



À la *mesure* du Ciel

Ce feuilleton est consacré à l'une des disciplines sans doute les plus méconnues sinon les plus austères de l'astronomie : l'astrométrie ou la mesure de la position des astres dans le ciel. Elle est aussi l'une des premières activités des astronomes de l'Antiquité. Elle est au fondement de l'astronomie. Sans elle et sans le gain en précision associé à cette branche, acquis au fil du temps jusqu'à nos jours, l'astronomie n'aurait pu se développer. Il était donc urgent de revenir aux racines de l'astronomie.

— par Pascal Descamps

DEUX PLANÈTES DANS LE SOLEIL

Gassendi et le nouveau messager céleste

PARIS, 7 novembre 1631, dans un appartement de la rue du Four, un homme, patient, attend dans l'obscurité totale. Dans l'aube naissante, il guette le Soleil, ainsi qu'il le fait depuis déjà deux jours. Deux jours de traque, enfermé dans cette pièce, qu'il a volontairement obscurcie à l'aide de tentures épaisses. Il n'est pas seul cependant, un assistant se trouve dans un étage supérieur. Tous deux sont ainsi reclus, du lever au coucher du Soleil. Seule la nuit leur redonne leur liberté de circulation, entravée cependant par la fatigue de la journée accumulée. L'accent de l'homme trahit ses origines méridionales. À la fois chanoine et prévôt de Digne, il est l'une des figures intellectuelles de son temps, tout à la fois philosophe, mathématicien et astronome. Dans quelques années, il sera nommé à la chaire d'astronomie du Collège de France par l'évêque de Lyon, frère du cardinal de Richelieu. Pierre Gassendi (1592-1655), tel est son nom, fervent copernicien, partisan des idées nouvelles de Galilée et de Kepler, espère, dans cette petite pièce sombre, assister à un phénomène céleste qu'aucun homme avant lui n'a jamais observé, le passage de la planète Mercure devant le Soleil. En 1629, peu de temps avant sa mort – le 15 novembre 1630 –, le grand Kepler avait fait paraître un *admonitio ad astronomos* (fig. 1), un « avertissement sur ce qu'il fallait observer dans le ciel, sur les phénomènes rares et remarquables de l'année 1631 ». D'après ses calculs, Mercure devait passer devant le Soleil le 7 novembre, entre

une heure et deux heures de l'après-midi, mais il conseillait également de pratiquer l'observation à partir du 5 novembre sur toute l'étendue du jour, conscient des grandes incertitudes qui entachaient encore la connaissance précise du mouvement de la planète. Les deux hommes étaient ainsi pris dans cette stratégie d'observation, luttant obstinément contre la fatigue et le découragement. Le 5 novembre, pluie incessante, le 6, Soleil brièvement aperçu à travers un brouillard épais, le 7 novembre était attendu avec impatience et inquiétude.

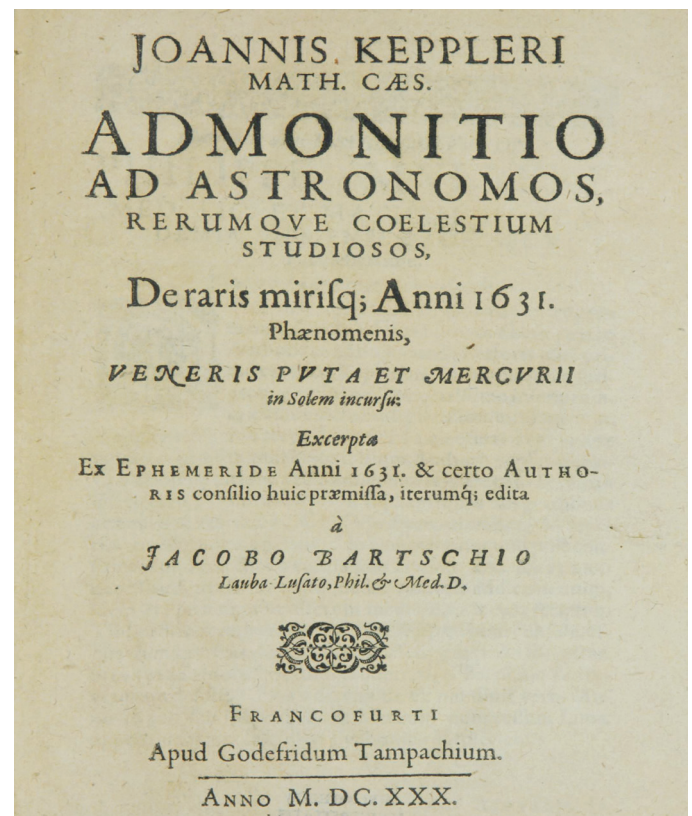


Fig. 1 – Page de titre de l'avertissement aux astronomes lancé par Kepler en 1627 pour observer le passage de Mercure devant le Soleil du 7 novembre 1631.

Domaine public

Gassendi a la foi de l'astronome, le ciel ennuagé de Paris en ces premiers jours de novembre n'atteint pas sa détermination. Il s'était consciencieusement préparé pour l'événement. Muni d'une lunette de Galilée, il avait fait percer un trou dans la lourde tenture afin de l'y placer et, ce faisant, recueillir, en toute sécurité, l'image projetée du Soleil sur un écran blanc, sur lequel avait été dessiné un cercle d'environ 24 cm de diamètre, et à l'intérieur duquel l'image du Soleil devait venir s'inscrire. Le diamètre du cercle était divisé en 60 parties et sa circonférence en 360 degrés. Gassendi lui supposait un diamètre angulaire apparent de 30 minutes de degré, donnant à chaque partie du diamètre divisé une taille de 30". Il pourrait ainsi porter la trajectoire de la planète Mercure à l'intérieur du disque solaire, et relever sa position en longitude et latitude héliocentriques en la rapportant au centre du Soleil et à la position apparente de l'écliptique. Le dispositif serait incomplet si n'était également prévue la mesure des instants. Pour ce faire, son assistant disposait d'un quart de cercle lui servant à prendre la mesure de la hauteur du Soleil quand Gassendi lui en donnerait le signal. La connaissance du mouvement du Soleil permettait ensuite d'en déduire l'heure locale pour chaque position mesurée (l'horloge à pendule isochrone n'existait pas encore, elle ne sera inventée qu'en 1659 par Huygens (1629-1695) et publiée dans son *Horlogium Oscillatorium* en 1673).

Vers 8 heures du matin, Gassendi aperçoit le Soleil entre des nuages épais, mais bien trop brièvement pour qu'il puisse en faire quoi que ce soit. Puis, une heure plus tard environ, le Soleil est de retour, plus clair de surcroît, son image est maintenant bien visible sur le support en carton qui lui sert d'écran. Gassendi y voit un petit point noir, il y prête à peine attention, car, selon les idées de Kepler, la planète devait avoir une taille bien plus considérable. Il pense alors que c'est l'une des taches solaires qu'il a déjà eu l'occasion d'observer les jours précédents. Il ne relève ni la position ni ne donne à son aide le signal pour la mesure de la hauteur correspon-

dante du Soleil. Lors de l'éclaircie suivante, vers 10 heures, Gassendi note quelque chose qui le remplit de perplexité, le petit point noir semble avoir changé de place, mais il n'en est pas sûr. Mais, le petit point persiste, à nouveau sa position change, cette fois-ci, Gassendi comprend qu'il ne peut s'agir d'une tache dont le mouvement est sensiblement moindre, l'inquiétude le gagne tant il lui est difficile de croire qu'il puisse en réalité s'agir de Mercure, mais il doit se résoudre à la seule conclusion possible : ce minuscule point noir ne peut être que Mercure, c'est la planète qui s'avance ainsi sous ses yeux ébahis, à l'intérieur du cercle du Soleil. Le petit point noir est en fait un cercle parfait dont il peut mesurer la taille. L'émotion est forte, il crie, il trépigne à en oublier de donner le signal à son assistant, mais aucune réponse de sa part, l'assistant n'est pas à son poste. Gassendi l'appelle, il a besoin de lui, il ne peut à la fois relever la position de la planète et monter à l'étage pour prendre la hauteur du Soleil. Heureusement, l'aide revient juste avant la sortie de Mercure du disque du Soleil. Il prend la hauteur du Soleil précisément à l'instant de la sortie – instant remarquable recherché par Gassendi –, $21^{\circ}44'$, ce qui fixe cet instant à 10 h 20 du matin en temps solaire vrai local.

La mesure de la hauteur, partant, celle de l'instant, est sujette à erreur compte tenu du fait que les corrections de réfraction et de parallaxe qui devaient ensuite être apportées étaient encore très mal maîtrisées. À cet égard, il est utile de remarquer qu'un changement d'une minute d'arc dans la hauteur du Soleil modifierait de 15 secondes, le temps du phénomène. Il mesure un diamètre angulaire de la tache de 20" – il était en réalité de 10", mais la petitesse de Mercure, rapportée à la taille du Soleil projetée, avoisinait les 1,3 mm sur l'écran, quantité très difficile à mesurer avec précision à l'époque. Mercure, le dieu romain, messenger des dieux, venait de délivrer son message sur les vraies dimensions et grandeurs des mondes célestes. Gassendi en fut le premier destinataire.

Pour dire vrai, il ne fut pas le seul, il y eut aussi deux autres témoins de l'événement céleste, Johannes Remus Quietanus (1588-1654) à Ruffach en Alsace, et Johann Baptist Cysat (1587-1657) à Innsbruck en Autriche. Tous deux ne rapportèrent que la mesure du diamètre apparent de Mercure et ne publièrent rien. Quant à Gassendi, l'année suivante, il publia comme une lettre ouverte à son collègue Wilhelm Schickard (1592-1635), titulaire de la chaire d'astronomie de Tübingen, son *Mercurius in Sole Visus et Venus Invisa*. Et Gassendi de conclure fièrement, dans une lettre à Schickard :

*Le rusé Mercure voulait passer
sans être aperçu, il était entré plus tôt
qu'on ne s'y attendait, mais il n'a pu s'échapper
sans être découvert, je l'ai trouvé et je l'ai vu ;
ce qui n'était arrivé à personne avant moi,
le 7 novembre 1631, le matin.*

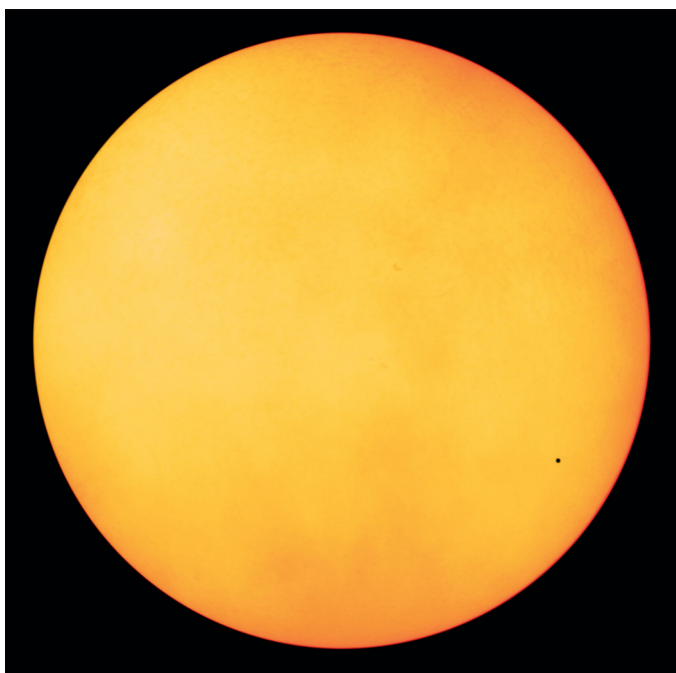


Fig. 2 - Passage de Mercure du 9 mai 2016.

À noter, l'extrême petitesse de Mercure relativement au Soleil. Les prochains passages de Mercure visibles depuis Paris se produiront en novembre 2032 et novembre 2039.

Crédits IMCCE

Un problème de taille !

LA TAILLE APPARENTE DE MERCURE, respectivement à celle du Soleil, constituait l'un des principaux intérêts d'une telle observation. Gassendi s'en était fait l'écho le 9 juillet 1631 dans un courrier adressé à son ami Nicolas-Claude Fabri de Peiresc (1580-1637), qui était resté à Aix-en-Provence :

*Certainement quiconque aura le bien
de faire cette observation donnera grand sujet
à la postérité de parler de lui. Il n'arrivera pas
que d'ici à six-vingt ans on en fasse une pareille.
Or entre ici et ce temps-là on aura bien eu
le loisir de débattre sur la perche du diamètre
de ces planètes par rapport à celui du soleil,
et il n'y a que les observations de cette nature
qui nous en puissent éclaircir.*

Si Kepler n'avait pas fait mention de la taille de Mercure dans son *admonitio*, toutefois celle-ci pouvait être calculée par le même raisonnement que Kepler avait suivi pour la taille de Vénus, à l'occasion d'une autre prédiction de passage devant le Soleil, celui de Vénus pour la date du 7 décembre 1631. Ce passage ne fut observé par personne sur Terre, car il se produisait de nuit pour les astronomes européens, autrement dit il était uniquement visible depuis l'Amérique du Sud.

Kepler, fidèle à ses idées sur l'harmonie céleste, faisait l'hypothèse que la taille des planètes est proportionnelle à leur volume. Puisque Vénus se trouve à une distance du Soleil de 0,72 au (*au* est l'unité astronomique, soit la distance moyenne Terre-Soleil), son volume doit en conséquence être 0,72 fois plus petit que celui de la Terre (qui se trouve par définition à 1 au). Le diamètre de Vénus doit ainsi être 0,9 fois celui de la Terre – ce qui est presque le cas ! Par ailleurs, comme Kepler avait adopté une parallaxe solaire de 1', cela revenait à

dire que le diamètre apparent de la Terre soutendu à une distance d'une unité astronomique était de 2'. Enfin, lorsque Vénus est en situation de passer devant le Soleil – à sa conjonction inférieure –, elle se trouve à une distance de la Terre de 0,26 au. Vue depuis la Terre, Vénus présenterait donc un diamètre apparent de $2' \times 0,9 \times 1/0,26$, soit environ 7'. En appliquant le même raisonnement à Mercure, la taille apparente attendue de Mercure en conjonction inférieure devait donc être de 2,5' ou 150". Gassendi avait probablement fait ce petit calcul tant son étonnement devant la petitesse de la tache mercurienne – 7,5 fois plus petite – l'a subjugué. Là où il espérait voir un disque noir couvrant 5 de ses graduations, tracées sur l'écran portant l'image du Soleil, il ne vit qu'un minuscule grain de beauté à peine plus large qu'une demi-graduation.

L'observation de Gassendi fit grand débat dans le microcosme du milieu astronomique. Quant à Galilée, il ne fut pas surpris de la petite taille de Mercure et ne commenta pas l'observation. Mais d'autres tentèrent de faire le même procès que celui intenté à Galilée vingt ans plus tôt, lors de la publication en 1610 de son *Sidereus Nuncius*. Gassendi a-t-il vraiment vu ce qu'il nous dit ? Sa mesure est-elle aussi fiable qu'il le dit ? Des explications sont alors recherchées pour démontrer que Mercure est en réalité bien plus grande que ne le laisse penser son passage sur le Soleil. Le Soleil est pointé comme le grand responsable de ce petit Mercure. Son éclat viendrait illuminer bien plus qu'un hémisphère, diminuant ainsi artificiellement la dimension visible de la planète depuis la Terre. En outre, Mercure ne serait pas entièrement opaque, seul un cœur solide le serait, entouré d'une croûte épaisse translucide. Quant à Gassendi, il ne se prononce pas, il ne se perd pas en conjectures spéculatives, il préfère laisser aux générations suivantes le soin de résoudre ce problème et se bercer du bonheur d'avoir été le premier et le seul à avoir observé un tel phénomène. Ainsi, le 2 février 1632, il écrit à son ami Peiresc :

Je ne rapporte pas à un petit bonheur d'avoir fait cette observation de Mercure devant le soleil ; elle est très importante tant pour être la première qui a été faite de cette façon, que pour devoir servir à ceux qui viendront après nous soit pour déterminer la grandeur et l'éloignement soit pour régler les mouvements de cette planète.

Le débat sur la taille de Mercure en resta là, pour le moment, et nul n'osa aller sur un autre terrain pour tenter de l'expliquer, celui de la distance Terre-Soleil, en d'autres termes, celui de la parallaxe solaire, qui nécessairement devait être revue à la baisse, bien au-dessous de la minute de degré adoptée par Kepler. Seulement, cela revenait à augmenter les dimensions du Système solaire, et à réduire encore plus la place de la Terre en son sein, de quoi donner le vertige...

Une observation pour corriger les tables

GASSENDI LE DISAIT, dans sa lettre à Peiresc, son observation pourrait également servir à « régler les mouvements de cette planète ». L'observation consciencieuse qu'il avait faite constitua la première observation d'une longitude héliocentrique de Mercure. Dans ses *Éléments d'astronomie*, publié en 1740, Jacques Cassini (1677-1756) l'emploie pour sa théorie du mouvement de Mercure. Lalande (1732-1807), dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences en 1753 – « Sur la conjonction éclipstique de Mercure et du Soleil du 6 mai 1753 » –, a parfaitement résumé les bénéfices immédiats à tirer de telles observations :

Lors des conjonctions, dans lesquelles Mercure passe devant le Soleil, comme il est vu alors de la Terre dans la même ligne où il serait vu

*du Soleil, tout ce qu'on observe est, pour ainsi dire,
réel ; l'inclinaison de l'orbite observée
sera la véritable et le lieu du nœud, vu de la Terre,
le même qu'il se trouverait étant vu du Soleil,
ou, ce qui revient au même,
distant de six signes de ce dernier.*

Gassendi en tira effectivement de façon très immédiate le lieu de l'orbite du nœud ascendant de Mercure, ainsi que la position de la planète en longitude et latitude héliocentriques. La simple observation de Gassendi, bien qu'entachée d'erreurs, notamment sur la datation des différents instants, apprit finalement que les Tables de Ptolémée étaient en erreur de $4^{\circ}25'$; les Tables prussiennes de Reinhold de 5° ; celles de Longomontanus de $7^{\circ}13'$; celles de Lansberg de $1^{\circ}21'$; enfin, les Tables rudolphines de Kepler de $14'24''$. Le mérite de Gassendi, d'observer le phénomène selon l'annonce de Kepler, était d'autant plus grand que l'œuvre de Kepler semblait avoir été à peu près complètement négligée en France ; ce n'est qu'en 1645 qu'Ismaël Boulliaud en parle dans son *Astronomia Philolaica*, en ne gardant cependant que la route elliptique, mais en omettant les autres lois de Kepler, notamment la loi des aires décrites autour du foyer et proportionnelles aux temps.

L'immense difficulté que Mercure a présentée aux anciens astronomes venait surtout de ce que la planète, plongée durant le jour dans les rayons du Soleil, ne pouvait être vue que le soir ou le matin dans les vapeurs de l'horizon ; de sorte qu'avant l'invention et le perfectionnement des lunettes, il était impossible de l'observer hors de ses élongations est et ouest. Dans l'*Almageste* de Ptolémée, on ne trouve ainsi que 16 observations de Mercure. C'est aussi la raison pour laquelle Kepler avait appelé les astronomes à observer minutieusement le passage et à s'y prendre suffisamment à l'avance tant il savait que la connaissance de son orbite était extrêmement douteuse. Outre la posi-

tion des nœuds (les deux lieux où l'orbite de Mercure croise le plan de l'écliptique, plan commun à la Terre et au Soleil) de l'orbite mercurienne, l'excentricité de son orbite demeurerait également mystérieuse. Elle ne pouvait vraiment être accessible que par l'observation de passages à chaque nœud de l'orbite. Tycho avait eu cette formule résumant très bien la place à part prise par la planète : « le Mercure du ciel n'exerce pas moins les astronomes, que celui de la Terre ne fatigue les chimistes » – en référence à la recherche de la pierre philosophale.

Des passages en série

DÈS LORS, la prédiction et l'observation des passages de Mercure devant le Soleil allaient devenir une priorité. Le calcul des récurrences ou de la succession des passages se fait de nos jours de façon très sûre à partir des deux conditions nécessaires à la survenue d'un passage : proximité de l'un des nœuds de l'orbite de Mercure avec le centre du Soleil à l'instant de la conjonction inférieure. Le retour de Mercure à l'un de ses nœuds est déterminé par sa période draconitique, soit 87,969 131 jours, tandis que le retour de la Terre par rapport au même nœud est de 365,254 224 jours. La période de retour d'un passage par un même nœud doit être un multiple commun à chacune de ces deux périodes. C'est bien évidemment impossible de façon exacte, mais, de façon approchée, il est possible d'obtenir les intervalles de temps contenant à peu près un nombre entier de chacune de ces deux périodes par une décomposition en fractions entières de leur rapport $365,254\,224/87,969\,131 = 4,152\,072\,662\,852\,6088$. On trouve alors les approximations entières suivantes, de plus en plus exactes :

- $29/7 = 4,142\,857\,142\,857\,143$
- $54/13 = 4,153\,846\,153\,846\,154$

- $137/33 = 4,151\ 515\ 151\ 515\ 151$
- $191/46 = 4,152\ 173\ 913\ 043\ 478$
- $710/171 = 4,152\ 046\ 783\ 625\ 731$
- $901/217 = 4,152\ 073\ 732\ 718\ 894$

En d'autres termes, le retour des passages se fait avec des récurrences de 7, 13, 33, 46, 171 et 217 ans. Les passages par le nœud descendant ne peuvent survenir que dans la première quinzaine de mai, tandis que ceux par le nœud ascendant se produisent dans la première quinzaine de novembre. La récurrence de 7 ans n'existe pas pour les passages de mai, car Mercure se trouve alors au voisinage de son aphélie, à sa distance la plus éloignée du Soleil, de sorte que sa latitude géocentrique est nécessairement plus grande, même à égale distance du nœud, comparativement aux passages de novembre. On dénombre ainsi 13 à 14 passages de Mercure devant le Soleil par siècle, dont 9 environ en novembre et 4 ou 5 en mai.

Le message des passages de Mercure

LA PLUPART DES PASSAGES OBSERVÉS l'étaient en novembre, près du nœud descendant, et il fallut attendre le milieu du XVIII^e siècle pour observer des passages proches du nœud descendant – passages de mai – et enfin s'approcher peu à peu de la vraie excentricité de l'orbite de Mercure. Ce n'est qu'au XIX^e siècle que l'orbite de Mercure fut pleinement maîtrisée grâce à Urbain Le Verrier (1811-1877) qui publia sa théorie de Mercure en 1859, en ayant utilisé finalement 9 passages de novembre (1697, 1723, 1736, 1743, 1769, 1782, 1789, 1802, 1848) et 5 passages de mai (1753, 1786, 1799, 1832 et 1845), soit 14 observations de passages entre 1697 et 1848. Le passage historique de 1631, dont Gassendi était si fier, fut très vite rejeté par Le Verrier en raison du peu de fia-

bilité astrométrique qu'il pouvait lui attribuer. Par les données de ses passages, il put non seulement déterminer avec précision l'excentricité de l'orbite de Mercure – 0,205 –, la plus importante du Système solaire, mais aussi mettre en évidence l'une des anomalies les plus importantes de l'histoire des sciences, l'avance anormale du périhélie de Mercure. Le Verrier souligna que « la nécessité d'un accroissement considérable du mouvement séculaire du périhélie résulte exclusivement des observations des passages de la planète sur le disque du Soleil. »

Voici ainsi comment une petite planète qui ne paie pas de mine, noyée la plupart du temps dans les rayons solaires, ne se montrant à la vue qu'en de rares occasions, filant à toute vitesse à travers l'espace, côtoyant le dieu solaire, finit par faire trembler les fondations les plus solidement établies par l'homme, notamment celles résultant de la découverte de la loi de la gravitation par Newton (1643-1727) en 1687. Heureusement, en vient-elle à passer de temps à autre devant le Soleil, se montrant alors sous un jour et dans des lieux peu connus. Et, dans ces moments, rares et donc précieux, elle va lever le coin du voile sur son orbite inattendue. Cependant, on aurait pu en rester là si tout avait tourné rond, mais par chance, Mercure est la planète qui tourne le moins rond du Système solaire. Son comportement est fortement excentrique, à plus d'un titre. Grâce à cette excentricité qu'elle balade fort judicieusement, elle finit par révéler que son périhélie, ce point où elle s'aventure au plus près du Soleil, où elle file encore plus vite, va lui aussi beaucoup plus vite qu'il ne le devrait. Finalement, vers la fin du XIX^e siècle, Simon Newcomb (1835-1909) avait raison de soupçonner une indélicatesse dans la loi de la gravitation de Newton, mais il était encore loin de se douter de la révolution conceptuelle qui s'annonçait au siècle suivant, tout entière enfouie derrière cette avance du périhélie de Mercure, le dernier message, mais le plus important de tous que la planète nous a légué et que seul Albert Einstein sera en mesure d'interpréter au début du XX^e siècle.

Passent les passages...

L'OBSERVATION DE GASSENDI va frapper les esprits, et notamment celui d'un très jeune astronome anglais, Jeremiah Horrocks, dont nous avons déjà eu l'occasion de parler dans un précédent article (voir la [Lettre d'information de mai 2023](#)). Horrocks n'a pas observé le passage de Mercure – il n'avait alors qu'une dizaine d'années –, mais la mesure de Gassendi va le bouleverser. En 1637, un autre astronome de la même région du nord de l'Angleterre, que l'on qualifierait aujourd'hui d'amateur – sans aucune connotation péjorative –, William Crabtree, de 9 ans son aîné, l'avait converti à l'astronomie elliptique de Kepler.

En travaillant sur les Tables rudolphines, Horrocks tente d'améliorer les paramètres utilisés par Kepler. En 1638, il est le premier à montrer la validité du concept de l'ellipse képlérienne pour un autre corps céleste que la planète Mars, la Lune – Kepler avait démontré l'ellipticité de l'orbite de Mars et en avait étendu le principe aux autres corps célestes. Il alla même plus loin en mettant en évidence le mouvement de la ligne des apsides lunaires (ligne joignant le périhélie et l'apogée), appelée de nos jours la *précession des apsides*.

Les corrections de parallaxe et de réfraction, qu'il est nécessaire d'appliquer aux observations de la hauteur du Soleil, ont un impact direct sur la théorie solaire – la théorie solaire est la théorie du mouvement du Soleil autour de la Terre, ou, ce qui revient au même, la théorie du mouvement de la Terre autour du Soleil. Ainsi, pour trouver la valeur de l'excentricité de l'orbite terrestre – l'écart de l'orbite au cercle parfait –, l'astronome doit déterminer les instants des solstices et des équinoxes par la mesure de la hauteur méridienne du Soleil. Des corrections inadéquates entraînent des instants erronés et, in

fine, une excentricité elle-même erronée. Bien évidemment, les imperfections de la théorie solaire ont à leur tour des conséquences sur les théories des autres planètes, puisque le mouvement des planètes est perçu à l'aune du mouvement de la Terre, lieu de leur observation. L'excentricité solaire est ainsi passée par une série de valeurs : 0,041 67 pour Ptolémée ; 0,0323 pour Copernic ; 0,035 84 pour Tycho Brahé ; et finalement 0,018 pour Kepler, qui ainsi divise par deux la valeur admise, opération appelée depuis « bissection de l'excentricité ». Il n'est pas notre propos ici de revenir sur la méthode suivie par Kepler. Cependant, le grand mérite d'Horrocks va être de s'apercevoir que Kepler, dans l'établissement de ses Tables rudolphines, a continué à faire usage de la valeur de Tycho. Horrocks va également calculer une nouvelle valeur de l'excentricité, 0,0173. Cette correction va apporter des améliorations considérables dans les paramètres de la théorie de Vénus, ce qui va lui permettre en 1639 de prédire, à peine trois semaines avant, le passage de Vénus devant le Soleil du 4 décembre, qu'il s'empresse de faire connaître à son ami Crabtree (prédiction faite dans le calendrier julien, pour le 24 novembre, l'Angleterre n'étant alors pas encore passé au calendrier grégorien institué en 1582) :

Si je vous écris maintenant, c'est pour vous informer de l'extraordinaire conjonction du Soleil et de Vénus qui se produira le 24 novembre. Vénus passera alors devant le Soleil. Ce qui, en effet, ne s'est jamais produit depuis de nombreuses années et ne se reproduira pas au cours de ce siècle. Je vous prie donc, de toutes mes forces, de l'observer avec diligence à l'aide d'un télescope et de faire toutes les observations possibles, surtout en ce qui concerne le diamètre de Vénus, qui est de 7' selon Kepler, de 11' selon Lansberge et d'à peine plus d'1' selon mes proportions.

Horrocks va l'observer chez lui, dans son humble village de Toxeth Park au sud de Liverpool, à l'aide

d'une lunette dont il est entré en possession au début de l'année 1638. Il sait que la méthode de la *camera obscura* ne peut s'appliquer (simple ouverture dans une chambre noire donnant une très petite image du Soleil). Crabtree et lui-même vont donc se servir de la méthode de la projection télescopique, celle utilisée par Gassendi. Par chance, le temps clair va leur permettre d'observer ce passage dans la fin d'après-midi du 4 décembre, durant seulement une petite heure, juste avant le coucher du Soleil. Dans son exhortation auprès de Crabtree, Horrocks espère surtout réussir à mesurer la taille angulaire apparente de Vénus. Il a déjà calculé ce qu'elle devrait être selon les tables utilisées et les théories en vigueur. C'est la donnée cruciale attendue du passage de Vénus qui tombe à point nommé pour lui, dans un moment auquel il reprend ou applique l'intégralité des concepts képlériens.

Vénus est venue, Horrocks l'a vue et l'a vaincue

LE JOUR VENU, le 4 décembre 1639, Horrocks de son côté, Crabtree du sien, vont être les seuls témoins sur Terre à assister, pour la première fois de l'histoire, à un passage de Vénus devant le Soleil. Aucune *admonitio* à la façon de Kepler n'a été lancée. Loin de l'académisme londonien, les deux jeunes astronomes de province n'ont pas encore toutes les clés, mais surtout le délai était trop court entre la découverte d'Horrocks du phénomène et sa survenue, trois petites semaines. En fin d'après-midi, le ciel est dégagé, le Soleil est déjà très bas – 4° de hauteur – quand Horrocks note l'instant du deuxième contact, 3 h 15 en temps local et la distance entre le centre du disque vénusien et le centre du Soleil, 14'25". Le temps pour la planète de se déplacer l'équivalent d'un diamètre et il renouvelle par deux fois son observation, 3 h 35 puis 3 h 45. À 3 h 50, le Soleil est couché (fig. 3).

Horrocks mesure le diamètre de Vénus, il donne une fraction $1,2/30$ du diamètre solaire. Tout comme Gassendi, il avait divisé le cercle de l'image du Soleil en 60 parties. Ce jour-là, le diamètre apparent du Soleil était de 31'30", ce qui conférait au disque de Vénus un diamètre de 1'16". Quant à Crabtree, son observation venait confirmer celle d'Horrocks, avec un rapport des diamètres apparents de Vénus et du Soleil de $7/200$. Vénus ainsi vue était 7 fois plus petite que Kepler ne le prédisait.

Tout comme pour Mercure, la taille de Vénus mesurée est cependant relative à celle du Soleil ; il est alors impossible d'accéder aux valeurs absolues des tailles. Celles-ci dépendent des dimensions du Système solaire que l'on se donne. En digne successeur de Kepler, Horrocks en a aussi hérité un peu de son « harmonie céleste », mais propose une autre règle de proportionnalité, celle entre les tailles et les distances héliocentriques. Le diamètre apparent des cinq planètes principales vues depuis le centre du Soleil serait de 28" – Mercure et Vénus, par un heureux hasard, ne sont en effet pas trop éloignées de ce principe. Par conséquent, la parallaxe solaire – rayon terrestre apparent vu depuis le centre du Soleil – doit être de 14" (voir fig. 4). Rémus, correspondant et ami de Kepler, avait déjà fait le même raisonnement en 1628, mais à partir de l'observation du diamètre apparent de Mars, lors d'une grande opposition ; Horrocks n'en a cependant pas eu connaissance. Et Horrocks, de conclure, victorieusement contre l'astronome belge Lansberge :

*Je pardonne, en attendant,
la misérable arrogance de l'astronome belge,
qui a surchargé ses tables inutiles
de tant d'éloges immérités...
estimant que c'est une récompense suffisante
que j'aie été ainsi amené à considérer
et à prévoir l'apparition de Vénus dans le Soleil.*

Et s'adressant fièrement à Gassendi :

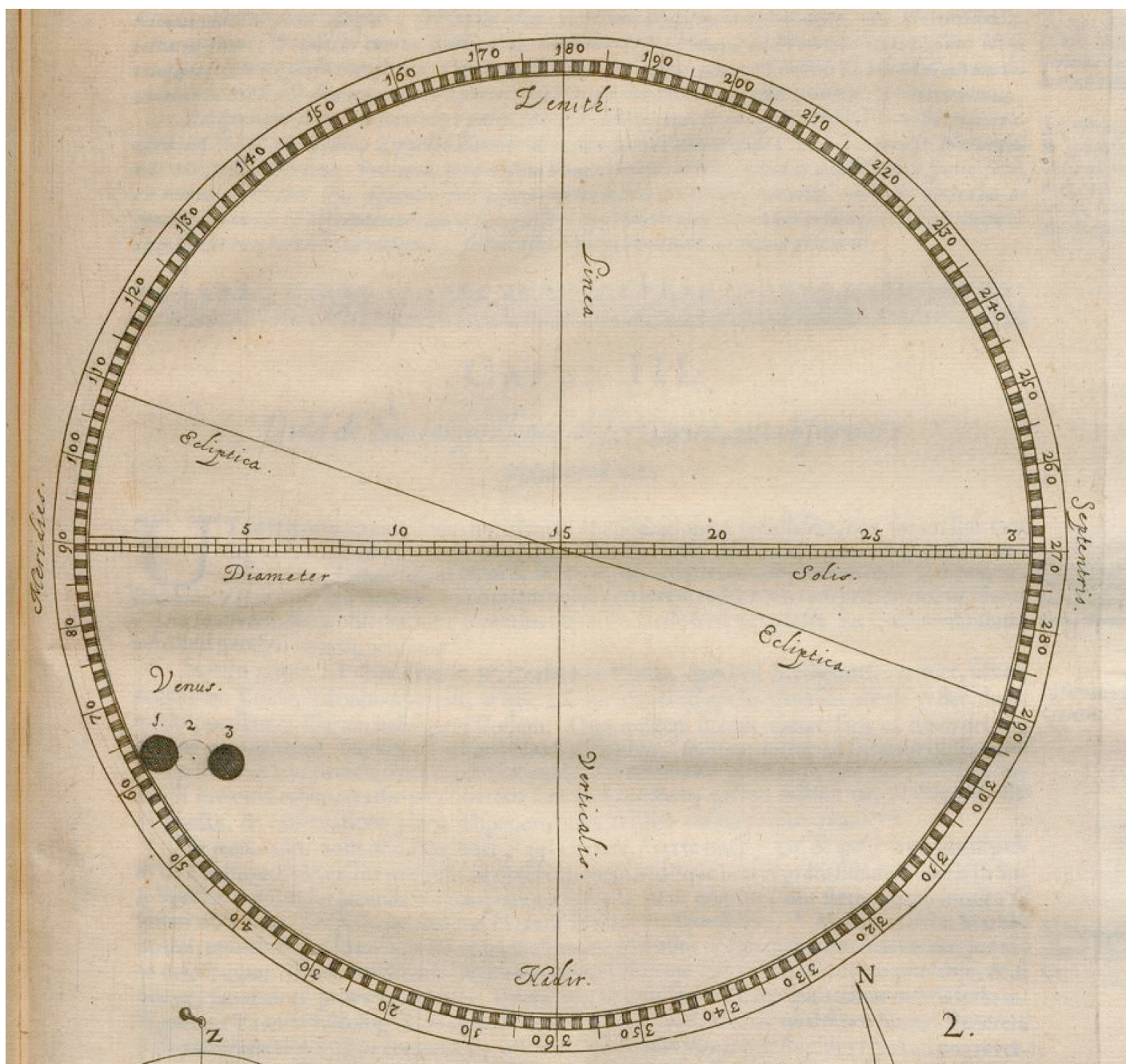


Fig. 3 – Observation du transit de Vénus par Jeremiah Horrocks.

Tiré de J. Horrocks, *Venus in Sole Visa*, 1662.

Domaine public

Félicitez-nous, Gassendi, d'avoir mis à l'abri de tout soupçon votre observation de Mercure, et que les astronomes cessent de s'étonner de la surprenante petitesse de la moindre des planètes, en constatant que celle qui paraissait la plus grande et la plus brillante la dépasse à peine. Mercure peut bien supporter sa perte puisque Vénus en subit une plus grande.

En 1640, Horrocks se met à l'écriture d'un tract décrivant l'observation : *Venus in Sole Visa*. Il avait prévu un rendez-vous avec Crabtree pour savoir comment le publier. Le jour prévu, le 3 janvier 1641, il mourut soudainement, à l'âge de 23 ans, sans que l'on en connaisse les causes. Son écrit, comme d'autres, ne sera publié que bien plus tard, par Hévélus en 1662. Puis en 1673, John Wallis publia d'autres écrits astronomiques dans son *Opera*

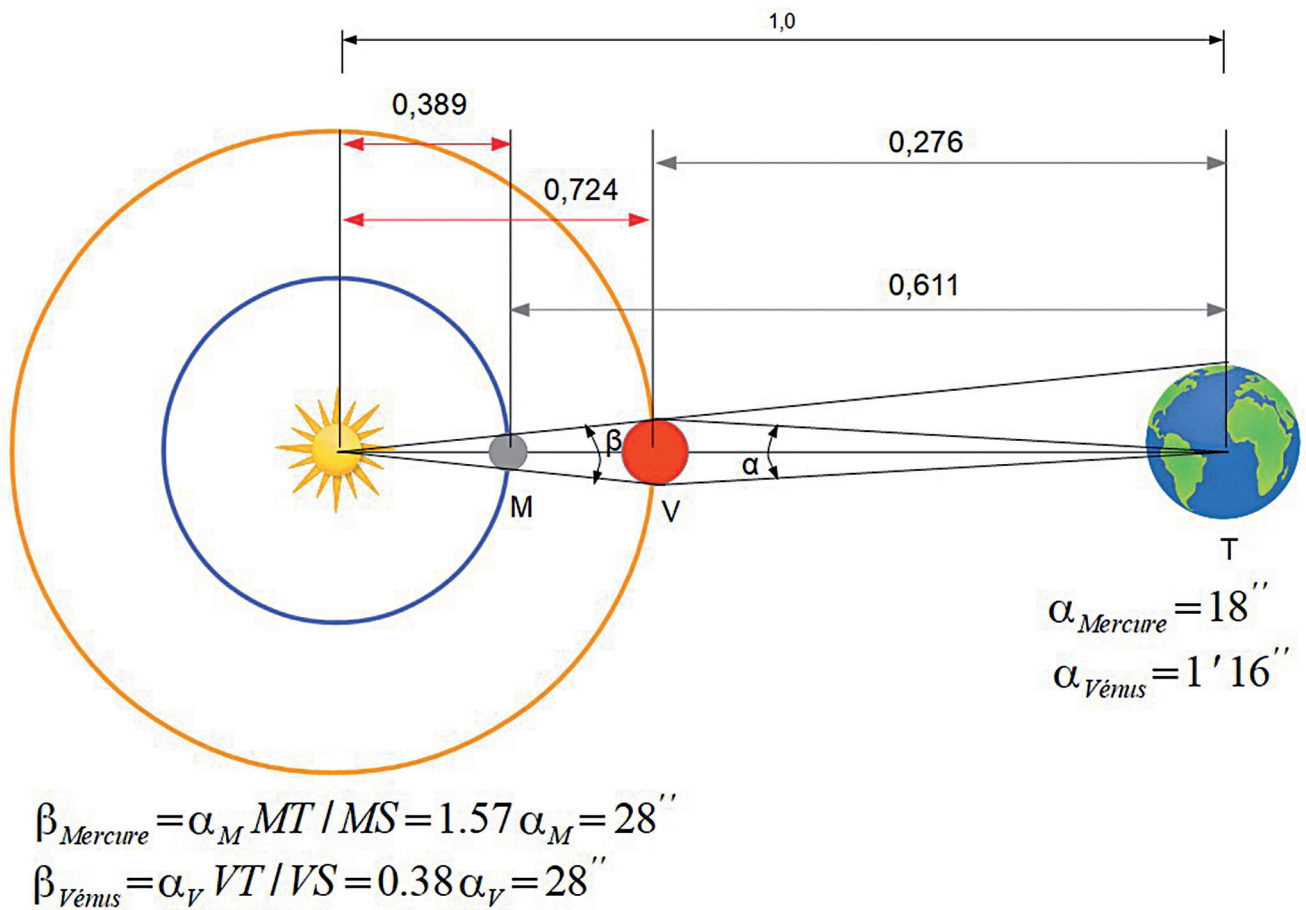


Fig. 4 – Représentation des distances relatives de Vénus et Mercure en conjonction inférieure lors des passages devant le Soleil.

La distance de référence prise égale à 1 est la distance Terre-Soleil.

Crédits P. Descamps

Posthuma. Le manuscrit d'Horrocks sur le passage de Vénus avait cependant commencé à circuler dix ans plus tôt, dans les années 1649-1650. Horrocks et Crabtree vont devenir des figures iconiques pour les astronomes britanniques, notamment John Herschel, à partir du XIX^e siècle. Horrocks sera commémoré à l'abbaye de Westminster en 1874. Ils sont peints dans l'imagination victorienne romantique, minces et émaciés, comme dans la peinture d'Eyre Crowe qui l'immortalisa en 1891 (fig. 5). Quant à Crabtree, Ford Madox Brown, dans les années 1870-1879, en fait un vieil homme de 70 ans avec une jeune femme et deux petits enfants, alors que Crabtree n'avait que 29 ans en 1639 (fig. 6). Mais en vérité, nous ne savons rien de leur apparence réelle.

En définitive, Horrocks découvre que Vénus est 7 fois plus petite qu'attendu, tout comme le Mer-

cure de Gassendi (fig. 7). La faute à ... la parallaxe du Soleil, cette parallaxe que Kepler avait faite égale à la minute de degré, soit environ 6 fois trop grande. L'explication était là, Gassendi ne la perçut pas, Horrocks la pressentit à peine, mais aucun d'eux n'eut l'idée de se servir des passages de ces planètes dans le Soleil pour la mesurer. C'est finalement à un mathématicien écossais, l'un des plus remarquables du XVII^e siècle, James Gregory (1638-1675), que revient l'idée, qu'il proposera en 1663, près de 30 ans plus tard, dans son *Optica Promota* (p. 130, scholie du problème 87) :

Ce problème peut avoir une très belle application, mais peut-être difficile, à partir des observations de Vénus ou de Mercure quand ils obscurcissent une toute petite partie du Soleil [lors d'un passage]. Cela peut conduire en effet à rechercher la parallaxe du Soleil.



Fig. 5 - Jeremiah Horrocks observant le passage de Vénus du 4 décembre 1639.

(The Founder of English Astronomy par Eyre Crowe, 1891).

CC BY-NC Walker Art Gallery



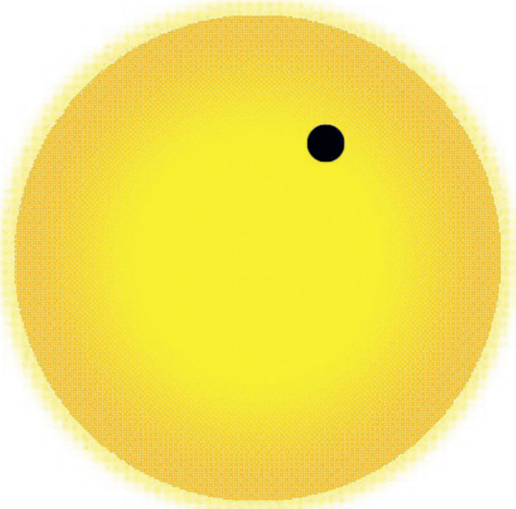
Fig. 6 - William Crabtree observant le passage de Vénus du 4 décembre 1639.

(Photogravure d'après une gravure ancienne, Ford Madox Brown, vers 1870-1879).

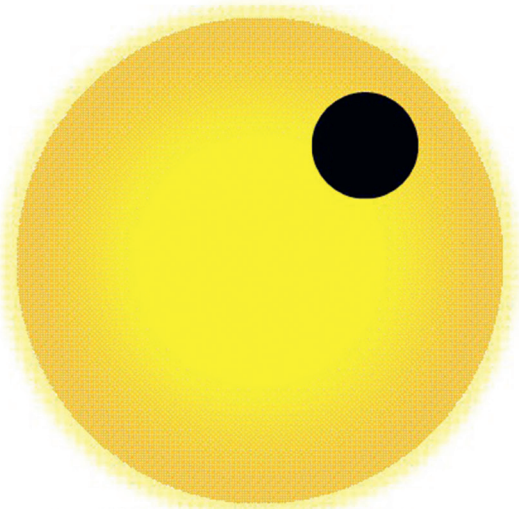
Domaine public

La façon la plus directe de mesurer la distance d'un objet inaccessible est par la parallaxe conclue par deux observateurs observant le même phénomène, un passage de Vénus ou de Mercure.

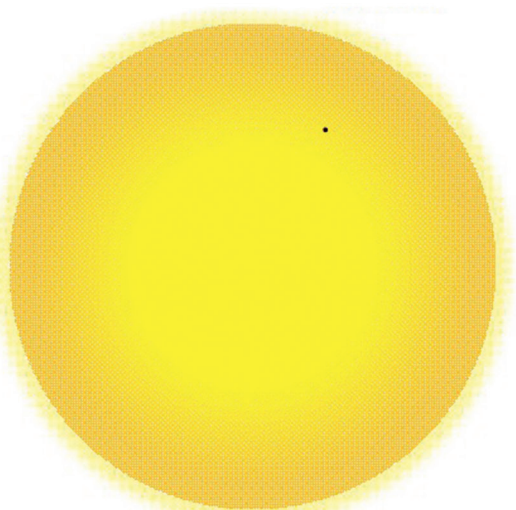
C'est d'ailleurs la raison principale pour laquelle nous avons deux yeux bien séparés, estimer la distance d'un prédateur a toujours été fort utile...



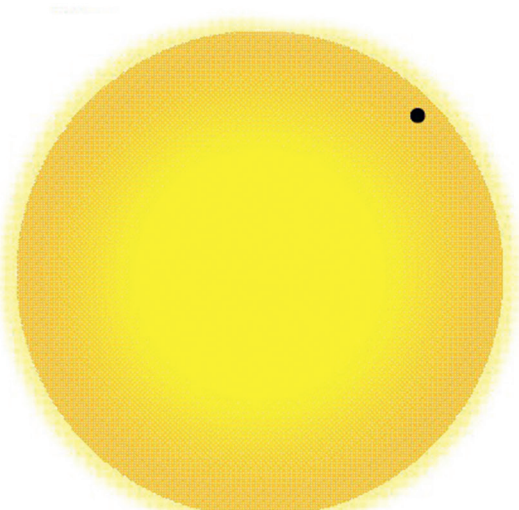
Taille attendue de Mercure
lors du passage de 1631



Taille attendue de Vénus
lors du passage de 1639



Taille observée de Mercure : 20"
- 96 fois plus petite que le Soleil
- 7,5 fois plus petite qu'attendu



Taille observée de Vénus : 1'16"
- 32 fois plus petite que le Soleil
- 7 fois plus petite qu'attendu

Fig. 7 – Tailles apparentes relatives de Mercure et Vénus par rapport au Soleil lors des passages de 1631 et 1639.

En haut, ce qui était attendu par les observateurs, à partir des calculs de Kepler. En bas, ce qui a été réellement observé.

Crédits P. Descamps

Vénus et l'arpentage du Système solaire

LA PROPOSITION DE GREGORY ne va trouver un écho au sein de la communauté astronomique qu'une dizaine d'années plus tard, en la personne du jeune Edmund Halley (1656-1742), sans que l'on sache assurément si Halley a été inspiré par Gregory, puisqu'il ne l'a jamais cité dans aucun de ses écrits. À vingt ans, Halley s'embarque pour l'île de Sainte-Hélène avec l'objectif de cartographier le ciel austral. Il compte également observer le passage de Mercure devant le Soleil attendu pour le 7 novembre 1677, au même âge qu'Horrocks lorsqu'il suivit l'avancée de Vénus dans le Soleil en 1639. Halley compte coupler son observation avec d'autres faites à des latitudes très différentes.

En utilisant celle faite en Avignon par Jean-Charles Gallet (1637-1716), il calcule une parallaxe de Mercure de $1'6''$ et une parallaxe solaire de $45''$. Peu importe l'énormité de sa parallaxe, ce qui compte pour Halley, c'est la viabilité de la méthode. Dans le rapport qu'il rédige à son retour en 1678, *Catalogus Stellarum Australium*, Halley indique que la mesure de la trajectoire de Mercure sur le Soleil peut être faite avec un micromètre. Tout ce que l'observateur doit faire est de trouver la plus petite distance apparente entre Mercure et le centre du Soleil. La comparaison des résultats issus d'observateurs séparés entre eux par une grande distance donne alors la mesure de la parallaxe de Mercure. Les choses auraient pu en rester là. Halley avait bien d'autres sujets d'intérêts, les comètes bien sûr, mais aussi convaincre son maître et ami Newton (1643-1727) de publier sa philosophie naturelle.

Ce n'est qu'en 1716 que Halley reprend la question de la parallaxe solaire. Il développe ses premières idées et met au point une méthode d'observation du

passage de Vénus de laquelle il sera possible de tirer la valeur de la parallaxe. Il publie dans les *Philosophical Transactions* (29,454-465) sa *Methodus singularis, quâ Solis Parallaxis sive distantia à Terra, ope Veneris intra Solem conspiciendae, tuto determinari poterit* (Méthode singulière pour déterminer sûrement la parallaxe du Soleil ou sa distance à la Terre par les observations de Vénus dans le Soleil). À propos de son observation de l'île de Sainte-Hélène, il écrit :

Il y a près de 40 ans, tandis que je me consacrais, sur l'île de Sainte-Hélène, à l'observation des astres qui entourent le pôle Sud, j'ai eu la chance d'observer avec la plus grande attention le passage de Mercure sur le Soleil : et, circonstance en laquelle j'ai bénéficié d'une chance inespérée, j'ai pu saisir en toute rigueur l'instant où Mercure, pénétrant sur le disque solaire, est apparu à l'intérieur de celui-ci, juste en contact avec le limbe ; de la même façon, j'ai pu saisir l'instant où, sortant [du disque solaire], il a touché intérieurement le limbe du Soleil.

Il ajoute :

À la vue de ce phénomène, j'ai compris tout de suite que l'on pourrait déduire avec rigueur la parallaxe du Soleil en partant d'observations de cet ordre, si seulement Mercure, plus proche de la Terre, avait une parallaxe bien plus grande que celle du Soleil ; en fait, cette différence entre les parallaxes est si faible qu'elle est toujours plus petite que celle du Soleil que nous cherchons à trouver ; c'est pourquoi Mercure, qui est pourtant visible souvent sur le Soleil, sera considéré comme peu adapté à notre entreprise.

Halley a donc compris que Mercure n'est pas le candidat idéal pour sa méthode en dépit de la fréquence plus grande de ses passages. Quant aux passages de Vénus, ils sont rares : 4 passages durant un

cycle de 243 ans, cycle composé de 4 segments de 105,5 ans, 8 ans, 121,5 ans et 8 ans. Halley expose le grand avantage à utiliser Vénus plutôt que Mercure :

Il reste donc le cas du passage de Vénus sur le disque du Soleil ; environ quatre fois plus grande que celle du Soleil, sa parallaxe produira des écarts tout à fait perceptibles entre les diverses durées du parcours de Vénus à travers le Soleil si on l'observe depuis différents endroits de notre Terre. Or, à partir de ces écarts observés de façon convenable, j'affirme qu'il est possible de déterminer la parallaxe du Soleil avec une précision d'une petite fraction de seconde de degré. Et nous n'avons pas besoin d'autres instruments qu'une lunette et une horloge ordinaires, mais de bonne qualité.

Il s'agit donc de chronométrer les durées du passage de Vénus devant le disque solaire depuis différents endroits sur Terre (fig. 8). Pour cela, il recommande de prendre précisément les instants des premiers et derniers contacts intérieurs qu'il estime plus faciles à observer et à dater avec une précision d'une seconde. Pas de doute, pour Halley, la seule méthode tangible est celle du chronométrage des passages de Vénus, dont il prédit le prochain pour le 6 juin 1761. La précision visée devait être inégalée, et inégalable par tout autre moyen : 0,01" de degré tout au plus. C'est quasiment un nouveau mythe prométhéen que Halley nous promet, celui où Vénus et Apollon seraient réunis pour quelques heures afin de donner aux hommes la connaissance des dimensions et des distances de leur système solaire.

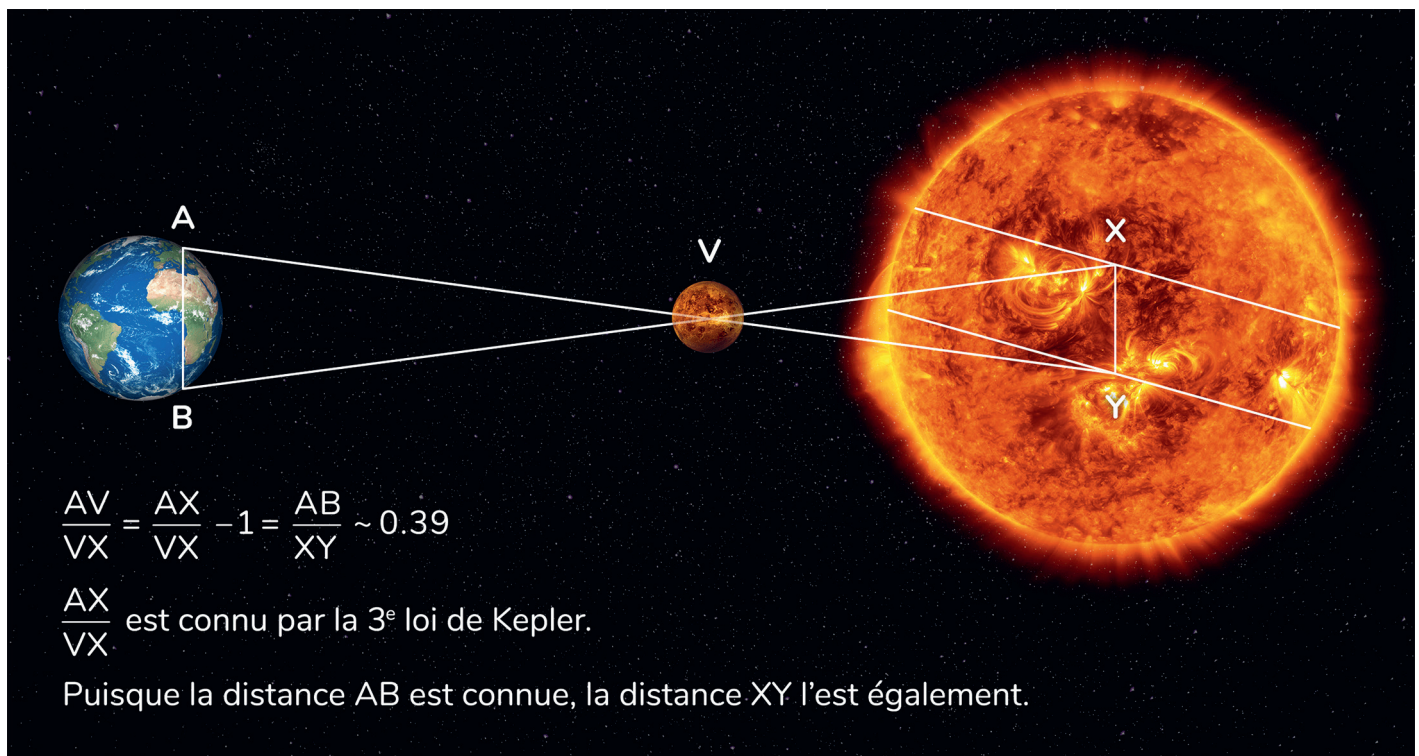


Fig. 8 – Principe général [très] simplifié du calcul de la parallaxe solaire à partir du passage de Vénus devant le Soleil.

Par le chronométrage du passage à partir de deux endroits éloignés sur Terre A et B, on en déduit la longueur des trajectoires apparentes sur le disque solaire. En utilisant la propriété des triangles VAB et VXY, ainsi que la 3^e loi de Kepler, le rapport AB/XY est connu au moment de la conjonction inférieure (de l'ordre de 0,39). Il suffit alors de connaître la longueur AB – la base – pour en déduire la longueur XY. Celle-ci mène alors au diamètre solaire qui, rapporté à son diamètre angulaire apparent, donne alors la distance Terre-Soleil et donc la parallaxe du Soleil.

Crédits Y. Gominet/P. Descamps/IMCCE (textures NASA)

Le passage de Vénus, objet de toutes les attentions des XVIII^e et XIX^e siècles

HALLEY DÉCÉDERA BIEN AVANT de voir passer Vénus dans le Soleil. Cependant, à l'occasion d'une visite en France en 1724, il avait pu en discuter avec l'astronome Joseph-Nicolas Delisle (1688-1768), qui s'était ensuite occupé des préparatifs pour les passages de 1761 et 1769.

Les deux passages du XVIII^e siècle furent surtout l'objet d'aventures et de voyages par-delà les océans et à travers les continents dans un contexte international agité (la guerre de 7 ans) et dans des conditions de vie précaires. Les astronomes n'étaient plus ces vieux savants sédentaires, reclus dans leurs observatoires, mais devenaient des explorateurs intrépides, mus par la seule soif de la connaissance, mais aussi par la soif de l'aventure avec un zeste d'inconscience sans lequel point de science. Un passage de Vénus se mérite, il ne peut être visible que depuis certaines zones sur Terre, précisément en raison de cet effet de parallaxe. Encore de nos jours, leurs aventures sont relatées, telles que les tribulations tragi-comiques de Guillaume Le Gentil de la Galaisière, les aventures du célèbre navigateur James Cook, celles de l'abbé Pingré à l'île Rodrigues, ou encore celles de l'abbé Chappe à travers la Sibérie glaciale...

Au XIX^e siècle, deux nouveaux passages, en 1874 et en 1882. Dès 1857, l'astronome George Biddell Airy (1801-1892) forme un plan pour observer le passage de 1874. Il considérait la détermination de la parallaxe comme « le problème le plus noble de l'astronomie. C'est une [mesure] des plus difficiles à effectuer, et c'est d'elle que dépendent les distances et les dimensions des planètes, des satellites et du Soleil lui-même, ainsi que les distances des

étoiles dont les parallaxes annuelles sont connues approximativement. » Les campagnes d'observation reprennent de plus belle : les Russes lanceront 36 expéditions, les Anglais 12, les Américains 8 et la France et l'Allemagne, 6 chacune, l'Italie 3 et la Hollande une. Un hommage à ces grandes expéditions orne de façon permanente le plafond de la salle du conseil de l'Observatoire de Paris (fig. 9).

Une goutte qui a fait couler beaucoup d'encre

MAIS TOUTES LES DATATIONS étaient sévèrement limitées par un effet découvert en 1761 par Bergman, appelé « la goutte noire » (fig. 10). Près des 2^e et 3^e contacts, le bord de Vénus apparaît distordu, ressemblant davantage à une goutte plutôt qu'à un disque. Cette goutte noire obscurcit sérieusement les espoirs fondés sur une datation précise de ces contacts, l'incertitude atteint la minute de temps, bien loin de la seconde espérée par Halley. De ce seul fait, la parallaxe solaire ne pouvait être mesurée à mieux que 0,1".

On crut avoir compris l'origine de la goutte noire après que le Russe Mikhail Lomonosov (1711-1765), toujours à l'occasion du passage de 1761, découvrit l'existence d'une atmosphère sur Vénus. Juste avant le second contact, un soudain et bref croissant de lumière encercla la partie de Vénus située loin du Soleil. Il interpréta correctement le phénomène comme étant de la lumière solaire réfractée par l'atmosphère dense de Vénus. Dès le passage suivant de 1769, James Cook évoqua de nouveau la brève surbrillance de Vénus pour aussitôt imputer la responsabilité de la goutte noire à l'atmosphère de Vénus. Lors des passages de 1874 et de 1882, une nouvelle technique avait fait son apparition dans les méthodes astronomiques d'ob-



Fig. 9 - Peinture de Dupain de 1884 après le passage de Vénus de 1882, figurant au plafond de la salle de la rotonde ouest du bâtiment Perrault de l'Observatoire de Paris.

Le Soleil est représenté par Apollon sur son char. Vénus, nue, la tête surmontée d'une étoile, est entraînée dans une belle envolée par deux oiseaux blancs, accompagnée d'un petit Cupidon avec arc et flèches. Au centre, assis sur un pilier, Uranie, la muse de l'astronomie, la tête couronnée de lauriers et d'étoiles. Sa main gauche s'appuie sur un globe terrestre. Un angelot observe Vénus avec une lunette équatoriale. Un autre tient une trompette, la trompette de la renommée, en prévision de l'instant annoncé. Son bras droit s'appuie sur une médaille d'or qui représente Halley. À droite figurent Delisle puis Le Verrier.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris

servation, la plaque photographique. Cependant, la goutte noire restait présente sur les photographies. La goutte noire restait la bête noire des as-

tronomes. Ils ne la comprenaient pas, ne savaient pas comment s'en débarrasser, elle finissait par ôter tout intérêt à observer les passages de Vénus.

Il fut également avancé dans les années 1970, parmi les causes possibles, l'atmosphère terrestre elle-même. L'effet ne fut compris que tout récemment, à l'occasion de deux passages observés de-

puis l'espace par le satellite TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) de la NASA dédié à l'observation du Soleil. Le premier est un passage de Mercure, celui du 15 novembre 1999.

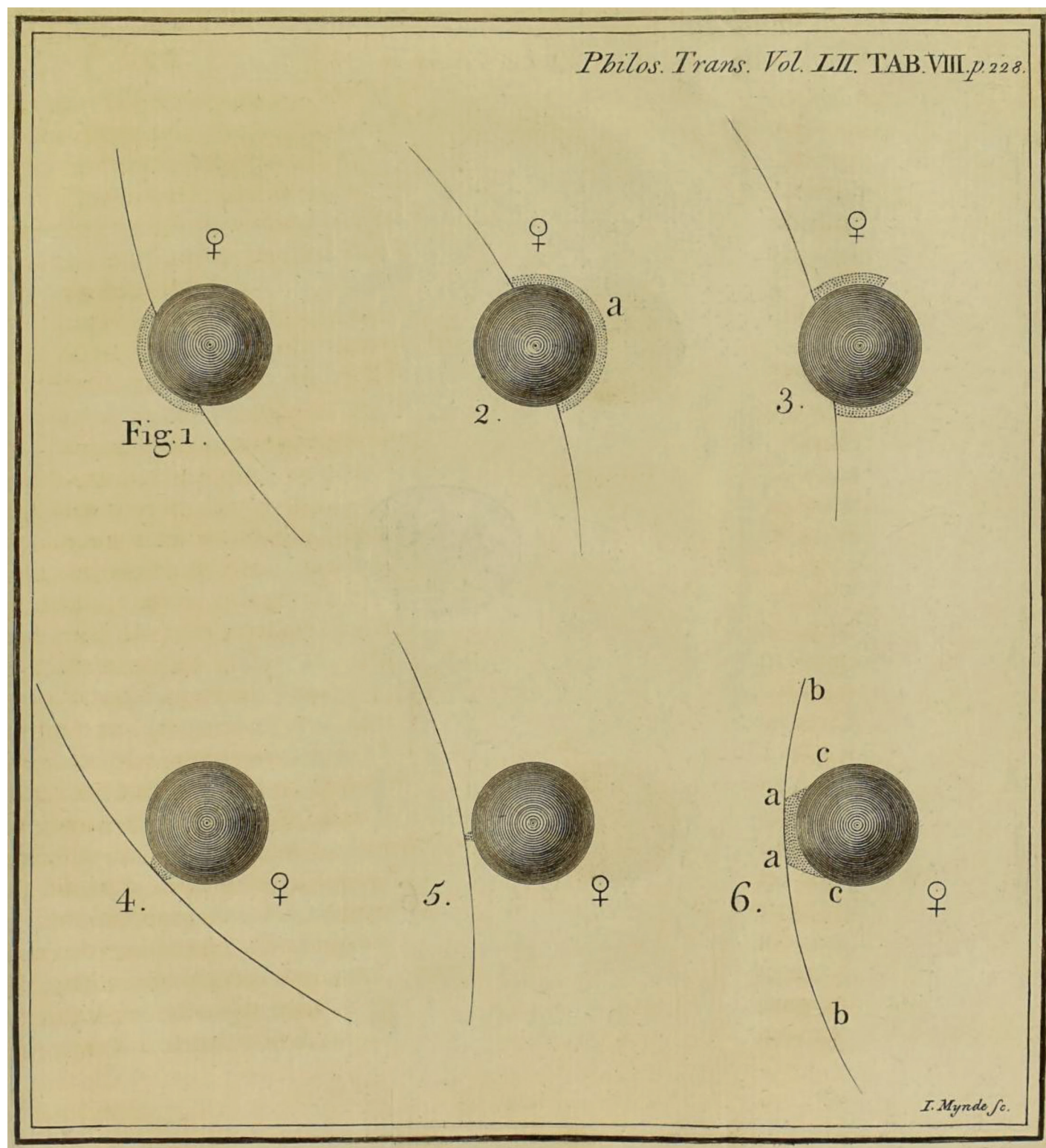


Fig. 10 - Le phénomène de la goutte noire décrit pour la première fois lors du passage de Vénus de 1761.

Torbern Bergman, *Philosophical Transactions*, 52, part 1, 1761, p. 227-228.

Domaine public

Bien que ne subissant pas le brouillage dû à l'atmosphère terrestre, la goutte noire subsistait alors que Mercure n'a aucune atmosphère. Le second est le passage de Vénus du 8 juin 2004. De nouveau, le satellite TRACE est mis à contribution. Cette fois-ci, il s'agit de tester une nouvelle hypothèse, la goutte noire serait provoquée principalement par l'assombrissement centre-bord du Soleil, très perceptible au niveau de son limbe. Cet assombrissement de limbe, combiné à la fonction d'étalement de point (FEP, ou PSF en anglais pour *Point Spread Function*) d'un télescope – tout télescope présente une telle caractéristique qui lui est propre, faisant que l'image d'un point n'est jamais un point, mais une tache plus ou moins étalée –, « fabriquerait » la goutte noire. Cette hypothèse se trouva confirmée, la goutte noire disparaissait pour laisser place à un profil parfaitement circulaire, après avoir retiré numériquement l'effet de l'assombrissement de limbe.

Que reste-t-il des passages de Vénus ?

QUELLE EST DONC L'IMPORTANCE des observations du passage de Vénus ? Pour répondre à cette question, il faut rappeler que l'étude des passages de Vénus n'était qu'une méthode parmi d'autres pour déterminer la parallaxe solaire.

Les expéditions de 1761 sont décevantes bien que nombreuses – 120 observations, dont 31 pour les Français, sur 62 sites différents. Il en a résulté des valeurs de la parallaxe solaire comprises entre 8,3" et 10,6". L'effet de surprise de la goutte noire y est pour beaucoup. En 1769, l'accord d'ensemble est meilleur, l'effet de goutte noire est maintenant at-

tendu et mieux anticipé ; cependant, les mesures s'étalent encore entre 8,50" et 8,88". En 1822, Johann Encke (1791-1865), de l'Observatoire de Berlin, reprend toutes les observations du passage de 1761 et arrive à une valeur de $8,531 \pm 0,062''$. En 1824, il récidive. Cette fois, il traite les observations de 1769 desquelles il tire une valeur de $8,603 \pm 0,046''$. De ces deux passages, il conclura une valeur de $8,578 \pm 0,046''$ qu'il rectifiera encore une fois en 1835 à $8,571 \pm 0,037''$. Cette valeur perdurera pendant près de trente ans.

À la fin du XIX^e siècle, après les passages de 1874 et de 1882, Simon Newcomb (1835-1909), astronome à l'US Naval Observatory de Washington, mettra un point final – du moins pendant une bonne partie du XX^e siècle puisque la valeur moderne de la parallaxe est de $8,794\,148''$ – à la valeur de la parallaxe solaire en faisant adopter son système de constantes international lors de la Conférence internationale des étoiles fondamentales de 1896, qui s'est tenue à Paris. La parallaxe du Soleil adoptée est alors de $8,80 \pm 0,01''$. Des résultats issus des neuf méthodes différentes de détermination de la parallaxe du Soleil, les passages de Vénus n'arrivent qu'en sixième position, avec une valeur de $8,794 \pm 0,018''$, bien loin derrière la méthode la plus précise, visant à déterminer la constante de l'aberration, et sur laquelle nous reviendrons ultérieurement, donnant une valeur de $8,793 \pm 0,0046''$.

Les passages de Vénus n'ont finalement eu que peu de poids dans la détermination de la valeur de la parallaxe du Soleil arrêtée à la fin du XIX^e siècle. En subsiste surtout, de nos jours, la mémoire d'une époque héroïque où les astronomes étaient tout à la fois scientifiques, aventuriers, naturalistes, allant là où Vénus leur disait d'aller pour se faire admirer aux côtés du Soleil.

Références

W. Applebaum and R.A. Hatch, « Boulliau, Mercator, and Horrocks's "Venus in Sole Visa": Three unpublished letters », *Journal for the History of Astronomy*, vol. 14, 1983.

A. Chapman, « Jeremiah Horrocks, William Crabtree, and the Lancashire observations of the transit of Venus of 1639 », *Proceedings of the International Astronomical Union*, IAUC196, 2004.

A. van Helden, « The importance of the transit of Mercury of 1631 », *Journal for the History of Astronomy*, vol. 7, 1976.

A. van Helden, *Measuring the Universe : Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley*, University of Chicago Press, 1985.