'il y a transit : les 2 corps n'ont pas spécialement la même latitude (celle-ci dépend de l'inclinaison de l'orbite - voir Fig. 15). Il s'agit donc d'abord de pouvoir déterminer la position des planètes avec assez de précision ; c'est l'objet du chapitre suivant, qui introduit aussi les notions de base de la Mécanique Céleste qui nous seront utiles.

6 La position des planètes : calculs et définitions

On sait depuis KEPLER que chaque planète du Système Solaire décrit — grossièrement — une orbite elliptique dans un plan (solution dans le cas d'un champ de forces central) dont le Soleil occupe l'un des foyers (1^{re} loi de KEPLER). Considérons la Figure 10 où le Soleil est donc placé au foyer de l'ellipse en question. On met en place

un repère inertiel (O, x, y, z) , où le Soleil est à l'origine, et où le plan (x, y) est celui qui contient l'orbite de la Terre autour du Soleil (on l'appelle *plan de l'écliptique*). La direction x est également fixée : c'est celle du point vernal Υ (l'équinoxe de printemps). L'axe z , perpendiculaire à l'écliptique, complète le trièdre.

Une planète (p. ex. Vénus) décrit une ellipse dans un plan : le *plan orbital* de la planète. Ce plan est incliné d'un angle i (l'*inclinaison*) par rapport à l'écliptique. Par ailleurs, son intersection avec l'écliptique définit la *ligne des nœuds* (le *nœud ascendant* A est le point où la planète passe de dessous l'écliptique à au-dessus, et le *nœud descendant* D vice-versa). Lors d'un transit, on peut donc les distinguer facilement (voir Fig. 18). On repère la ligne des nœuds par l'angle Ω , la *longitude du nœud ascendant*. Quant à la forme de l'ellipse, celle-ci est déterminée

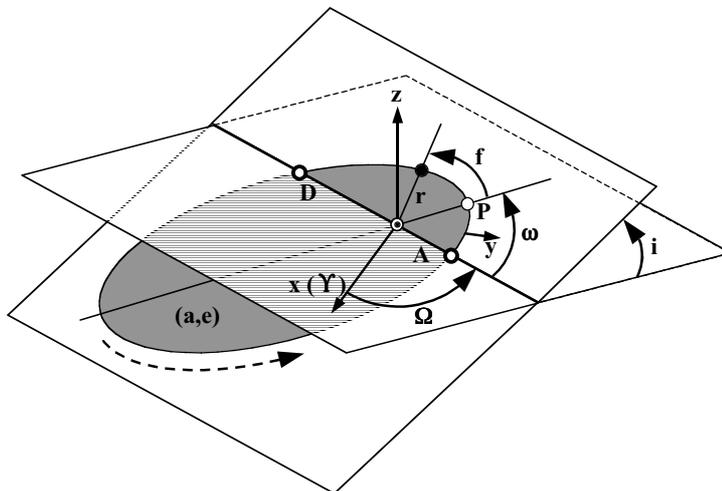


FIG. 10: Les 6 éléments elliptiques $(a, e, i, \Omega, \omega, \tau)$.

par sa grandeur (son *demi grand axe* a), son degré de déformation par rapport à un cercle (l'*excentricité* e) ; on a également que son *demi petit axe* $b = a\sqrt{1 - e^2}$. La direction du demi grand axe est donnée dans le plan de l'orbite par l'angle ω (l'*argument du périhélie*), qui situe le périhélie P (point de l'ellipse le plus proche du Soleil). On utilise encore plus couramment l'angle brisé $\varpi = \omega + \Omega$, que l'on appelle la *longitude du périhélie*.

Une fois l'orbite elliptique complètement décrite, il faut encore situer la planète sur l'ellipse, ce qui peut se faire via l'angle f , l'*anomalie vraie*. Celui-ci varie périodiquement avec le temps, suivant une loi bien connue. Reste donc à définir une origine des temps, ce qui se fait en donnant le moment où la planète passe en A , appelé τ (*instant de passage au nœud ascendant*). On peut aussi donner de façon équivalente la valeur de l'angle f (ou d'un des angles L, M, E définis plus loin) en un temps donné.

Ce qui fait que les 6 éléments elliptiques $a, e, i, \Omega, \omega, \tau$ déterminent complètement le mouvement képlérien des planètes. Nous donnons à la Figure 11 des valeurs numériques [25] de ces éléments pour les planètes Vénus, Terre et Mars à la date¹ du 1^{er} janvier 2000 à midi (JD 2451 545.0 \equiv JD₀). Au lieu de τ on donne la longitude L_0 (*longitude moyenne*) à la date JD₀, avec $L_0 = M_0 + \varpi$ (la définition de M_0 est donnée plus loin). Les angles sont donnés en degrés mais il est préférable de faire tous les calculs en radians.

On peut alors assez aisément calculer la position de chaque planète à une date donnée en projetant le vecteur \vec{r} suivant les axes (x, y, z) :

$$\begin{cases} x = r [\cos(f + \omega) \cos(\Omega) - \sin(f + \omega) \cos(i) \sin(\Omega)] \\ y = r [\cos(f + \omega) \sin(\Omega) + \sin(f + \omega) \cos(i) \cos(\Omega)] \\ z = r \sin(f + \omega) \sin(i) \end{cases}$$

¹Le temps est mesuré en jours juliens : le 1^{er} janvier 2000 à midi correspond au jour julien numéro JD 2451 545.0. Si on ajoute 1 on est au jour suivant. On peut facilement trouver des algorithmes de conversion de la date vers le nombre d'années juliennes et vice-versa [25].

Ces relations utilisent l'*anomalie vraie* f qui repère l'angle de \vec{r} par rapport au périhélie, ainsi que le *rayon* r , tous deux étant calculables par ailleurs (voir ci-dessous).

Bien sûr, dans la réalité, ces orbites képlériennes sont perturbées par différents effets (ne fût-ce que par les autres planètes), mais pour simplifier nous ne les considérerons pas ici. Les éléments

de la Figure 11 sont d'ailleurs les *éléments moyens* (de l'orbite de référence non perturbée) à la date JD_0 . Par opposition, les *éléments osculateurs* sont ceux de l'*orbite osculatrice* (qui

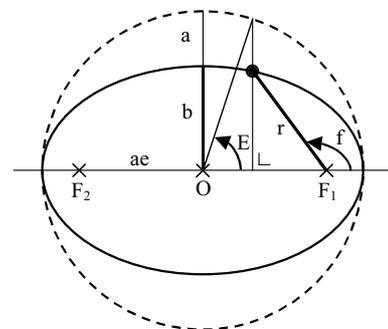
	Vénus	Terre	Mars
a [UA]	0.723 329 820	1.000 001 018	1.523 679 342
e [1]	0.006 771 882	0.016 708 617	0.093 400 620
i [°]	3°23'40".078 28	0	1°50'59".015 32
Ω [°]	76°40'47".712 68	0	49°33'29".135 54
ϖ [°]	131°33'49".346 07	102°56'14".453 10	336°03'36".842 33
L_0 [°]	181°58'47".283 04	100°27'59".214 64	355°25'59".788 66

FIG. 11: Eléments elliptiques moyens au 1^{er} janvier 2000 à midi. change continuellement avec le temps, à cause des perturbations précisément).

Pour chaque planète, on calcule également le *moyen mouvement angulaire* n (en radians par seconde), via la 3^e loi de KEPLER : $n = \sqrt{\mu_S/a^3}$, avec la constante de gravitation solaire qui vaut $\mu_S = (6.673 \times 10^{-20}) \times (1.989 \times 10^{30}) \text{ km}^3/\text{s}^2$ et a exprimé en km. Par exemple, le n_{Terre} vaut 0.0172 rad/j, ce qui signifie que la Terre parcourt 2π en 1 an. Le moyen mouvement angulaire n sert à calculer l'*anomalie moyenne* $M = n (JD - JD_0) + M_0$ (attention de bien exprimer n en rad/j). C'est une simple relation temporelle linéaire !

Pour faire le lien entre les anomalies (voir Fig. 12) moyenne M et vraie f , il s'agit tout d'abord de résoudre (numériquement) l'équation de KEPLER $M = E - e \sin(E)$ pour trouver l'*anomalie excentrique* E . On peut alors en déduire f et r via les relations :

$$\begin{cases} r = a(1 - e \cos E) \\ \cos(f) = (a/r)(\cos(E) - e) \\ \sin(f) = (b/r) \sin E \end{cases}$$



Vous avez à présent toutes les informations nécessaires afin de calculer par vous-même des éphémérides de ces 3 planètes. Par exemple, vous pouvez calculer l'évolution de la distance Terre-Mars (voir Fig. 13(a)). On voit bien qu'elle est minimale en fin août 2003 (c'est le moment où la distance entre les 2 ellipses est minimale comme on le voit à la Figure 13(b), qui est une vue de dessus de l'écliptique). Il s'agit d'une opposition très remarquable [26] car Mars n'avait jamais été si proche de nous depuis 59 619 ans (elle sera par contre de plus en plus proche à l'avenir, mais la prochaine fois cela ne sera que dans 284 ans). Cette très grande opposition a permis les missions et les observations qui sont d'actualité pour Mars.

FIG. 12: Relation entre les anomalies E et f .

Une autre application consiste à calculer les dates du transit de Vénus (à partir de 2004 mettons). Il suffit de calculer la distance Δ du centre du Soleil à la droite Terre-Vénus (voir Fig. 2) : si celle-ci est inférieure au rayon solaire ($6.96 \times 10^8 \text{ m}$, soit 0.0047 UA) alors Vénus peut être en transit devant le Soleil. On montre facilement que le carré de la distance

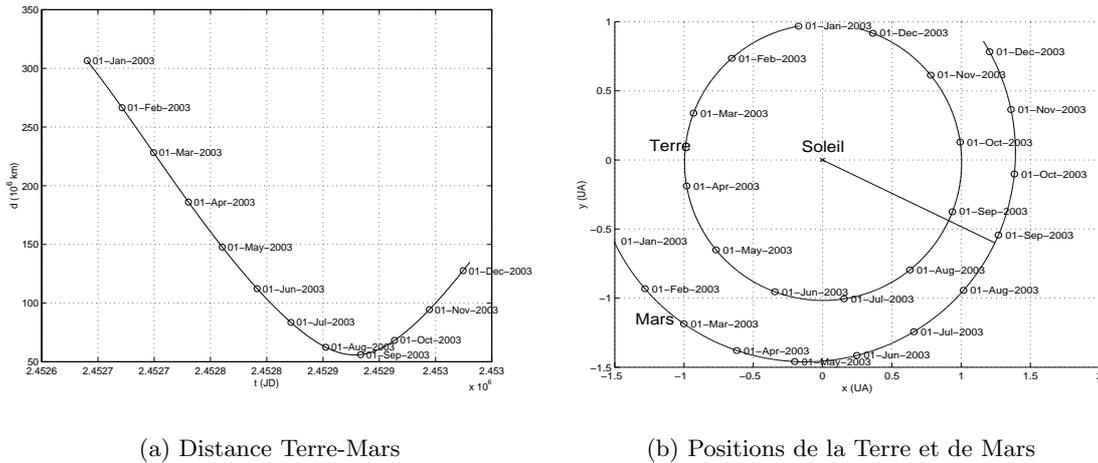


FIG. 13: Calcul de la date de l'opposition de Mars en 2003.

Δ vaut :

$$\Delta^2 = \frac{(x_2 y_3 - y_2 x_3)^2 + (x_2 z_3 - z_2 x_3)^2 + (y_2 z_3 - z_2 y_3)^2}{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}$$

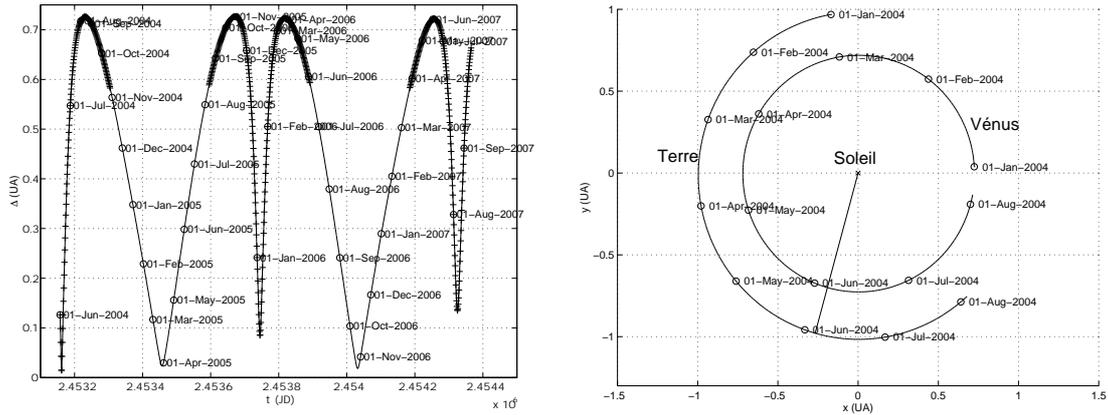
où $\vec{x}_2 (x_2, y_2, z_2)$ et $\vec{x}_3 (x_3, y_3, z_3)$ sont les coordonnées de Vénus et de la Terre respectivement. Pour déterminer s'il s'agit d'une conjonction inférieure ou supérieure, il suffit d'étudier le signe du produit scalaire $P = \vec{x}_2 \cdot \vec{x}_3$: il est positif quand Vénus se trouve devant le Soleil par rapport à nous (transit), et négatif derrière.

L'évolution de Δ est donnée à la Figure 14(a). On constate effectivement qu'un transit est possible début juin 2004, car le minimum est très bas (les symboles + correspondent à $P > 0$). On y voit aussi les conjonctions supérieures, avec des pentes moins raides, ce qui est logique. Ensuite, on ne voit plus aucun transit, les minima devenant trop élevés. Si on prolongeait le graphique, on verrait que le prochain transit possible serait celui de juin 2012. La Figure 14(b) montre la position des 2 planètes par rapport au Soleil (vue de dessus de l'écliptique) ; notamment la conjonction lors du transit.

7 Pourquoi un transit de Vénus est-il si rare et si régulier ?

Nous venons de constater l'occurrence d'un transit dans un graphe numérique. Soit. Mais nous ne sommes pas à l'abri d'erreurs numériques : il est donc également utile de se poser la question plus théoriquement : quelles sont les conditions pour qu'un transit puisse avoir lieu ? Autrement dit : quand cela a-t-il lieu ? A quelle fréquence ? Un examen attentif de la Figure 6 fait apparaître un cycle de périodes de 105.5 - 8 - 121.5 - 8 années, soit un cycle général de 243 ans. Les transits ont visiblement lieu par paires (2 en 8 ans) séparées par plus d'un siècle : on les appelle *transits doubles*, ou *paire de transits*. Nous donnons ici une explication de cette régularité. Pour simplifier le raisonnement, nous supposons que l'orbite de Vénus est circulaire (on néglige ainsi l'excentricité $e_{Vénus} \approx 0.007$). C'est une hypothèse réaliste dans ce cadre-ci.

Puisqu'il est question de périodicité, il s'agit avant tout de définir plusieurs périodes fondamentales. On définit la *période sidérale* d'une planète comme l'intervalle de temps



(a) Distance Δ du centre du Soleil à la droite Terre-Vénus

(b) Positions de la Terre et de Vénus

FIG. 14: Calcul de la date du transit de Vénus à partir de 2004.

moyen entre 2 positions identiques d'un corps par rapport aux étoiles. La période sidérale de la Terre est $T = 365.25636 \text{ j} = 1 \text{ an}$. On définit la *période synodique* d'une planète comme l'intervalle de temps moyen entre 2 conjonctions successives de 2 corps, vue à partir du Soleil. Il est relativement aisé de mesurer la période synodique de Vénus (temps entre 2 configurations Soleil-Terre-Vénus semblables en longitude) : $S = 583.92 \text{ j}$. On peut alors en déduire la période sidérale de Vénus : $V = 224.701 \text{ j}$, vu la relation $1/V = 1/T + 1/S$ (qu'il est aisé de démontrer par ailleurs).

Si l'on considérait qu'une simple conjonction (longitudes identiques) constituait le critère de transit, il y aurait un transit tous les 1.6 ans. Or ce n'est pas le cas : c'est donc qu'il faut également considérer la latitude, c'est-à-dire le fait que l'orbite de Vénus est inclinée d'environ $3^\circ 24'$ par rapport à celle de la Terre (voir Fig. 15). Pour qu'un alignement avec la Terre soit possible, il faut donc que Vénus passe justement dans le plan de l'écliptique ; c'est-à-dire que Vénus se trouve en son nœud ascendant A ou descendant D . Par ailleurs, il s'agit aussi que la Terre soit "juste en face" au moment où Vénus est à l'un de ses nœuds : cela ne peut se produire que début juin (D) ou début décembre (A) nécessairement. Mais à chaque fois que la Terre est là où il faut, Vénus ne l'est peut-être pas : cela ne se produit donc pas chaque année non plus. Il faut également considérer le fait que le disque solaire est étendu : on peut avoir un passage exactement par le centre du Soleil (transit *central*), ou bien désaxé (transit *non central*) — voir Fig. 2. **En résumé, la condition pour avoir un transit est qu'il y ait une conjonction géocentrique inférieure lors du passage au nœud de l'orbite, avec une certaine tolérance.**

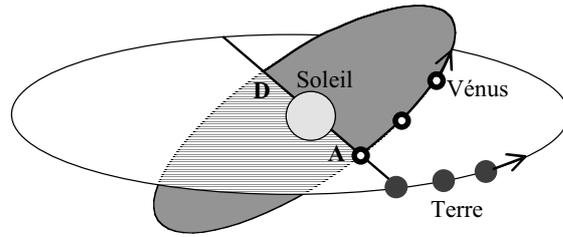


FIG. 15: L'orbite de Vénus est inclinée de $3^\circ 24'$.

Imaginons que l'on parte d'une configuration de transit au nœud ascendant A : après combien de temps aura-t-on un autre transit ?

Pour avoir le prochain transit au même nœud A , chaque planète doit avoir parcouru un nombre entier d'orbites, afin de se retrouver dans la même configuration (alignement au nœud A); il s'agit donc de calculer le plus petit commun multiple ($ppcm$) de V et de T : $ppcm = pV = qT$ avec ($V, T \in \mathbb{R}$ et $p, q \in \mathbb{N}$). Les périodes n'étant pas entières, il s'agit de tolérer une erreur sur le $ppcm$, comme classiquement dans les phénomènes non commensurables. Considérons donc plutôt les solutions de $pV - qT = \epsilon$, avec $|\epsilon| < \epsilon_{max}$; elles sont facilement calculables et sont reprises à la Figure 16, où l'on a choisi $\epsilon_{max} = 2$ j. On y lit entre autres les solutions principales : $13V = 8$ ans -0.94 j et $395V = 243$ ans -0.4 j. Bien entendu, on aurait plus de solutions si on tolérait une erreur temporelle plus grande, mais alors la Terre ne serait plus suffisamment alignée : il s'agit donc de rejeter certaines solutions, celles pour lesquelles $\epsilon > \epsilon'_{max}$.

La question de l'erreur ϵ'_{max} à tolérer dans le $ppcm$ n'est pas triviale : combien peut-on tolérer ? Il y a un peu de marge de manœuvre : le diamètre du disque solaire étant relativement important (32'), on peut tolérer certains écarts à la périodicité parfaite. Par contre on peut considérer Vénus comme une tache ponctuelle ($DA_{Vénus} \approx 1'$). On peut calculer qu'une erreur de 0.7 j correspond à un écart d'un rayon solaire entre 2 lignes de transit (voir Fig. 2). Autrement dit, les transits doivent avoir lieu à moins de ± 0.7 j du passage du nœud. Si deux transits successifs se passent l'un à un bord du Soleil et l'autre au bord d'en face, cela ferait 1.4 j de tolérance, mais cela constitue vraiment un maximum. En pratique, il faut tenir compte aussi des perturbations, et les solutions à rejeter *in fine* sont celles barrées à la Figure 16. En conclusion, l'intervalle de temps entre 2 transits au nœud A (noté $A \rightarrow A$) est de 8 ans ou 243 ans (la solution 0 est triviale tandis que les autres sont des combinaisons de 8 ans et 243 ans, comme par exemple $q = 235 = 243 - 8$ et $q = 478 = 2 \times 243 - 8$). On peut faire le même raisonnement pour les espacements $D \rightarrow D$. Ce sont donc ces 2 périodes fondamentales (8 ans et 243 ans) qui permettent de retracer les séries de dates des passages en un même nœud ($A \rightarrow A$ ou $D \rightarrow D$) de la Figure 6.

Après 243 ans, les lignes de transits sont quasiment reproduites à l'identique; elles sont légèrement décalées vers le Sud : d'environ $-61''$ en D et de $-105''$ en A . La Figure 17 représente une série complète de transits de Vénus au nœud A . Sur un diamètre solaire d'environ $1950''$, il y a moyen d'espacer 18 fois $105''$, ce qui donne un cycle de 19 transits (≈ 4600 ans); au nœud D le cycle est de 31 transits (≈ 7500 ans).

Le léger décalage des lignes de transits (et des dates) au fil des temps est dû aux perturbations séculaires (qui sont variables); nous en donnons ici quelques valeurs actuelles moyennes. Il va de soi que ces décalages pourraient être fort différents à des échelles de plusieurs millénaires. Aux extrémités d'un tel cycle de 243 ans, les transits peuvent être partiels (en -1763 par exemple), voire même mi-partiels mi-complets suivant l'endroit

au nœud A			au nœud D		
q	p	ϵ [j]	q	p	ϵ [j]
0	0	0	105.5	171.5	1.68
8	13	-0.94	113.5	184.5	0.74
16	26	-1.88	121.5	197.5	-0.20
227	369	1.48	129.5	210.5	-1.14
235	382	0.54	348.5	566.5	1.28
243	395	-0.40	356.5	579.5	0.34
251	408	-1.34	364.5	592.5	-0.60
470	764	1.07	372.5	605.5	-1.54
478	777	0.14	478	777	0.14

FIG. 16: Quasi-alignements ($ppcm$).

où l'on se trouve sur Terre (cela sera le cas en 2611 comme ça l'était en 1631). Pour l'espacement de 8 ans, le décalage vertical entre les lignes de transits est d'environ $+1200''$ en D et de $-1440''$ en A (voir Fig. 18). Autrement dit, d'une part les transits doubles sont plus "serrés" au nœud D qu'au nœud A , et d'autre part il est impossible d'avoir un transit double quand l'un d'eux est quasi central (le demi-diamètre apparent du Soleil étant d'environ $960''$); c'est ce qui se passe autour de l'an $+424$ (voir Fig. 17 et 19). Sur la Figure 17, il y avait donc également un transit (décalé de $+1440''$ vers le haut) et ce 8 ans avant chacune des dates postérieures ou égales à 1639.

Reste à considérer ce qui se passe pour le cas $A \rightarrow D$: pour que le prochain transit ait lieu au nœud descendant D cette fois (notons que les passages 2004 et 2012 ont lieu en ce nœud). Si on considère que le nœud D est juste à l'opposé du nœud A de départ (ce qui revient à $e_{Vénus} \approx 0$), alors on a cette fois à résoudre $(p + 1/2)V - (q + 1/2)T = \epsilon$. Les solutions sont à nouveau reprises à la Figure 16. Ces solutions font apparaître des périodes supplémentaires de 113.5 ans et 121.5 ans qui correspondent bien aux intervalles de temps entre les changements de nœuds $A \leftrightarrow D$ de la Figure 6 ($113.5 = 105.5 + 8$).

Nous sommes donc finalement parvenus à reproduire l'entièreté de la séquence étrange des passages qui était donnée à la Figure 6; nous résumons la situation graphiquement à la Figure 18.

Pour obtenir des solutions plus précises, il s'agirait de considérer l'excentricité des orbites et le fait que la ligne des nœuds se déplace lentement à cause des perturbations séculaires. Il s'agirait en outre d'affiner les valeurs de T et de V , en prenant pour V la période draconitique (de nœud à nœud) réelle de Vénus (224.6989 j) et pour T la période orbitale de la Terre, rapportée au nœud de Vénus (365.251 j).

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, le cycle de 243 ans (séquence $105.5 - 8 - 121.5 - 8$) n'est pas immuable : il présente des ruptures sur des périodes très longues. La solution $q = 8$ ans n'est en effet satisfaite qu'à 0.9 j près, ce qui signifie que lorsque le passage est central, on ne saurait pas avoir un autre transit 8 ans après, vu que le décalage de 0.9 j est trop grand par rapport

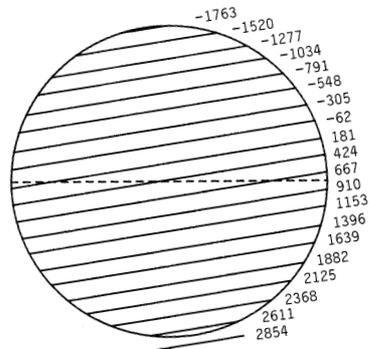


FIG. 17: Une série complète de transits de Vénus au nœud A (période de 243 ans). Le transit de $+2854$ ne sera visible qu'en Antarctique. L'écliptique est en traits interrompus [27].

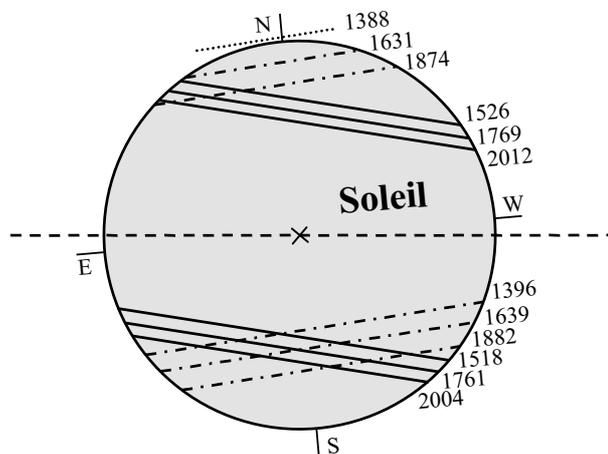


FIG. 18: Trajets de Vénus sur le disque solaire, de 1388 à 2012; entrée à gauche (E), sortie à droite (W). Types de traits : continus \equiv nœud descendant D — d'axe \equiv nœud ascendant A — pointillés \equiv pas de transit — interrompus \equiv écliptique.

aux 0.7 j tolérés, si bien que l'on peut perdre l'intervalle de 8 ans tantôt à un nœud, tantôt à l'autre, tantôt aux deux. C'est alors un *transit simple*. La séquence n'est par exemple pas apparue de -920 à $+1631$, soit durant plus de 25 siècles ! Autour de 2004, elle est à nouveau présente. On peut visualiser cela en reportant la distance Δ en fonction du temps. C'est ce qui est fait pour Vénus à la Figure 19 (Δ est exprimé en $'$). Les traits quasi verticaux rejoignent des transits espacés de 8 ans (transits doubles). On voit clairement que la situation se répète tous les 243 ans, avec une légère dérive.

On peut faire un raisonnement analogue pour les transits de Mercure ; on trouvera alors des périodes de 13, 33, 46 et 217 ans et des passages qui ont lieu début mai et début novembre. Cependant, la plus grande excentricité de l'orbite de Mercure ($e_{\text{Mercure}} \approx 0.206$) cause des asymétries plus importantes entre les nœuds A et D (par exemple, point

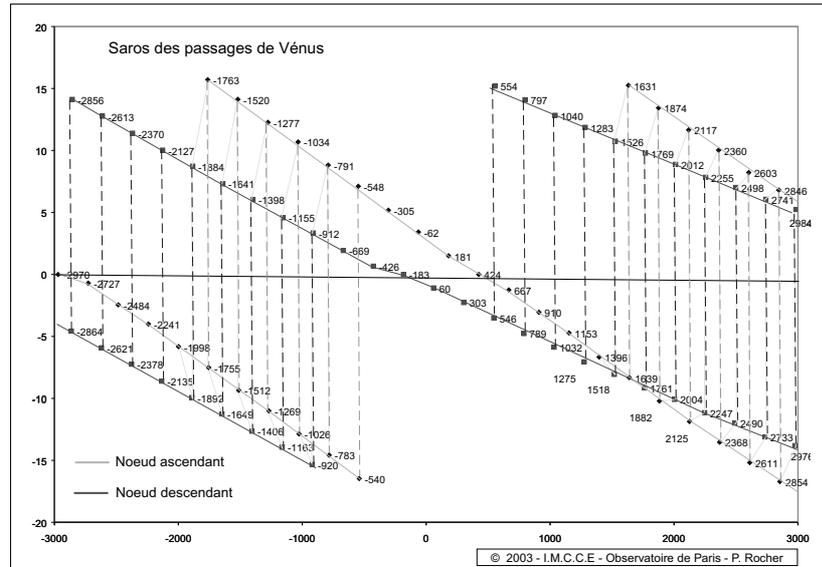


FIG. 19: Séries de récurrences des transits de Vénus entre -3000 et $+3000$ (source [1]).

il y a 63 transits en novembre contre 31 en mai ; et également point de vue durée : un transit central en mai dure 7.9h contre 5.5h en novembre).

La Figure 20 représente l'occurrence des transits de Mercure au nœud D (Δ est exprimé en $''$ cette fois). L'allure est singulièrement différente de celle des transits de Vénus : les transits de Mercure sont en effet environ 10 fois plus nombreux que ceux de Vénus. Chaque sommet de la grille triangulaire représente un transit en l'année indiquée. Les points joints par des traits continus, interrompus ou pointillés sont espacés de respectivement 46, 33 ou 13 ans. On pourrait également tracer les lignes de période de 217 ans (quasiment horizontales, entre 1845 et 2062, ou 1832 et 2049). La pente des lignes en trait continu est d'environ $-200''/46$ ans. La périodicité de 46 ans n'est pas immuable : une série s'arrête en 1937 et une autre débute en 1957.

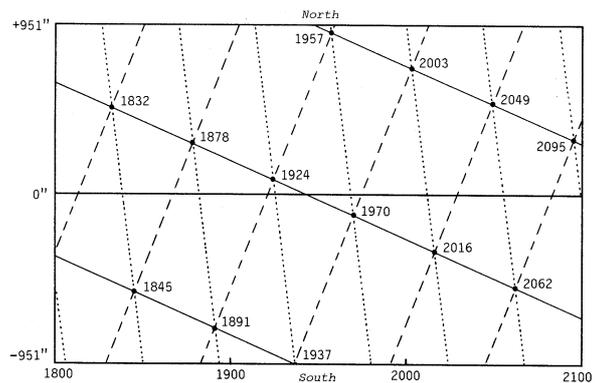


FIG. 20: Transits de Mercure au nœud descendant D (en mai) de 1800 à 2100 [27].

On pourrait également considérer les transits possibles à partir d'autres planètes que la Terre [27].

Notons pour terminer que les cordes tracées par Vénus sur le disque solaire sont à un angle d'environ $8^{\circ}46'$ par rapport à l'écliptique (voir Fig. 2), tandis que l'inclinaison de l'orbite de Vénus n'est que de $3^{\circ}24'$. La cause est une illusion d'optique due au fait que nous observons à partir de la Terre, qui est en mouvement (dans le même sens que Vénus). On peut retrouver la valeur de $8^{\circ}46'$ par un calcul simple à partir des périodes sidérales $T = 365.256\,36$ j et $V = 224.701$ j : l'angle vaut $\arctan(\tan(3^{\circ}24') \times T/(T - V)) = 8^{\circ}46'$. A la limite, si la Terre avançait à la vitesse angulaire de Vénus, cet angle vaudrait 90° !

8 Estimez la valeur de l'UA (Unité Astronomique)

On peut déterminer les valeurs relatives² des demi grands axes a des planètes à partir de leurs périodes. En effet, la 3^e loi de KEPLER donne le lien entre a et la *période orbitale* T : $T^2/a^3 = \text{constante}$ (cette relation peut également s'écrire $T^2 \times n^3 = \text{constante}$ car on a la relation $nT = 2\pi$). La détermination des dimensions absolues du Système Solaire nécessite par contre de déterminer au moins une distance : c'est tout le problème de la détermination de l'UA, un des plus gros défis de l'astronomie du XVII^e siècle ! On apprend à l'école que l'UA vaut environ 150 millions de km, et peu s'interrogent de savoir comment il est possible de mesurer une telle distance, tant elle semble énorme ; on oublie également qu'il a fallu des efforts considérables pour arriver à obtenir une telle mesure. Nous rappelons ici brièvement comment on a pu y parvenir.

On a tout d'abord pensé à utiliser la parallaxe solaire α (voir Fig. 4) : on voit en effet immédiatement que l'on peut obtenir une estimation de l'UA via la relation $L_T = R_T/\sin(\alpha)$ — où l'on peut prendre $\sin(\alpha) \approx \alpha$ car α est assurément petit. Il s'agissait donc de connaître R_T et α .

On dispose depuis longtemps d'estimations du rayon de la Terre R_T , la plus célèbre étant celle d'ERATOSTHÈNE (284–192 ACN), qui fit la première mesure précise de R_T . Il utilisa très astucieusement la trigonométrie, en l'occurrence ici que la longueur de l'arc de cercle est proportionnelle à l'angle au centre. Il exploita le fait qu'à Alexandrie, le jour du solstice d'été, l'ombre portée d'un bâton à midi faisait un angle de $1/50$ de 360° , alors qu'elle était nulle (le Soleil était au zénith, ce qu'il put vérifier car la lumière du Soleil arrivait dans le fond d'un puits profond) 800 kilomètres plus au Sud, à Syène (maintenant Assouan sur le Nil en Egypte) situé sur le tropique du Cancer. Il en déduisit que la distance entre ces 2 villes devait donc valoir également $1/50$ de la circonférence de la Terre (en supposant que le Soleil était si loin que ses rayons étaient parallèles). Connaissant la distance entre ces 2 villes (5 000 stades), il trouva que la longueur de la circonférence de la Terre devait valoir 250 000 stades. Même s'il y a une certaine polémique quant à savoir quelle est la longueur d'un stade, elle tourne en tout cas autour de 160 m, ce qui fait qu'ERATOSTHÈNE trouva ainsi $R_T \approx 6\,500$ km, soit une valeur remarquablement correcte (la valeur communément admise est $R_T = 6.378 \times 10^6$ m pour le rayon équatorial). Ce fut le premier calcul mathématique de mesure dans le Système Solaire.

²Remarquons que la puissance des triangles rectangles est également redoutable à cet égard : grâce à eux, on a pu facilement estimer des rapports de distances, en mesurant astucieusement un seul angle (différence angulaire entre l'objet et le Soleil) : il suffit de le mesurer au moment où l'on sait qu'on a un triangle rectangle (ce qu'on peut savoir en observant les phases de l'objet étudié) !

Par contre, la très faible valeur ($\approx 1^\circ/409$) de α empêcha sa mesure directe et sa détermination posa problème pendant longtemps; on a donc dû avoir recours à des moyens indirects pour estimer l'UA. Il est à noter que la grande majorité des anciennes estimations de l'UA sous-estiment fortement sa valeur réelle. HORROCKS par exemple calcula que $\alpha = 14''$ et donc $1 \text{ UA} = 14\,700 R_T$, ce qui est trop peu. Historiquement, deux types de méthodes ont été utilisées pour estimer l'UA : la méthode trigonométrique de triangulation (passage de Mars à l'opposition) et le passage des planètes inférieures devant le Soleil (transit de Vénus).

Nous décrivons ici brièvement la méthode de HALLEY (1716) qui a permis la première estimation de l'UA à partir du transit de Vénus; cette méthode vous permettra de réévaluer vous-même la valeur de l'UA le 8 juin 2004. Il s'agit ici d'une version simplifiée; la méthode complète requérant des notions plus complexes

(de trigonométrie sphérique), avec notamment la prise en compte d'un effet de rotation différentielle terrestre. L'idée est représentée à la Figure 21 : si on observe le passage à partir de 2 latitudes différentes sur Terre, on verra des lignes de transit légèrement écartées sur le Soleil. Supposons que la distance d (en km) soit connue; la distance D (en km) peut alors être estimée à l'aide du théorème de Thalès et de la 3^e loi de KEPLER :

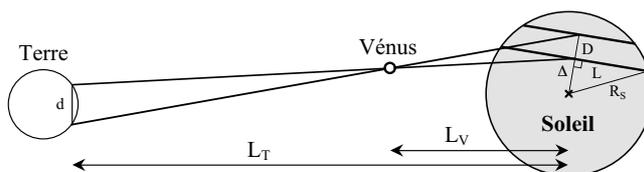


FIG. 21: La méthode de HALLEY (1716) pour calculer L_T (estimation de l'UA).

requérant des notions plus complexes (de trigonométrie sphérique), avec notamment la prise en compte d'un effet de rotation différentielle terrestre. L'idée est représentée à la Figure 21 : si on observe le passage à partir de 2 latitudes différentes sur Terre, on verra des lignes de transit légèrement écartées sur le Soleil. Supposons que la distance d (en km) soit connue; la distance D (en km) peut alors être estimée à l'aide du théorème de Thalès et de la 3^e loi de KEPLER :

$$\frac{D}{d} = \frac{L_V}{L_T - L_V} = \frac{1}{\left(\frac{T}{V}\right)^{2/3} - 1} \approx 2.627$$

On souhaite maintenant obtenir la valeur de cette distance D en unités d'angle ($''$) au lieu d'unités de longueur (km), afin d'en déduire ensuite la valeur de l'UA. L'idée est de calculer la proportion angulaire D/R_S à partir d'un relevé tel que celui de la Figure 22. On peut tout d'abord calculer Δ via le théorème de Pythagore : $\Delta^2 = R_S^2 - L^2$. Le rayon R_S est connu : $R_S = \beta \approx 16'$ (demi-diamètre apparent), tandis que la distance $2L$ est le déplacement angulaire de Vénus durant le transit. On déduit ensuite $D = \Delta_1 - \Delta_2$ (on peut aussi utiliser la relation différentielle $\Delta \delta \Delta = -L \delta L$ vu que les 2 cordes sont très proches). On peut alors conclure par le calcul de l'UA et de la parallaxe solaire α .

Reste à déterminer la valeur angulaire d'une corde L : comme on ne peut la mesurer directement, on l'estime à nouveau indirectement, à partir des temps de transit. Si les lignes de transit sont différentes, elles ont forcément des longueurs de cordes différentes, et donc des temps de passage différents. HALLEY avait remarqué que la durée du passage serait d'environ 7h, et que l'image de Vénus avancerait à la vitesse v de $1''$ en 14 s. Il est aisé de la calculer à partir de la période synodique de Vénus $S = 583.92 \text{ j}$ et de $L_V = 0.723 \text{ UA}$: $v = (L_V/(1 - L_V)) \times (360 \times 60)/(S \times 24) \approx 4'/\text{h} = 4''/\text{min}$.

Voici un exemple numérique illustratif : supposons que les 2 lieux d'observation soient distants de $d = 5\,000 \text{ km}$ et qu'en ces lieux on mesure des temps de transit de 6h et de 6h08m. On en déduit alors successivement $D \approx 13\,135 \text{ km}$, $2L_1 = 24'$ et $2L_2 \approx 24'53$, soit $\Delta_1 \approx 10'58$ et $\Delta_2 \approx 10'27$ d'où $D \approx 0'31 \approx 0.000\,09 \text{ rad}$; on calcule finalement l'UA en supposant qu'on a un arc de cercle de longueur D (km) vu sous un angle de D (rad) avec un cercle de rayon L_T : $L_T = 13\,135 \text{ km}/0.000\,09 = 145\,660\,657 \text{ km}$. On en déduit alors la

valeur de la parallaxe $\alpha = \arcsin(R_T/L_T) = \arcsin(6\,378\text{ km}/145\,660\,657\text{ km}) \approx 9''.03$. Ces estimations ne sont pas très éloignées des valeurs communément admises : $\alpha = 8''.794\,148$ (mesure radar sur Vénus, NASA 1990), soit $1\text{ UA} = 149.597\,870 \times 10^6\text{ km}$.

Il s'agit donc *in fine* de mesurer le plus précisément possible le temps écoulé entre l'entrée et la sortie de Vénus dans le disque solaire. Les 2 contacts extérieurs étant quasiment inobservables, on se basera surtout sur les 2 contacts intérieurs (le 2^e et le 3^e contact). On effectue alors la mesure simultanément à partir de 2 lieux d'observation différents, avec le plus grand écart possible en latitude pour avoir plus de précision (il est préférable de garder la même longitude tant que l'on ne dispose pas d'horloge précise). Ceci a conduit aux grandes expéditions et a également amené le problème de la détermination des coordonnées géographiques locales (la longitude posant le plus de difficultés).

Il est à noter que le décalage entre les lignes de transit représenté à la Figure 21 est très largement exagéré; la réalité ressemble plutôt à la Figure 22. On peut facilement voir que le décalage angulaire D entre les lignes de transit pour $d = R_T$ vaut en fait la différence des parallaxes de la planète et du Soleil. Cet écart D est donc d'autant plus grand que la planète en transit est plus proche de nous — donc pour Vénus que pour Mercure. Pour Vénus et pour $d = R_T$, on a que $D = \alpha_{Vénus} - \alpha_{Soleil} \approx 32'' - 9'' = 23''$. Ce décalage ne peut valoir au maximum que $D \approx 46''$, ce qui correspond au cas où les observateurs sont le plus éloignés possible sur Terre ($d = 2R_T$). Et $46''$ ne représentent que $3/4$ du diamètre apparent de Vénus! On est donc dans une situation où il s'agit d'être extrêmement minutieux dans la mesure des instants de contact. HALLEY calcula qu'une erreur de 1 s dans la mesure du temps de passage produirait seulement une erreur de $1/500''$ pour la parallaxe solaire α .

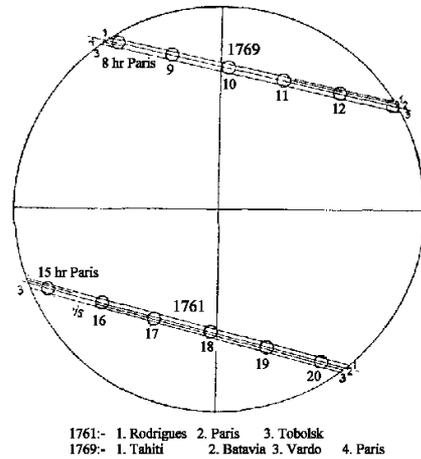


FIG. 22: Différents trajets de Vénus pour les transits de 1761 et 1769.

L'astronome français DELISLE (1688–1768) apportera une modification théoriquement intéressante à la méthode de HALLEY. Selon cette variante, il n'était plus nécessaire d'observer à la fois l'entrée et la sortie de Vénus devant le disque solaire : un seul de ces deux instants devait suffire, à la condition toutefois de connaître la position exacte de l'observateur au moment de l'observation. Or, la connaissance de la longitude n'était pas facile; DELISLE commença donc par consacrer beaucoup de temps à l'amélioration des techniques permettant de déterminer les longitudes très précisément. La méthode de DELISLE présentait l'avantage non négligeable d'accroître considérablement le nombre d'observations utiles par l'augmentation du nombre de stations possibles : le risque global de mauvaises conditions météorologiques est alors beaucoup plus limité que si on reste confiné aux seuls endroits d'où l'on voit le transit dans sa totalité.

9 Une précision limitée toutefois

Les résultats ne furent toutefois pas aussi bons que ce que HALLEY avait espéré : la précision sur α n'était que de $1/20''$ au lieu de $1/500''$. Cela était dû d'une part aux erreurs de détermination des coordonnées en longitude mais d'autre part à un phénomène inattendu qui limita la précision des mesures : le phénomène de la "goutte noire". Le dessin repris à la Figure 23 illustre ce phénomène ; il a été réalisé lors du transit de Vénus de juin 1769 par le Captain COOK, lors de l'expédition de l'Endeavour à Tahiti.

Le phénomène de la "goutte noire" [28] se manifeste près des contacts et gêne la détermination précise des instants de contact. Près du bord du Soleil (*limbe solaire*), le disque sombre semble prendre la forme d'une petite goutte de liquide noir, ce qui incite à croire que la planète touche le bord du disque solaire, alors que ce n'est pas le cas en réalité. L'ordre de grandeur de l'imprécision est de 20 s à 60 s. L'origine du phénomène est restée longtemps mystérieuse ; on l'avait d'abord attribuée à la réfraction à travers l'atmosphère de Vénus ; mais cette hypothèse a dû être écartée, le phénomène de la "goutte noire" ayant également été observé pour Mercure (qui n'a pour ainsi dire pas d'atmosphère). Actuellement, on attribue le phénomène de la "goutte noire" à un effet de diffraction [30] qui a même pu être reproduit facilement en laboratoire [31] ; il faut toutefois un grossissement suffisant. Vous pouvez aisément reproduire vous-même ce phénomène en rapprochant le pouce et l'index situés à une dizaine de centimètres de vos yeux et placés devant une source lumineuse intense (le ciel, par exemple). Le phénomène de diffraction est également à l'origine de l'histoire du soi-disant volcan de Mercure, à cause de l'apparence d'un point brillant observé au centre du disque noir de la planète.

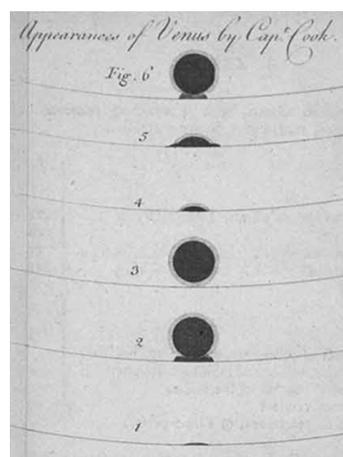


FIG. 23: Phénomène dit "de la goutte noire" (Crédit : Linda Hall Library of Science, Engineering & Technology [29]).

Malgré cela, l'estimation de la parallaxe solaire α qui en résulta fut une grande première : entre $8''.43$ et $8''.80$, ce qui correspond tout de même à une précision relative de 4% sur l'UA. Grâce aux efforts persévérants de nombre d'astronomes, explorateurs, marins, etc., on put enfin disposer d'une échelle absolue de distance dans le système solaire, après avoir été longtemps cantonné aux échelles relatives. Le phénomène du transit contient toutefois intrinsèquement des limitations en précision ; il faudra l'avènement des mesures radar afin d'atteindre beaucoup plus de précision.

10 Conclusion & remerciements

Voilà ! Vous avez à présent tout ce qu'il vous faut pour pouvoir calculer vous-même le transit 2004, participer aux campagnes de mesure et comprendre un peu mieux comment tout cela se passe. Je vous encourage surtout à vivre l'événement personnellement. N'oubliez pas l' **Avertissement** ! Admirez le célèbre effet de la "goutte noire". Croisons les doigts pour la météo !

J'ai souhaité que la majorité des références de cet article soient principalement des ressources que l'on peut trouver sur Internet — cela procède d'un souci d'accès rapide et bon marché à l'information mondiale; le lecteur curieux pourra par ailleurs toujours facilement y trouver de nombreuses références de livres s'il le souhaite. Les personnes intéressées par de plus amples renseignements (notamment pour avoir l'adresse de quelques revendeurs de matériel : télescopes bon marchés, lunettes pour éclipses, feuilles de filtre spéciaux, etc.) peuvent me contacter, de préférence par email.

Je tiens à remercier toutes les personnes ou institutions qui interviennent entre autres via les Références bibliographiques de cet article; et en particulier plusieurs personnalités qui ont déjà œuvré à la diffusion de l'information sur le transit de Vénus 2004 — p. ex. en tant que conférenciers, ou via Internet, ou encore en donnant aimablement leur autorisation pour la publication d'images. Je songe (entre autres et non exhaustivement) à RENÉ DEJAIFFE (SRBA), ALAIN JORISSEN (ULB), FRANÇOIS MIGNARD (OCA), FRED ESPENAK (NASA/GSFC), ROLAND BONINSEGNA (EAAE), l'UCLan (GB), l'ESO et à l'IMCCE (qui fournit des informations très complètes [32] sur les passages). Un merci tout spécial à JEAN MEEUS, une célébrité non seulement belge mais mondiale, grand spécialiste des éphémérides et des algorithmes astronomiques [33], qui a gentiment accepté de relire le présent article.

Références

- [1] <http://www.imcce.fr/vt2004/fr/index.html> (*Venus Transit Page*).
- [2] http://funsci.com/fun3_en/sky/sky.htm (*Camera obscura*).
- [3] <http://www.solarscope.org> (*Solarscope*).
- [4] <http://www.vt-2004.org/> (*Official Venus Transit Page*).
- [5] "Ephémérides astronomiques 2004", dans *Ciel et Terre, Bulletin de la Société Royale Belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe (SRBA)*, Vol. 119, No. 5, septembre-octobre 2003.
- [6] <http://www.transit-of-venus.org.uk/safety.htm> (*Sécurité des observations*).
- [7] http://bass2000.obspm.fr/solar_web.php (*Base de données sur le Soleil : taches solaires, etc.*).
- [8] http://sunearth.gsfc.nasa.gov/sunearthday/2004/index_vthome.htm (*NASA Transit Page*).
- [9] <http://www.transitofvenus.org> (*Site extrêmement complet sur les transits de Vénus - Chuck Bueter*).
- [10] <http://www.planetarium.be> (*Site du planétarium de Bruxelles*).
- [11] <http://www.transit-of-venus.org.uk/conference/index.html> (*Congrès GB*).
- [12] <http://www.venus2004.org/> (*Pédagogie*).
- [13] <http://www.ac-nice.fr/clea/MercureVenus/protocol.htm> (*Proposition de protocole pour mesurer la distance du Soleil le 8 juin - niveau 14-15 ans*).
- [14] <http://www.imcce.fr/vt2004/fr/fiches.html> (*Fiches pédagogiques d'aide pour les enseignants, étudiants et astronomes amateurs*).
- [15] <http://www.heavens-above.com/countries.asp> (*Coordonnées géographiques*).
- [16] <http://www.gothard.hu/astronomy/astronews/html/2003/20030507-Mercury-transit.html> (*Photo du transit de Mercure 2003*).
- [17] <http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/transit/transit.html> (*Infos très complètes sur les Transits, entre autre celui de Vénus 2004*).
- [18] http://www.dsellars.demon.co.uk/venus/ven_ch8.htm (*Texte de l'appel de Halley - Phil. Trans. Vol. XXIX (1716) "A new Method of determining the Parallax of the Sun, or his Distance from the Earth", by Dr. Halley, Sec. R. S. N° 348, p.454. Translated from the Latin.*).
- [19] http://www.usno.navy.mil/pao/History/Figure_7_13.htm (*Photo (rare) du Transit de 1882 - U.S. Naval Observatory*).
- [20] <http://www.melbourneobservatory.com/> (*Historique richement illustré des transits de Vénus, avec entre autres la description du voyage de Cook et des instruments*).
- [21] "Le Rendez-vous de Vénus", Luminet J.-P., ed. J.-C. Lattès, 1999.
- [22] "Le passage de Vénus", Jean-Paul Dethorey, Jean-Pierre Autheman, François Bourgeon et Tomas Bergfelder, Dupuis (coll. Aire Libre), Tome 1 : 1999, Tome 2 : 2000.
- [23] <http://www.astro.oma.be/GENERAL/INFO/fri001.html> (*UT - heure d'hiver/été*).

- [24] <http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/transit/TV2004.html> (*Moments des contacts du Transit 2004 pour différentes villes du monde*).
- [25] *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, edited by P. Kenneth Seidelmann, USNO Washington, D.C.
- [26] <http://www.imcce.fr/Equipes/ASD/mars/oppo.html> (*Petite notice sur les oppositions de Mars*).
- [27] Meeus, J., 1989, *Transits*, Willmann-Bell, Inc., Richmond. (*Ephémérides précises des transits*).
- [28] <http://home.hetnet.nl/~smvanroode/> (*Site très complet sur les transits de Vénus – Steven van Roode, en Néerlandais*).
- [29] http://www.lhl.lib.mo.us/events_exhib/exhibit/exhibits/voyages/index.html (*Expéditions scientifiques 1679–1859, Linda Hall Library of Science, Engineering & Technology*).
- [30] http://www.imcce.fr/vt2004/fr/fiches/fiche_n20b.html (*Phénomène de la "goutte noire"*).
- [31] "Lunettes et télescopes", André Danjon et André Couder, Ed. Albert Blanchard (Paris), 1935 (réédité en 1979).
- [32] <http://www.imcce.fr/ephem/passage/html/passage.html> (*Passages des planètes Mercure et Vénus devant le Soleil : explications, éphémérides, annexes pédagogiques, etc.*).
- [33] Meeus, J., 1999 (2nd Edition), *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell, Inc., Richmond. (*Algorithmes astronomiques*).