



# À la mesure du Ciel

**C**e 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

# L'ÎLE AUX ÉTOILES DE TYCHO

## La conjonction ratée de Jupiter et de Saturne

**UN DESTIN PEUT TENIR** à peu de choses, une rencontre, une opportunité... une éclipse de Soleil comme celle du 21 août 1560. Ce n'est pas tant l'éclipse elle-même qui fascine ce jeune adolescent de 14 ans, présent ce jour-là sur la pelouse de l'université de Copenhague, mais plutôt la capacité des hommes à avoir réussi à prédire avec précision sa survenue. Quand l'humanité commune y voit encore un acte de Dieu, l'adolescent est captivé par la maîtrise du divin. Adulte, il se remémorera ce moment comme une empreinte profonde, durablement gravée dans sa mémoire, car pour lui, le fait que « les hommes [puissent connaître] les mouvements des étoiles avec une telle précision qu'ils [sont] capables, longtemps à l'avance, de prédire leurs places et leurs positions relatives » relève manifestement du divin. L'éclipse a ainsi enfanté un après-midi d'été l'un de ceux qui allaient révolutionner la connaissance des cieux, Tycho Brahe (1546-1601).

Très vite, le jeune Tycho acquiert éphémérides, livres et instruments, puis se met à répertorier les phénomènes célestes qui pourraient être anticipés, jusqu'à celui de la grande conjonction entre Jupiter et Saturne, connue pour se reproduire tous les vingt ans. Circonstance heureuse, le phénomène s'annonce pour l'été 1563. Celle-ci l'intéresse tout particulièrement parce qu'il croit profondément aux vertus prédictives de l'astrologie. Les conjonctions sont

des phénomènes à fort potentiel astrologique pour établir des horoscopes ou annoncer le futur. Tycho n'a certes pas brillé en la matière et n'a heureusement pas persisté dans cette voie : un jour, il annonça la fin prochaine du sultan ottoman Soliman le Magnifique alors qu'il était mort deux mois auparavant sous sa tente en terre hongroise lors du siège de Szigetvar...

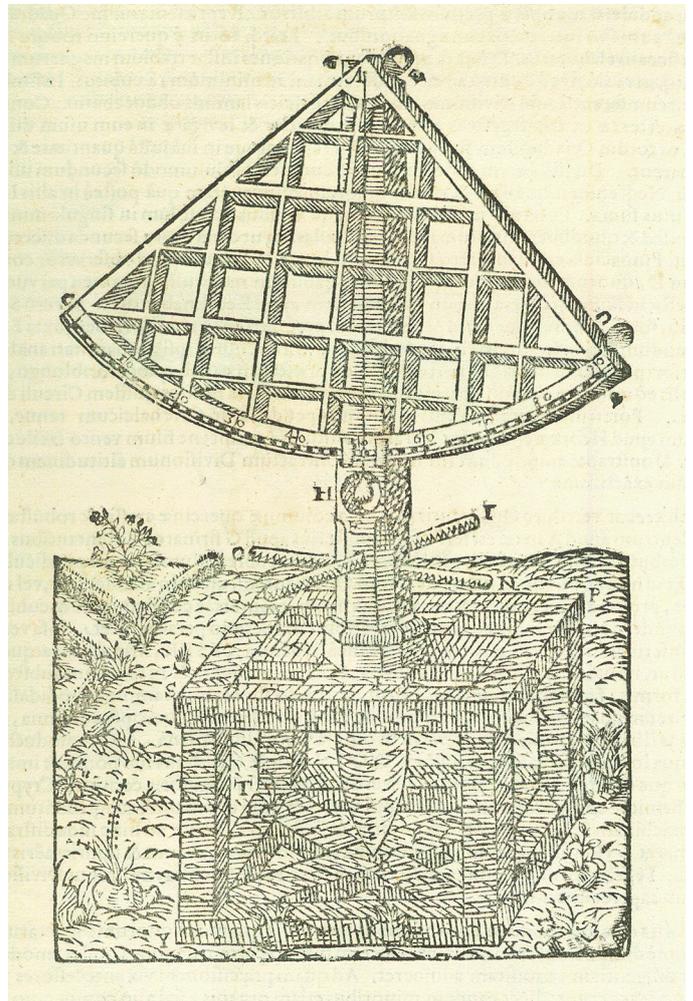
Pendant plusieurs semaines, nuit après nuit, du mois d'août 1563, le jeune Tycho, alors à l'université de Leipzig, consigne ses mesures. Il se sert d'un grand compas en forme de V, tenant le sommet près de son œil et visant les deux planètes, qu'il repose ensuite sur une feuille sur laquelle a été préalablement dessiné un cercle trigonométrique afin de lire la séparation angulaire formée par Jupiter et Saturne. Au soir du 24 août, les deux planètes sont si proches l'une de l'autre dans le ciel qu'elles se présentent presque sous l'apparence d'une unique tache. Quelle ne fut pas sa consternation de constater que la date de la conjonction – et donc de la séparation minimale – était très nettement en avance sur les prédictions qu'il a calculées à partir des deux modèles du monde du moment en compétition : le modèle de Ptolémée et celui de Copernic. Ptolémée concevait le monde, l'Univers, selon un schéma géocentrique. Les meilleures tables astronomiques construites à partir de ce modèle sont les vieilles *Tables alphonsines* datant du XIII<sup>e</sup> siècle. Quant au modèle alternatif, celui du chanoine Nicolas Copernic (1473-1543), le point de vue héliocentrique est adopté et publié dans son *De Revolutionibus* publié en 1543, dont les *Tables pruténiques* furent établies en 1551 par Erasmus Reinhold (1511-1553). Si

l'erreur sur la prédiction de la conjonction à partir des *Tables alphonsines* se montait à plus d'un mois, celle issue des *Tables pruténiques*, bien que réduite, se montait encore à quelques jours. Aucune des deux tables n'était donc en mesure d'annoncer avec précision la conjonction. Comment établir un horoscope si les astronomes sont incapables de prévoir avec précision ce type de rapprochement céleste ?

Cette inadéquation le heurte profondément. Dès lors, sa vocation se précise, son programme de recherche se décide : construire des instruments plus précis, cartographier plus précisément le ciel de façon à obtenir de meilleures observations des positions des planètes et inventorier systématiquement les divergences entre les observations et les prédictions des deux modèles du moment, ceux de Ptolémée et de Copernic, afin de découvrir le vrai système du monde. En définitive, tout comme Hipparque, c'est une étoile nouvelle apparue dans le ciel de novembre 1572 qui va définitivement et exclusivement ancrer Tycho dans les affaires de l'astronomie et le décider à se doter de tous les moyens nécessaires pour parfaire la connaissance des ciels, laquelle passe par la connaissance précise des positions des corps célestes (étoile et planètes). Voici la description qu'il en donne :

*Lorsque j'habitais Augsbourg, j'observais très souvent les étoiles, non seulement avec le très grand quadrant que j'avais fabriqué dans le jardin du maire à l'extérieur de la ville, mais aussi avec un autre instrument, un sextant en bois que j'ai inventé là-bas et je notais mes observations dans un livre spécial. Je l'ai aussi fait plus tard, après être retourné dans ma patrie, en utilisant un autre instrument similaire, bien qu'un peu plus grand, surtout lorsque l'étrange nouvelle étoile, qui éclata en 1572, me fit abandonner mes recherches chimiques qui m'occupaient beaucoup après les avoir commencées à Augsbourg et que j'ai poursuivies jusqu'à ce moment-là, pour me tourner vers l'étude des phénomènes célestes.*

Le rêve de Tycho est d'atteindre une précision d'une minute de degré dans la mesure de la position des astres sur la sphère céleste. Il conçoit que pour réaliser son ambition, il lui faut voir grand, très grand. Il dessine son premier grand quadrant en 1570 qu'il fait construire. L'arc mesure  $90^\circ$  et le rayon atteint 5,5 mètres, si bien que cinq hommes sont nécessaires à sa mise en place (fig. 1). Tout comme ses instruments, sa notoriété grandit et ses ambitions également. Il lui faut dès lors un lieu entièrement dédié pour abriter les instruments qu'il imagine pour ses mesures. Il lui faut un château et une île pour sa démesure. Tycho se rêve comme le nouveau prince des étoiles qui va assurer le renouveau de l'astronomie.



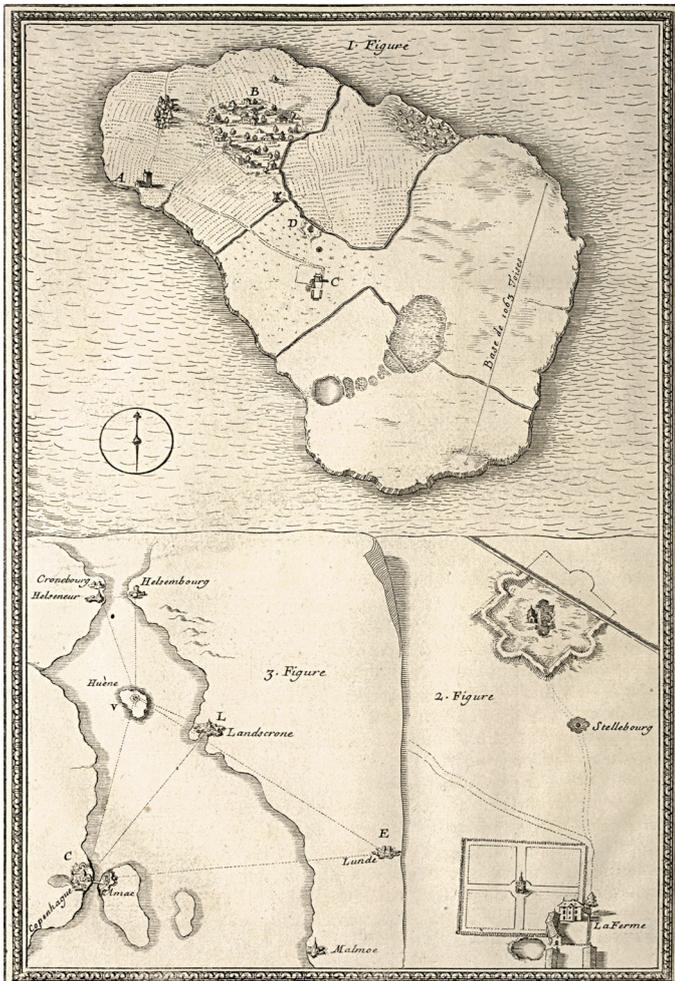
**Fig. 1 - Le premier grand cadran en bois de Tycho Brahe de 1570.**

Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

## Une île pour univers

**Q**UELQUES ANNÉES PLUS TARD, le 23 mai 1576, le roi Frédéric II du Danemark signe un document conférant « à notre bien-aimé Tycho Brahe [...] notre terre de Hven, avec tous les locataires et serviteurs de la couronne et les nôtres qui y vivent, et avec tous les loyers et droits qui en découlent [...] d'avoir, de jouir, d'utiliser et de détenir ; libre et clair, sans aucun loyer, tous les jours de sa vie ». Tycho, en seigneur de l'île de Hven (fig. 2), y implante un vaste et gracieux château-observatoire qui règne sur les cieux : *Uraniborg*, le palais d'Uranie, la muse de l'astronomie (fig. 3).



**Fig. 2 - Illustration de l'île de Hven et des deux observatoires de Tycho Brahe, Uraniborg et Stjerneborg, à l'occasion du voyage de l'abbé Jean Picard en 1671.**

Tiré de *Voyage d'Uranibourg, ou Observations astronomiques faites au Dannemarck par monsieur Picard de l'Académie royale des Sciences*, 1680.

Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris



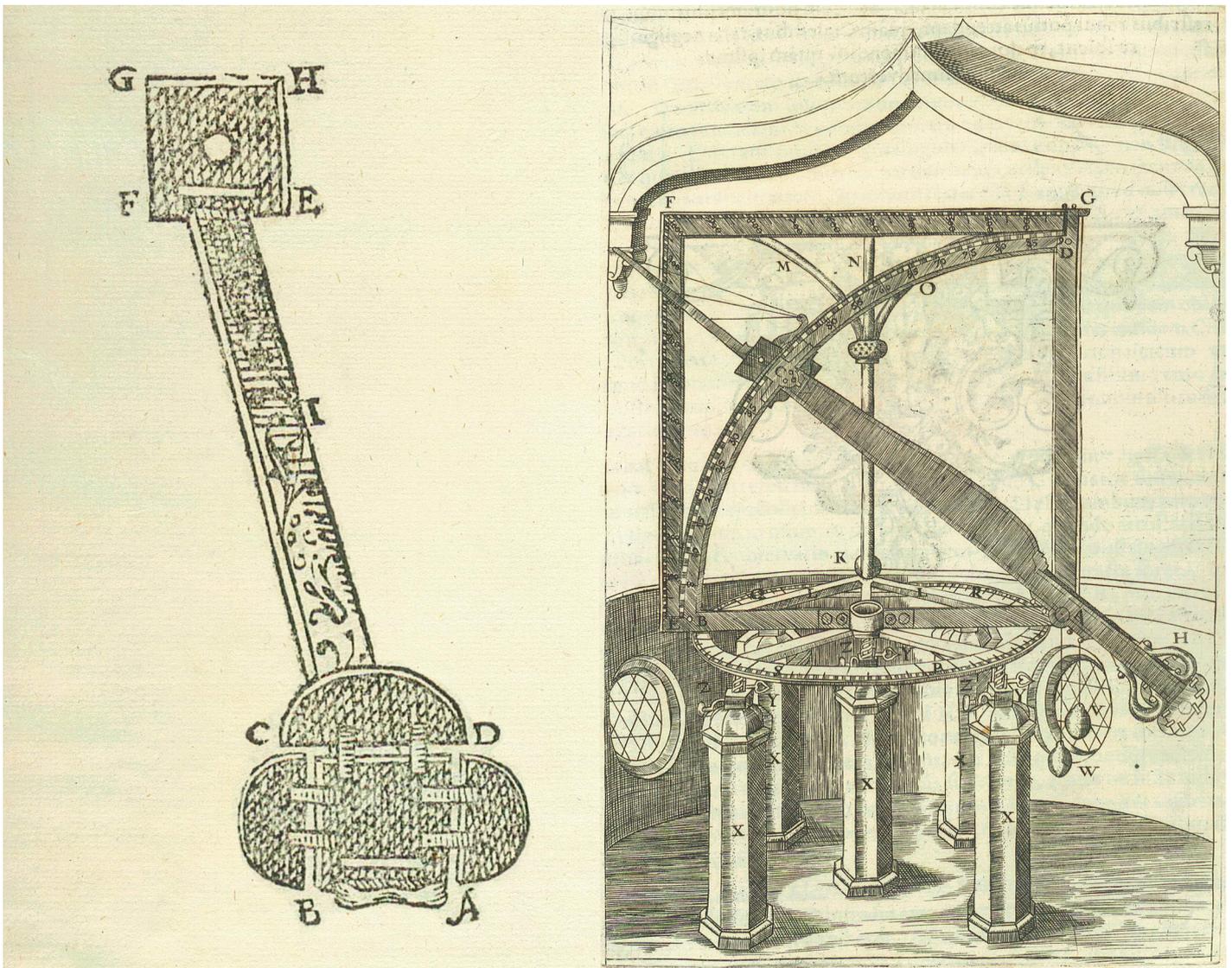
**Fig. 3 - Uraniborg.**

Peinture à l'huile de 1882 d'Heinrich Hansen (National Historical Museum au château Frederiksborg Castel).

Domaine public

Tycho comprend très vite qu'élever de grands instruments ne peut suffire à la réalisation de son ambition : atteindre une précision de l'ordre de la soixantième partie du degré. Il lui faut aussi traquer toutes les sources d'erreur, ce qui exige de nouvelles méthodes et dispositifs de mesure. L'erreur devient l'égal de la mesure, il lui faut la circonscrire, la dominer à défaut de l'éradiquer.

De son temps, le pointage d'une étoile se fait encore à l'aide de visées par pinnules (petits orifices circulaires). Si l'étoile n'est pas précisément maintenue au centre de la pinnule, l'erreur peut se monter à une fraction de degré. La première tentative de remédiation de Tycho est la mise au point d'un système de pointage à fente ajustable, composé de deux montants placés l'un à l'avant et l'autre à l'arrière de l'alidade. Lorsque l'observateur aligne le viseur sur une étoile, la largeur de la fente est progressivement diminuée ; l'alignement parfait se produit lorsque l'étoile disparaît complètement.



**Fig. 4 - Système de pointage parallèle (1577) et quadrant Q.max (1582).**

Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

Ce système induit cependant une erreur de parallaxe qu'il fera disparaître dans ses instruments suivants (fig. 4) par la technique du pointage parallèle (image vue simultanément le long des directions  $BC \Rightarrow FG$  et  $AD \Rightarrow HE$ ).

Autre perfectionnement, la division des arcs de cercle servant aux mesures angulaires. Avant lui, un quadrant était divisé en 270 intervalles égaux de 20' pour une estimation de la position mesurée à 10' près. Tycho veut lire la minute d'angle, il utilise à cette fin une proposition de Levi Ben Gerson (1288-1344), en se servant de transversales pour

allonger artificiellement l'intervalle qui nécessite d'être gradué. Si Tycho n'est pas l'inventeur de la division par transversales, il est le premier à l'appliquer à de grands instruments. La méthode a été appliquée progressivement à tous les instruments.

Pour le grand quadrant mural (fig. 5), sur un arc de cercle en cuivre d'un rayon de 2 m et large de 12,7 cm, gradué de 10' en 10', sont dessinées des transversales sous la forme de points marquant la minute d'angle. Chaque transversale affiche donc 10 intervalles d'une minute chacun. Ainsi, au lieu de lire la mesure sur le cercle gradué (une gradua-



**Fig. 5 - Grand quadrant mural de 1582 destiné en particulier à la mesure des hauteurs méridiennes des étoiles fondamentales.**

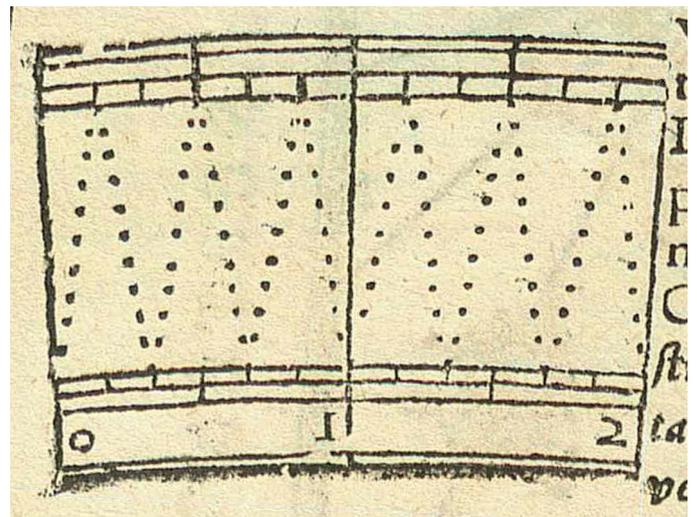
Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

tion de 10' équivaut à une longueur de 5,8 mm), elle est lue sur la diagonale graduée (longue de 12,7 cm, une graduation d'1' équivaut alors à une longueur de 127 mm). Si l'on admet une précision de lecture de 0,5 mm ( $\approx 1'$  sur le cercle gradué, soit  $\approx 3''$  sur la transversale), le gain en précision se monte à un facteur 211, ce qui est équivalent à la précision fournie par un quadrant de 422 m de rayon ! (fig. 6).

Ce niveau de précision théoriquement permis ne sera jamais atteint, car bien d'autres sources d'erreur entrent en ligne de compte (erreur de lecture plu-

tôt de l'ordre du millimètre, positionnement dans le plan du méridien, vibrations du mur, qualité de la division du cercle, réfraction astronomique, erreur de collimation dans la visée...). Tycho ne traite de la précision de ses instruments qu'en termes de précision de lecture, en ignorant les autres sources d'erreur. Néanmoins, si avant Tycho les astronomes ont cherché à améliorer leurs mesures principalement par le recours à des instruments géants, Tycho a compris que le secret de la précision réside dans la combinaison de mesures faites sur des instruments de différentes natures pendant de longues périodes de temps, de telle sorte que les erreurs aléatoires, humaines et instrumentales finissent par se moyennner avec le temps. De plus, autre innovation de Tycho, ses instruments possèdent des dispositifs indépendants de double mesure permettant la vérification de chacune d'elles. La position de ses étoiles fondamentales peut ainsi être mesurée avec une précision comprise entre 30" et 40".



**Fig. 6 - Transversales du limbe du quadrant de Tycho de 2 m de rayon.**

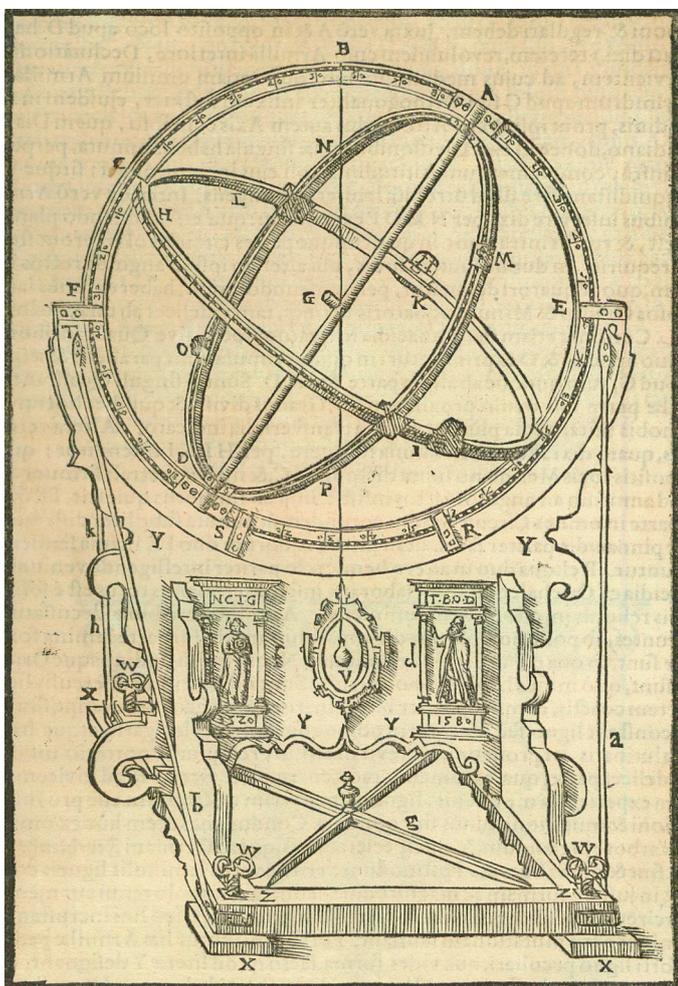
L'arc gradué couvre un angle de 2 degrés. Des transversales rejoignent les graduations successives des deux arcs gradués de sorte que chaque intervalle entre deux points d'une diagonale équivaut à 1'. Il y a dix intervalles, donc 10 minutes de degré ; Tycho a montré qu'une telle disposition permet de faire une lecture avec une précision inférieure à 3" (De Mundi, 1588).

Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

## Tycho, communicant avant l'heure

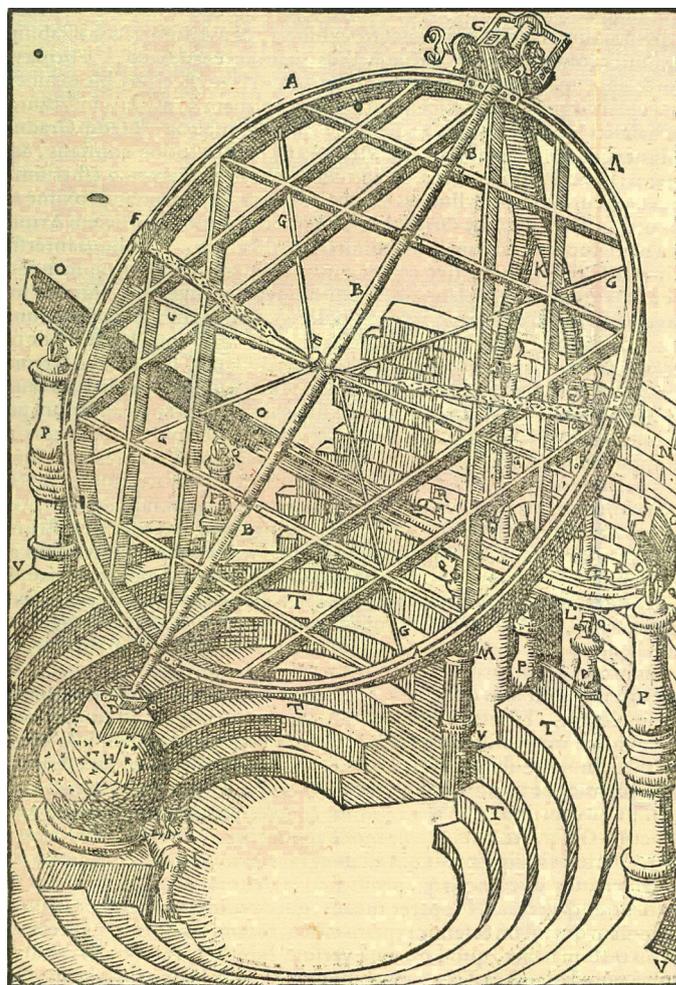
**T**YCHO BRAHE comprend le premier tout le bénéfice qu'il peut retirer en publiant ses innovations technologiques, en les rendant visibles par le dessin, et en publiant ses données. Il y va tout à la fois de sa renommée propre, mais aussi de son désir de satisfaire son mécène et de convaincre ses pairs de la qualité de son travail. À cette fin, il dote son palais d'Uranie de sa propre imprimerie en 1584, allant même jusqu'à fabriquer son propre papier quand il vient à manquer !



**Fig. 7a - Armille équatoriale pour la déclinaison et l'ascension droite.**

Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public



**Fig. 7b - Grande armille équatoriale.**

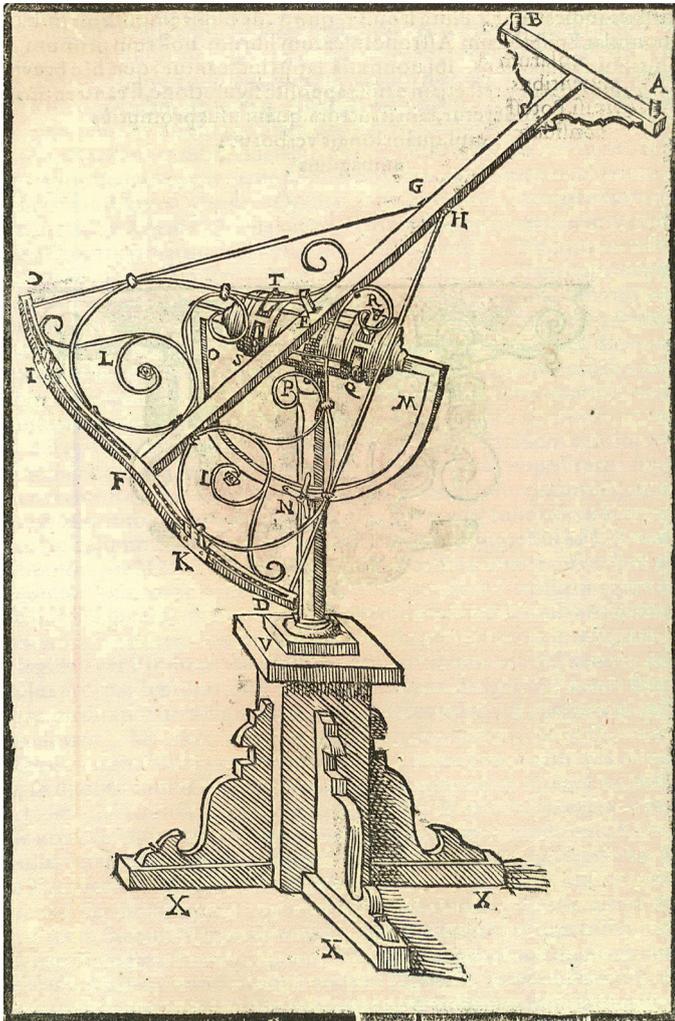
Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

Il est pertinent de souligner le soin apporté par Tycho au dessin de ses instruments plus que quiconque auparavant. Le dessin ne vise plus à illustrer ou à orner un propos, mais devient l'objet même du propos. Ses dessins sont ceux d'instruments réels à forte intention scientifique. Ce faisant, Tycho s'adresse à ses contemporains en mettant en lumière une technologie de haut niveau, vouée à un seul objectif, la mesure et seulement la mesure, fer de lance de la nouvelle astronomie qu'il veut impulser. La finesse des détails et l'aspect imposant des instruments qu'il érige sont autant d'éléments visuels de communication en appui du niveau de précision atteint. L'ère de Tycho est pré-télescopique, la précision accessible d'observations faites à l'œil nu est telle que de nouveaux horizons s'offrent à l'as-

tronomie qui est alors en pleine révolution, même si Tycho et ses contemporains n'en ont pas encore vraiment conscience.

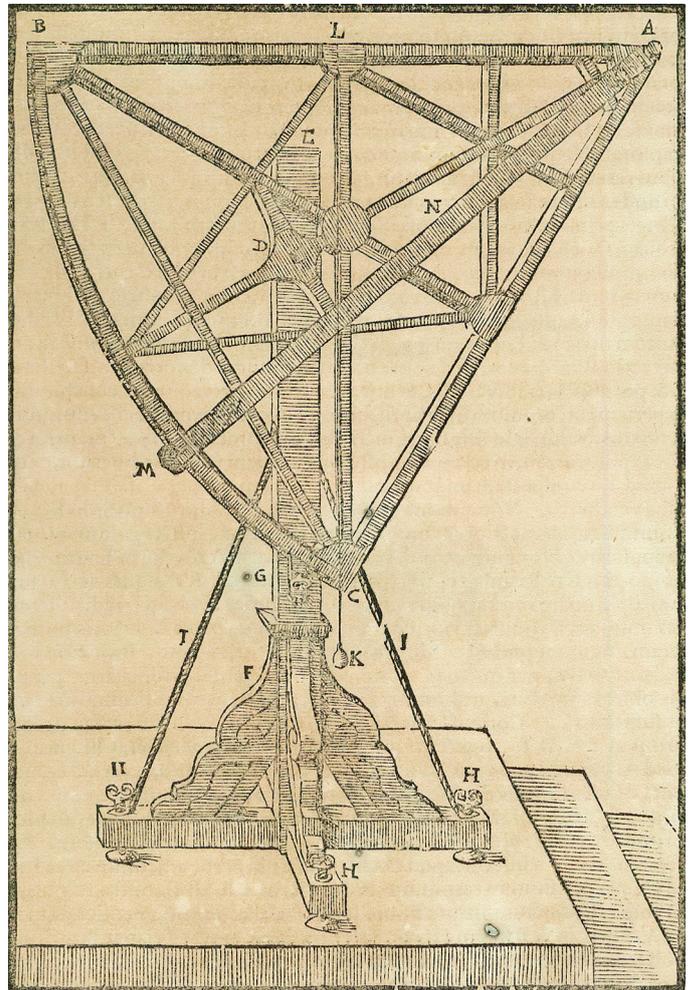
Immédiatement après l'inauguration de son imprimerie en 1584, Tycho nous adresse les images de ses instruments (fig. 7) : quadrants, sextants, sphères armillaires (voir par exemple la description de 22 instruments qu'il donne, ainsi que les procédures pour les utiliser, dans son *Astronomiae instauratae mechanica*).



**Fig. 7c - Arc à deux parties avec deux pinnules de visée (I et K) pour la détermination de la distance angulaire entre deux corps célestes.**

Tiré de Tychonis Brahe *Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public



**Fig. 7d - Sextant astronomique, instrument portable effectuant des mesures identiques à celles d'un quadrant.**

Tiré de Tychonis Brahe *Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

Tycho Brahe n'est donc pas qu'un astronome, un concepteur d'instruments, un théoricien du système du monde : il est aussi un communicant. L'assentiment de ses pairs passe par le développement de la confiance en ses résultats. Comment pourrait-il en être autrement dès lors qu'il aime clamer à l'envi l'extraordinaire précision de ses instruments et donc de ses mesures. Ses résultats ne peuvent plus être discutables. Depuis Tycho, tout traité d'astronomie respectable se devra de s'ouvrir sur une discussion portant sur les instruments utilisés et les méthodes associées afin de garantir un certain niveau de précision.

## La guerre contre Mars

**E**N CETTE FIN DU XVI<sup>E</sup> SIÈCLE, la planète Mars est une planète cruciale : elle détient à elle seule la clé du vrai système du monde, et Tycho Brahe est le premier à le comprendre. Sommes-nous dans un monde géocentrique, avec la Terre en son centre, ainsi que le prodigue l'enseignement scolastique depuis près de 1 500 ans, depuis que Ptolémée l'a décrit dans son *Almageste* ? Ou sommes-nous dans un système héliocentrique, avec le Soleil en son centre, ainsi que le conçoit Copernic dans son *De Revolutionibus* de 1543 ?

Dans le système ptolémaïque, Mars est au-delà du Soleil, sa distance à la Terre est éternellement plus grande que ne l'est celle du Soleil. Dans le système copernicien, dans les moments auxquels elle se trouve dans son opposition au Soleil, Mars devient l'astre le plus proche de la Terre. La notion de distance dans l'espace était encore très incertaine, raison pour laquelle les astronomes avaient usage de parler plutôt de la parallaxe des planètes qui est une grandeur angulaire correspondant à l'angle sous lequel est vu le rayon équatorial de la Terre depuis la planète considérée.

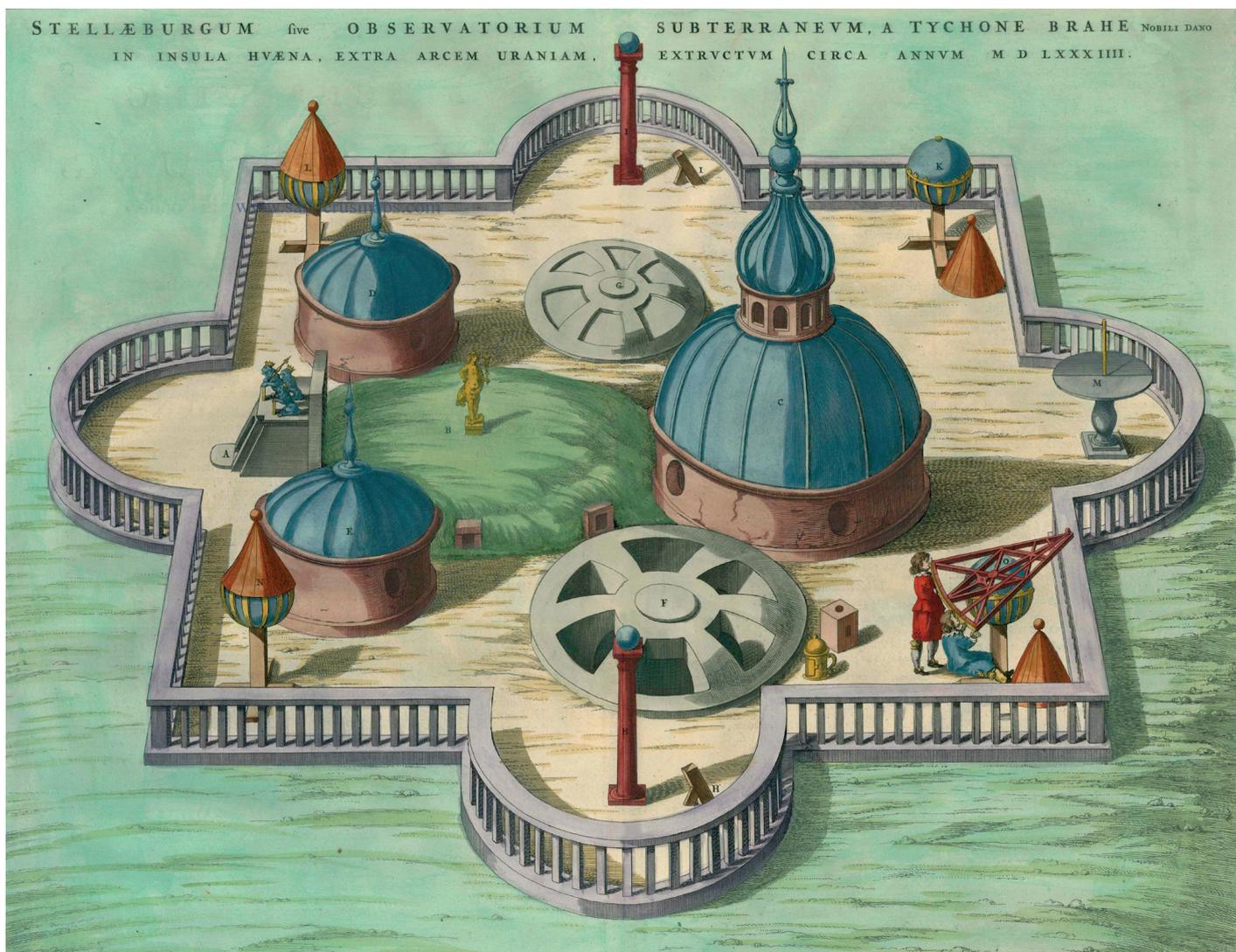
Depuis l'Antiquité, on considère alors comme acquis le fait que la parallaxe du Soleil est de 3' d'angle. Certes, c'est un angle petit, mais cependant très largement surestimé, puisque la parallaxe solaire – grandeur parfaitement connue de nos jours – est en réalité près de 20 fois moindre ; autrement dit, le Soleil est vingt fois plus éloigné de la Terre que ce que l'on s'imagine à cette époque. Mais Tycho ne le sait pas et lui aussi a admis cette valeur. Ce faisant, il se dit qu'il y a peut-être là un moyen de décider duquel des deux systèmes du monde en compétition est le vrai. Pour cela, il suffit de tenter de mesurer la parallaxe de Mars au moment de son opposition (moment auquel Mars est en opposition au Soleil

relativement à la Terre, autrement dit, lorsque Mars et le Soleil se font face à face, alors que la Terre joue les arbitres en s'interposant entre les deux astres). Si Ptolémée a raison, la parallaxe martienne doit être plus petite que 3'. Si c'est en revanche Copernic qui a raison, alors elle est nécessairement plus grande que 3', et doit même être supérieure à 6' à en croire le modèle copernicien. Dans l'un et l'autre cas, il sait, ou pense savoir, être le seul en mesure d'en décider dès lors que la précision de ses mesures est de l'ordre de la minute de degré. Tycho met donc tout en œuvre pour vaincre Mars et accéder à sa parallaxe lors de l'opposition de l'hiver 1582-1583.

Il ne se refuse rien et décide de la construction d'un nouvel observatoire à partir de 1581, modestement dénommé *Stjerneborg* – le palais des étoiles –, doté de nouveaux instruments, plus grands, plus précis – tels que son grand quadrant et son armille zodiacale et son quadrant azimutal tournant –, et surtout, innovation majeure, placés dans des coupoles semi-enterrées afin de les protéger du vent et des vibrations.

L'avantage considérable que nous avons sur Tycho Brahe, quelque 450 ans plus tard, est que nous connaissons la réponse au problème posé. Nous savons que Copernic l'a emporté sur Ptolémée et nous savons que la parallaxe martienne peut atteindre dans les meilleures conditions (oppositions martiennes au voisinage de son périhélie, ce qui signifie que la distance entre Mars et la Terre est minimale, de l'ordre de 50 millions de kilomètres) à peine 27", quantité angulaire absolument hors de portée des instruments et méthodes conçus par Tycho Brahe, mais ceci, il l'ignore.

La ferme conviction qu'il s'est forgée repose sur une assise fragile, la valeur de la parallaxe solaire qui ne dépasse pas les 9" et qu'il n'a curieusement jamais cherché à remettre en question. Il lui est donc impossible de répondre sérieusement au problème



**Fig. 8 - Stjerneborg (palais des étoiles, construit en 1584, observatoire souterrain).**

La plus grande voûte au sud abritait la grande armille équatoriale. À l'est se trouvait le quadrant trigonal. Au nord-est le quadrant azimutal tournant et à l'ouest le grand quadrant en acier.

Tiré de *Epistolarum astronomicarum libri*, 1596.

Domaine public

qu'il a posé, parce que ce problème est incomplètement posé. Cependant, son immense mérite est de proposer une « expérience cruciale » capable de dire aux hommes qui de Ptolémée ou de Copernic a raison. Ce phénomène inspirera d'autres astronomes dans les siècles qui le suivront, nous aurons l'occasion d'y revenir.

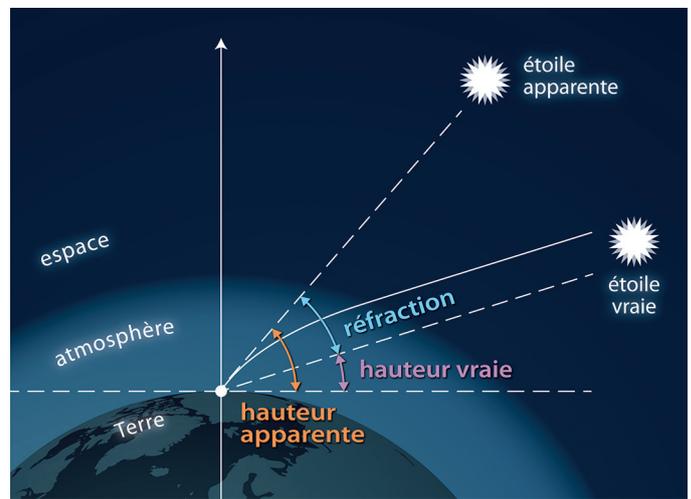
Après la première opposition de Mars observée, celle de 1582, Tycho conclut à l'invalidation du modèle de Copernic, parce qu'il n'arrive pas à mesurer

la parallaxe de Mars, celle-ci étant insensible et ne ressortant pas des mesures. Tycho constate donc, à juste titre, qu'elle est si faible – inférieure à la minute de degré – qu'elle est indétectable, mais il en tire une mauvaise conclusion : si elle est si petite, cela ne peut résulter que de l'éloignement de la planète qui est supérieur à celui du Soleil, accroché qu'il est à la valeur de 3' de la parallaxe solaire. Mais cinq ans plus tard, à l'occasion de l'opposition de 1587, il revient sur ses premières affirmations pour annoncer l'exact contraire : la parallaxe de Mars est bien plus grande que celle du Soleil.

Pourquoi ce revirement pour une même observation ? L'affaire n'est pas claire jusqu'à présent. Le jeune protégé de Tycho Brahe, Kepler lui-même, dans le chapitre 11 de son *Astronomia Nova* (1609), procède à un réexamen minutieux des observations de 1582 pour conclure à l'impossibilité de déterminer une valeur mesurable de la parallaxe. Preuve aussi que l'un et l'autre n'en ont jamais discuté ensemble auparavant. L'analyse de ses observations montre que Tycho a clairement cherché à déterminer la parallaxe de Mars pendant l'hiver 1582-1583 en observant la planète à son lever le soir et à son coucher au petit matin. Le principe est simple, en mesurant le déplacement de Mars entre ces deux moments et en le comparant à ce qu'il devrait être en ne tenant compte que du mouvement réel de la planète, il est alors possible d'en déduire la valeur de la parallaxe martienne, dont l'effet est d'abaisser légèrement la position apparente de la planète dans le ciel, ce qui doit produire un déplacement apparent dans le ciel plus important qu'attendu entre ces deux moments. Nouvel échec pour l'opposition du 22 janvier 1585. Tycho, qui mesure le déplacement de la planète Mars par rapport à des étoiles de référence brillantes à l'aide de son grand sextant trigonal (par exemple  $\eta$  leonis en 1585), s'interroge alors sur la valeur d'un autre effet, celui de la réfraction qu'il a jusqu'à présent négligé.

La réfraction atmosphérique est un effet optique qui survient lors de la traversée de l'atmosphère des rayons lumineux dont le trajet est légèrement courbé, conférant aux objets célestes une position dans le ciel surélevée par rapport à leur position réelle sur la sphère céleste (fig. 9). La bataille contre Mars en appelle par conséquent une autre, celle contre la réfraction, qui à son tour exige de nouveaux instruments.

Tycho récupère certains instruments d'Uraniborg pour les reconditionner et les apporter à Sterjeborg, tels que son quadrant azimutal tournant ou



**Fig. 9 - Réfraction astronomique.**

La courbure des rayons lumineux lors de leur traversée de l'atmosphère terrestre surélève en apparence la position des astres. Toute mesure de position d'un astre doit par conséquent prendre en compte cet effet

*Crédits Y. Gominet/IMCCE*

son grand cadran en acier, et enfin son armille équatoriale installée à l'été 1585 qui lui permettait de déterminer directement l'ascension droite et la déclinaison d'un astre, mais surtout de mesurer précisément la valeur de la réfraction pour chaque degré de la hauteur au-dessus de l'horizon.

De façon surprenante, Tycho constitue deux tables de réfractions bien distinctes, l'une pour le Soleil et l'autre pour les étoiles. Elles diffèrent entre elles d'une valeur constante de  $4'30''$ . Pourquoi cet écart ? Parce que Tycho ne considère pas le Soleil comme une étoile, mais comme un corps errant, au même titre que les autres planètes, avec cette fameuse parallaxe de  $3'$  héritée de l'Antiquité, alors que les étoiles sont si lointaines que leur parallaxe est égale à zéro. Or, la constitution d'une table de réfraction pour le Soleil nécessite de comparer les positions vraies aux positions apparentes, celles-ci étant obtenues après correction – fausse comme nous l'avons vu précédemment –, de la valeur de la parallaxe solaire. Comme la parallaxe abaisse la position apparente des astres et que la réfraction l'élève, il faut nécessairement, dans le cas du So-

leil, une réfraction solaire capable de contrecarrer l'effet de la parallaxe solaire, par conséquent beaucoup plus forte que celle d'une étoile pour laquelle aucune correction de parallaxe n'intervient. À ce propos, l'absence de parallaxe stellaire mesurable a permis à Tycho Brahe de calculer que les étoiles les plus proches doivent se trouver à des distances au moins 700 fois plus grandes que la distance à Saturne. En réalité, l'étoile la plus proche du Soleil est 30 000 fois plus éloignée que la planète Saturne. Toutefois, par le seul gain en précision obtenu – la minute de degré –, l'Univers s'est accru en taille dans des proportions de plus en plus inimaginables.

La parallaxe de Mars continue à être l'objet des investigations de Tycho Brahe, ce qui le pousse à bâtir des instruments toujours plus grands, comme le nouveau sextant trigonal et le « nouveau » quadrant azimutal tournant (fig. 10). En fait, c'est un recyclage de celui installé dans Uraniborg. Toute son armée d'assistants est en ordre de marche pour la campagne de l'opposition de Mars 1587. Tycho engage la bataille contre Mars au soir des 10 et 11 mars 1587. Cette fois, il compte bien appliquer ses corrections de réfraction, mais malheureusement, celles obtenues pour le Soleil et non celles pour les étoiles. En appliquant des corrections fausses, cela garantit d'aboutir à une parallaxe de Mars bien plus grande que la parallaxe du Soleil, par conséquent cela garantit le résultat recherché, l'accord avec les idées coperniciennes...

Il est amusant de se dire que si le Système solaire avait effectivement été 20 fois plus petit – par conséquent, si la parallaxe solaire avait bien été celle annoncée par les Grecs, soit 3' –, alors Tycho aurait été considéré comme celui qui a détrôné Ptolémée en démontrant que la distance Terre-Mars est beaucoup plus petite que la distance Terre-Soleil.

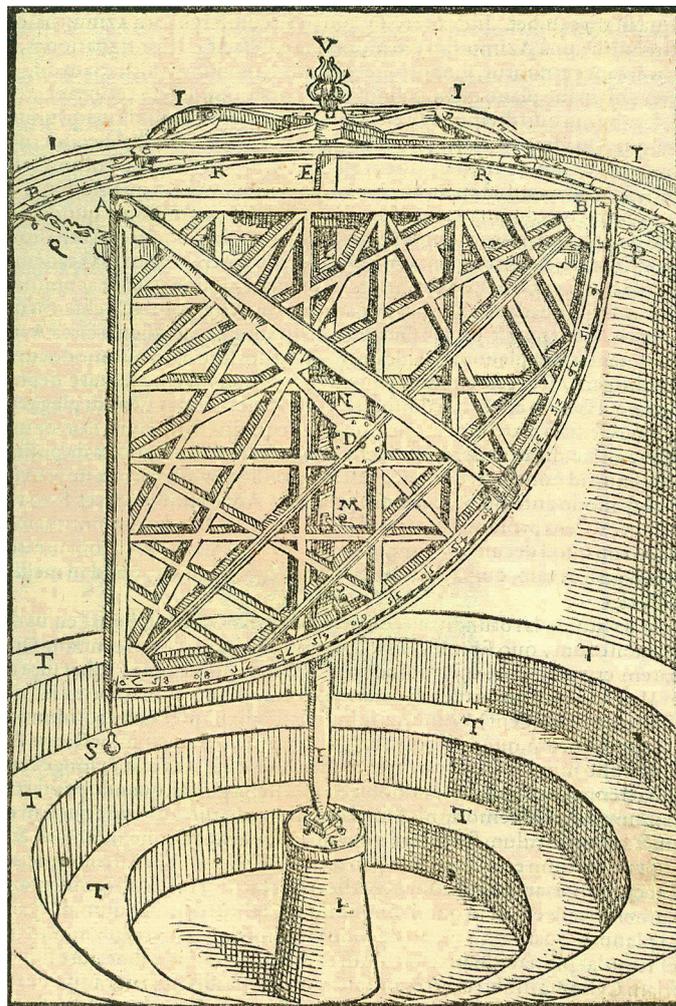


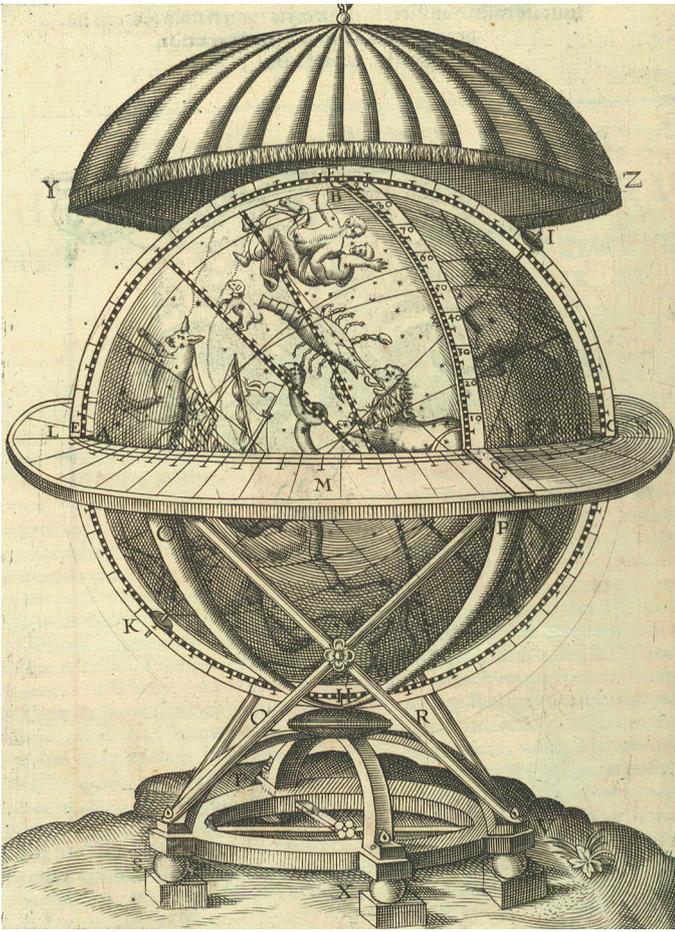
Fig. 10 - Quadrant azimutal tournant installé à Stjerneborg en 1586.

Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

## Le firmament de Tycho

**E**N MÊME TEMPS que son installation à Uraniborg, Tycho Brahe, à l'instar d'Hipparque et de Ptolémée avant lui, fait construire un globe en laiton de 1,50 m de diamètre sur lequel il grave la position des étoiles qu'il observe, calculée pour l'année 1600 après application de la correction de précession (fig. 11). En 1595, il annonce en avoir placé plus d'un millier sur son globe après 25 années de mesure. Le globe fut détruit en 1728 dans l'incendie de l'université de Copenhague.



**Fig. 11 - Sphère du ciel sur laquelle Tycho reportait la position des étoiles mesurées.**

Dans sa bibliothèque, il grave les positions des étoiles qu'il mesure, minutieusement et patiemment, 25 ans durant, sur un grand globe céleste de 1,50 m de diamètre.

Tiré de *Tychonis Brahe Astronomiae instauratae mechanica*, 1598.

Domaine public

Sa nouvelle carte du firmament comporte 1 004 étoiles fixes (dont 777 localisées exactement, et le reste ajouté en hâte pour faire un chiffre rond avant le départ d'Uraniborg en 1597 pour Prague où il deviendra le mathématicien impérial à la cour de l'empereur Rodolphe II). Une version imprimée des 777 positions précises paraît en 1602, puis Kepler (1571-1630), son prolifique élève, éditera le catalogue complet des 1004 étoiles en 1627. La précision de son catalogue est de l'ordre de 2' jusqu'à la magnitude 3 ; environ 15 % des entrées, constituées des étoiles les plus faibles jusqu'à la magnitude 6,

atteignent une précision de 10' (pour Tycho, qui observait à l'œil nu – la lunette n'apparaîtra qu'au siècle suivant –, la magnitude se ramène réellement à la grandeur de l'étoile : ainsi, les étoiles de 1<sup>re</sup> magnitude ont un diamètre apparent de 120", 90" pour les secondes, 65" pour les troisièmes, 45" pour les quatrièmes, 30" pour les cinquièmes et 20" pour les sixièmes). Grâce à cette longue suite d'observations, Tycho remesure la vitesse de précession des équinoxes qu'il trouve égale à 51" par an, valeur qu'il adopte pour ses tables de précession accompagnant son catalogue d'étoiles. Au passage, il démontre l'inanité de la trépidation qu'il prouve provenir entièrement d'erreurs d'observation (système inventé par Thābit ibn Qurra (824-901) à Bagdad pour expliquer une supposée variation annuelle de la précession. Cette théorie, présente dans les *Tables alfonsines* publiées en 1252, était encore universellement adoptée au temps de Tycho ; Copernic y croyait également). Il déclare ainsi (*Astronomiae instauratae mechanica*, 1598) :

*J'ai aussi remarqué que l'irrégularité du taux de changement de leurs longitudes (trépidation) n'est pas aussi considérable que Copernic l'a supposé. Ses idées erronées à ce sujet sont une conséquence des observations incorrectes des anciens, ainsi que de celles des temps plus récents. Par conséquent, la précession du point équinoxial durant ces années n'est pas aussi lente qu'il l'a affirmé. En effet, à notre époque, les étoiles fixes ne mettent pas cent ans pour se déplacer d'un degré, comme l'indique son tableau, mais seulement 71,5 ans. Cela a pratiquement toujours été le cas, comme le montre la vérification des observations de nos prédécesseurs. En fait, seule une petite irrégularité apparaît, qui est due à des causes accidentelles. Nous l'expliquerons, si Dieu le veut, plus en détail en temps voulu. C'est moi qui ai découvert pour la première fois que les latitudes des étoiles fixes subissent également des variations en conséquence de la variation de l'obliquité de l'écliptique.*

Par ailleurs, selon les astronomes anciens, les latitudes des étoiles fixes ne pouvaient que rester constantes, car la précession n'était vue que comme un mouvement de la huitième sphère – sphère dite *des étoiles fixes* – autour des pôles de l'écliptique. Tycho avait une correspondance sur cette question avec de nombreux astronomes depuis 1587. Pour Tycho, l'obliquité de l'écliptique avait diminué de 20' depuis l'Antiquité. Et, à la condition supplémentaire que les pôles de l'écliptique ne soient pas cloués à des positions sidérales fixes sur la huitième sphère, il est amené à supposer que les étoiles ont

changé leurs latitudes écliptiques en conséquence. Il y a en fait des implications cosmologiques notables, puisque dans le modèle de Copernic, la précession est expliquée par une inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, et donc de l'équateur par rapport à l'écliptique. Par conséquent, dans le système copernicien, la connexion entre les cieux étoilés et les pôles de l'écliptique est rompue, laissant ouverte la possibilité d'un changement dans la latitude des étoiles. Il y avait là une nouvelle manifestation de la supériorité du système copernicien sur le système ptolémaïque.

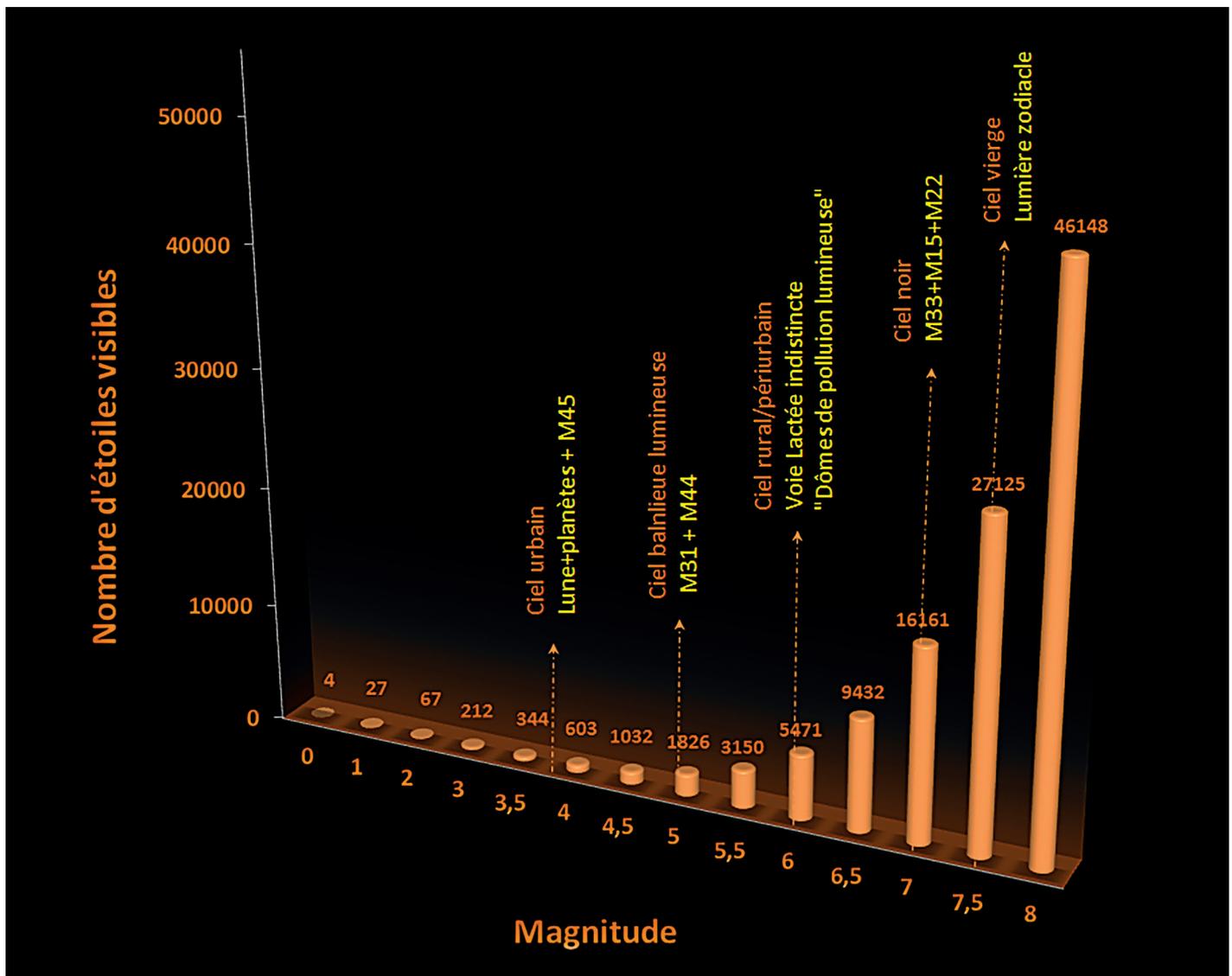


Fig. 12 - Nombre d'étoiles visibles par magnitude.

Pour un hémisphère visible, il est possible de voir environ 1 000 étoiles de magnitude inférieure à 5, 1 500 pour une magnitude inférieure à 5,5 et 2 700 pour une magnitude inférieure à 6.

Crédits P. Descamps/IMCCE

L'un des seuls paramètres fondamentaux qu'il ne redétermine pas est, comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, la parallaxe solaire – angle sous lequel est vu le rayon de l'orbite terrestre – pour laquelle il adopte la valeur de Ptolémée qui était déjà celle d'Aristarque de Samos au IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C., soit 3' (sa valeur exacte est de 8,79"). Dans une lettre à Kepler datée du 1<sup>er</sup> avril 1598, il écrit que d'après ses observations de position de Mars, l'orbite annuelle de la Terre (selon Copernic) ou l'épicycle de Mars (selon Ptolémée) semble varier en taille. C'est le premier pas vers la découverte de l'ellipticité des orbites par Kepler (*Astronomia Nova*, 1609), qui sera comme le coup de grâce donné au dogme cosmographique des orbites circulaires.

Il est à noter qu'avant Tycho Brahe, durant plus de 1 300 ans, la précision des observations de positions est restée quasiment inchangée entre le catalogue de Ptolémée, donné pour l'année 137, et celui d'Ulugh Beg (1393-1449) pour l'année 1437. Ulugh Beg était un prince mongol qui fit construire un observatoire à Samarcande en 1420. Son catalogue comporte 1 018 entrées et a une précision de l'ordre de 20'. L'observatoire d'Ulugh Beg cessa immédiatement ses activités après la mort de son fondateur, décapité à l'âge de 55 ans par les fondamentalistes de l'époque pour avoir ressuscité les sciences arabo-musulmanes. Ali Qushji (1403-1474), meilleur disciple et ami d'Ulugh Beg, après un long périple, parvint à Constantinople et sauva le catalogue qui fut remis en grande pompe au sultan Mehmet II. Ce dernier le fit publier sous le nom *Tables sultaniennes*. C'est à Oxford, en 1648, que le travail réalisé par Ulugh Beg dans son observatoire fut pour la première fois traduit et édité. Il connut par la suite plusieurs éditions commentées et annotées. Tycho Brahe n'en eut par conséquent jamais connaissance. Il est fort probable que beaucoup d'étoiles sont déduites du catalogue de Ptolémée et que 700 étoiles soient des mesures originales. La précision équivalente à celle du catalogue de Ptolémée. Ceci résulte du fait qu'Ulugh Beg n'innove pas, mais utilise les

mêmes instruments et méthodes que Ptolémée. Le catalogue aurait ainsi été produit avec une sphère armillaire zodiacale, graduée de 15' en 15' comme celle de Ptolémée.

Remarquons que Tycho, tout comme ses prédécesseurs, Hipparque, Ptolémée, Ulugh Beg, etc., établit un catalogue contenant environ un millier d'étoiles. Ceci tient uniquement au fait que les observations sont faites à l'œil nu. L'œil humain peut difficilement voir les étoiles de sixième grandeur (ou magnitude) et au-delà (fig. 12). C'est pourquoi les mesures de position se faisaient aux mieux sur les étoiles de 3<sup>e</sup> magnitude jusqu'à la 5<sup>e</sup> magnitude.

En définitive, Tycho a gagné un facteur 10 en termes de précision astrométrique – c'est-à-dire un ordre de grandeur (un facteur 100 équivaut à deux ordres de grandeur) –, en descendant jusqu'à la minute de degré. C'est une avancée considérable. Ce gain permet à lui seul de briser le dogme antique des orbites solides, d'abolir l'immutabilité aristotélicienne de la zone supralunaire, de conduire aux lois de Kepler, à la dynamique de Newton et à la maturation de l'astronomie en tant que science à part entière.

## Références

O. Gingerich and J.R. Voelkel, « Tycho Brahe's Copernican Campaign », *Journal for History of Astronomy*, 1998.

K. Krisciunas, « A More Complete Analysis of the Errors in Ulugh Beg's Star Catalogue », *Journal for History of Astronomy*, 1993.

E. Perkins, « Instruments of Authority: Tycho Brahe's Technological Illustrations », *History and Technology*, vol. 34, 2018.

V.E. Thoren, « New Light on Tycho's Instruments », *Journal for History of Astronomy*, 1973.

V.E. Thoren, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, Cambridge University Press, 1990.