

L'astronomie de la montre

Ilan Vardi

ilan@chronomaitre.org
www.chronomaitre.org

Décembre 2011

45

Bulletin SSC n° 68

L'astronomie actuelle est focalisée sur l'astrophysique et la cosmologie: les trous noirs, l'évolution de l'univers, etc., et l'astronomie mathématique «à l'ancienne» qui décrit le mouvement du Soleil et de la Lune est souvent délaissée. On peut donc oublier que ces phénomènes «élémentaires» sont à la base de notre mesure du temps et que la fonction de nos montres revient à l'affichage de ces indications astronomiques. L'objet de cet article est de faire le point sur les phénomènes parfois subtils indiqués par nos montres et les applications horlogères examinées sont le jour, le mois, l'année, le temps sidéral et l'orientation du ciel.

1. Le jour

Question piège: «Quelle est la signification astronomique de notre jour civil de 24 heures?» Vu comment la question est posée on se doute que la réponse «une révolution de la Terre autour de son axe» est incorrecte et le fait est que celle-ci se fait en 23 heures et 56 minutes. En fait, un jour correspond à une rotation du Soleil autour de la Terre. Ceux qui sont convaincus que c'est la Terre qui tourne autour du Soleil devraient se poser la question: «par rapport à quoi?» parce que par rapport à l'observateur terrestre essayant de mesurer le temps, tout tourne autour de lui donc autour de la Terre, et la Terre tourne autour du Soleil par rapport aux étoiles fixes.

La figure 1 démontre pourquoi la rotation de la Terre est plus courte qu'un jour solaire: une rotation de la Terre correspond à une rotation par rapport aux étoiles fixes, mais puisque la Terre a bougé dans sa course autour du Soleil, il faut 3 minutes 56 secondes de plus pour que l'observateur, représenté par la flèche, revoie le Soleil directement à midi.

Notre temps civil est donc basé sur le Soleil qui gère nos activités diurnes, mais ce dernier n'est pas un très bon chronomètre et perd jusqu'à 30 secondes par jour [1], en revanche, sa performance moyenne est très bonne, et c'est celle-ci qui est utilisée pour notre temps civil. La réponse exacte à la question est donc: *24 heures représente le temps nécessaire, en moyenne, au Soleil pour faire un tour autour de la Terre.*

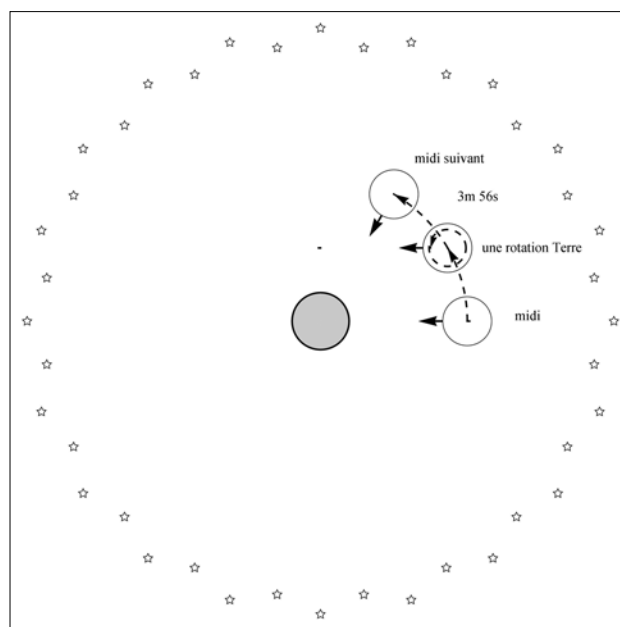


Fig. 1 : Un jour de 24 heures.

Il est important de noter que ce temps moyen est une abstraction et que son utilisation n'est devenue possible que grâce à l'horlogerie, et notamment par l'invention de

l'horloge précise par Huygens en 1656 pour que chaque ville puisse afficher le temps moyen civil sur une horloge centrale.

2. Le mois

A quel phénomène astronomique correspond un mois lunaire de 29,53 jours ?

Certainement pas à une rotation de la Lune autour de la Terre, qui nécessite 27,32 jours. En fait, le mois lunaire correspond au réalignement Soleil–Terre–Lune et la figure 2 démontre pourquoi ceci dure plus longtemps qu'une rotation de la Lune (toujours par rapport aux étoiles fixes) : la Lune fait un tour autour de la Terre par rapport aux étoiles fixes, mais entre-temps, la Terre a tourné autour du Soleil et il faut deux jours de plus pour que les trois soient réalignés.

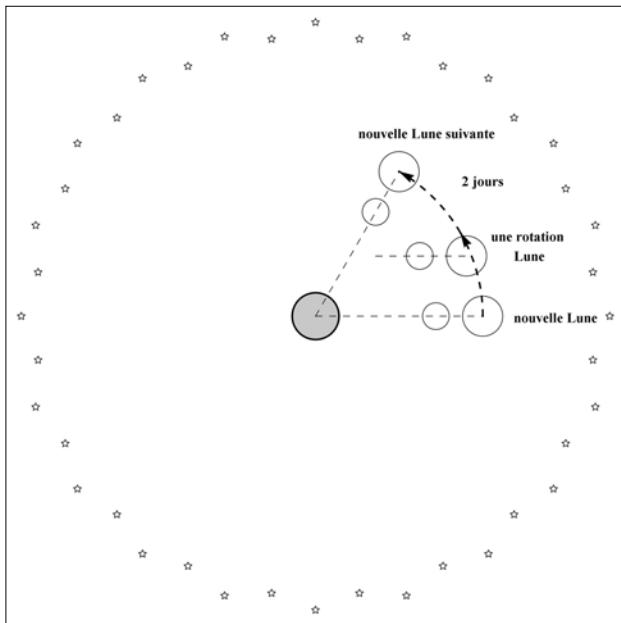


Fig. 2: Un mois lunaire.

Comme pour le jour solaire réel, la longueur du mois lunaire réel varie sensiblement, et il faut prendre la moyenne pour arriver au chiffre précis de 29,53058886 jours (29j 44 m 2,8775s) cité dans la définition du mois. La réponse à la question est donc : *un mois lunaire est le temps nécessaire, en moyenne, au réalignement Soleil–Lune–Terre.*

Il est important de dire que les mois de notre calendrier Grégorien ne sont qu'un vestige des calendriers lunaires et ne correspondent à aucun phénomène naturel, la connaissance du quantième n'apporte aucune information astronomique.

3. L'année

A quel phénomène astronomique correspond notre année civile de 365,24 jours ? Certainement pas à un tour de la Terre autour du Soleil. En effet, il dure une année + 20 minutes = 365,256 jours. Si l'année était vraiment basée sur ce circuit, notre calendrier Grégorien, à la place d'annuler 3 années bissextiles tous les 400 ans, leur ajouterait plus de jours !

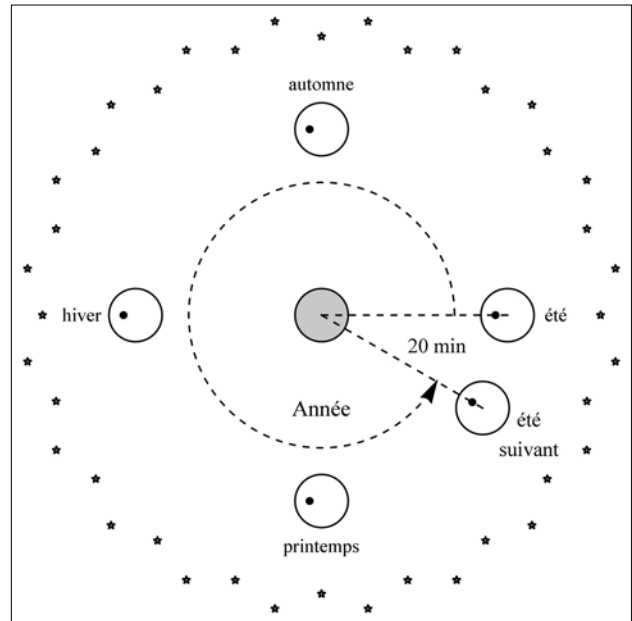


Fig. 3: L'année civile.

En fait, une année représente le retour des saisons : en citant une date de l'année, on devrait avoir une idée du temps qu'il fait, et une estimation assez précise du degré d'ensoleillement. Ces données variables sont directement liées à l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à la position de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire, aux saisons. La réponse est donc : *l'année est le temps nécessaire au retour de l'équinoxe du printemps.*

L'année ne correspond pas à un tour de la Terre autour du Soleil parce que l'axe de la Terre tourne aussi en raison d'une précession similaire à celle d'une toupie. Je vais l'illustrer avec le phénomène équivalent, la précession des solstices, où j'utilise la définition équivalente de l'année par rapport au solstice d'été quand l'axe de la Terre est penché vers le Soleil. Comme indiqué dans la figure 3, où l'orbite de la Terre est vue par le haut et l'inclinaison de l'axe de la Terre est indiquée par la position du pôle nord, une année correspond au retour du solstice d'été, moment où le pôle nord penche à nouveau vers le Soleil. On remarque qu'après une révolution complète, la Terre est dans la même position par rapport aux étoiles, mais son axe ne penche plus vers le

Soleil, en effet, c'était le cas 20 minutes plus tôt en raison de la précession.

Ce décalage est presque imperceptible puisqu'une rotation complète de l'axe de la Terre nécessite environ 26'000 ans mais les conséquences astronomiques sont visibles après quelques siècles. C'est ainsi qu'Hipparque a découvert le phénomène il y a plus de 2'000 ans, en comparant ses observations avec des siècles de données compilées par les astronomes babyloniens.

4. Le temps sidéral

A quel phénomène astronomique correspond un jour sidéral de 24 heures de temps sidéral? Une fois de plus, la réponse n'est pas «une rotation de la Terre» qui dure 24 heures sidérales + 1/100 seconde. Ce décalage est surprenant puisque que le temps sidéral est défini pour repérer des objets célestes mais il faut prendre en compte cette «marche des étoiles» de 0,01 s/j pour prédire exactement leur position.

Pour comprendre ce qui se passe, on commence par le calcul standard expliquant la définition de jour sidéral: la Terre fait 365,24 rotations par an, une par jour, plus une rotation due à son parcours autour du Soleil (il y a un ciel d'hiver et un ciel d'été), ce qui fait 366,24 rotations. Donc, la Terre tourne autour d'elle-même en $24\text{ h} \times 365,24 / 366,24 = 23\text{ h } 56\text{ m } 4,090530833\text{ s}$ (en utilisant la valeur précise de l'année). Le lecteur averti a certainement remarqué que l'année utilisée dans ce calcul est celle des saisons, plus courte que la véritable rotation de la Terre autour du Soleil, donc ce calcul est faux, mais il est quand même utilisé pour définir le jour sidéral!

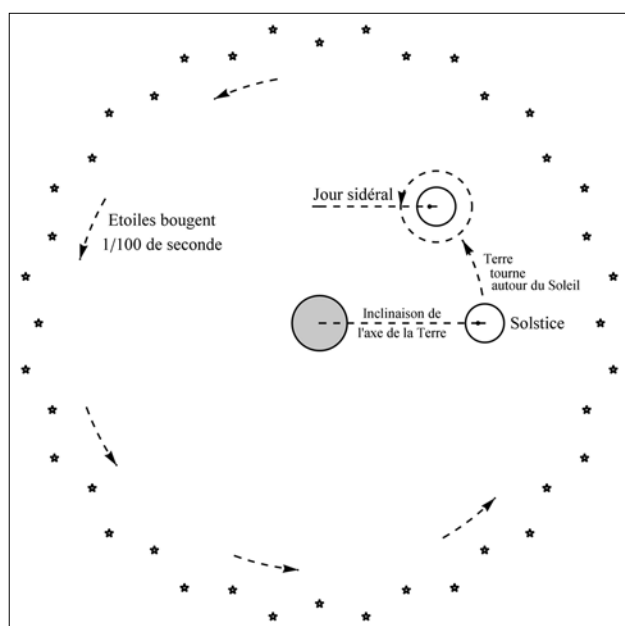


Fig. 4: Un jour sidéral.

Pour l'expliquer, on se réfère à la figure 4 qui démontre que la définition du jour sidéral est une rotation de la Terre par rapport à la direction de l'inclinaison de son axe. Comme l'a été remarqué dans le chapitre précédent, par rapport au référentiel de cet axe, les étoiles font un tour complet (= 24 heures sidérales) en 26'000 ans, ce qui revient à $24\text{ h} / (26'000 \times 365,24) = 1/100$ seconde par jour.

Cette convention ne correspond pas à la réalité physique mais les astronomes ont préféré ces coordonnées fictives pour que l'observateur terrestre ait un ciel réglé avec l'année civile, c'est-à-dire, que les coordonnées du Soleil ne changent pas d'une année à l'autre, et avec cette convention, la Terre tourne autour du Soleil en exactement un an et autour d'elle-même en exactement un jour sidéral. L'ironie est que les astronomes, qui depuis des années veulent nous convaincre qu'il ne faut pas se croire au centre de l'univers, ont quand même choisi une modélisation où toutes les étoiles tournent autour de nous!

On peut vérifier que ces calculs sont cohérents avec le chapitre précédent en notant que ce retard des étoiles revient à environ 3 secondes par an, et que le Soleil qui rétrograde de 24 heures par an par rapport aux étoiles prend $(1\text{ an}) / (24\text{ heures} / 3\text{ secondes}) =$ environ 20 minutes de plus pour combler cet écart, exactement la différence donnée entre l'année civile et le circuit de la Terre autour du Soleil.

5. L'orientation

Finalement, un sujet qui prête à confusion est l'orientation du ciel. C'est-à-dire, dans quel sens tournent le Soleil et les étoiles? Cette question concerne directement la haute horlogerie où l'on remarque que pour les montres astronomiques de Patek Philippe et Jaeger-LeCoultre, les étoiles tournent dans le sens antihoraire (d'où l'astuce de Patek Philippe d'afficher la carte sur le dos de la montre pour que tout le mécanisme tourne dans le même sens, voir la figure 5), tandis que pour les montres d'Ulysse Nardin et de Christiaan van der Klaauw, les étoiles tournent dans le sens horaire.

Pour le comprendre, on fait l'expérience suivante: on pointe son bras dans les directions où se trouve le Soleil pendant le jour: est, sud, ouest. Ce sont les mêmes directions que parcourent les étoiles pendant la nuit. On regarde bien son bras pendant l'expérience et on conclut qu'il tourne en sens horaire. Sauf que les yeux sont au-dessus du bras tandis que le Soleil et les étoiles sont au-dessus des yeux! Donc, il faut imaginer que le bras représente le Soleil et les étoiles, et que l'on est une minuscule fourmi qui regarde le bras depuis le sol, c'est comme si l'on regardait les aiguilles d'une montre en étant un grain de poussière sur le cadran. Après suffisamment d'essais, on devrait conclure que si le ciel est une montre géante, alors le Soleil et les étoiles tournent dans le sens antihoraire!

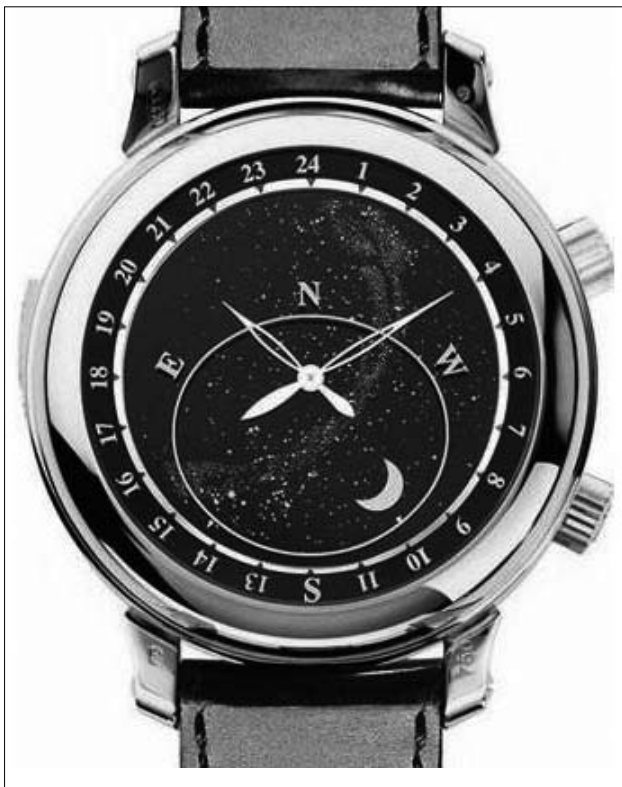


Fig. 5: La carte de la Patek Philippe Sky Moon Tourbillon nécessitera une mise-à-jour dans 2'000 ans.



Fig. 6: Jaeger-LeCoultre Grande Complication à affichage sidéral antihoraire.

Cette expérience explique aussi pourquoi nos montres tournent dans le sens horaire que l'on connaît : comme on l'a vu dans le chapitre 1, notre conception de l'heure vient du Soleil et par le passé celui-ci était observé sur un cadran solaire où l'ombre du Soleil tourne *sous nos yeux*, donc dans le sens horaire. Ceci donne la conclusion paradoxale : *les aiguilles d'une montre tournent dans le sens horaire parce que le Soleil tourne dans le sens antihoraire dans le ciel.*

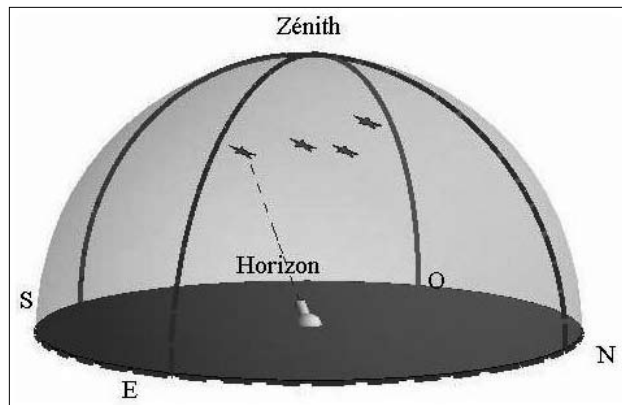


Fig. 7: L'observation d'une étoile dans le ciel.

Chez Patek Philippe et Jaeger-LeCoultre, une carte du ciel correspond directement à l'observation terrestre telle que décrite dans la figure 7 ; c'est ce que voit l'observateur central visant l'étoile, et l'on peut repérer les étoiles en élevant la montre directement devant soi. Puisque l'observateur voit le ciel tourner dans le sens antihoraire, la carte des étoiles de ces montres tourne aussi dans le sens antihoraire. Ceci est évident pour la montre Master Grande Tradition Grande Complication de Jaeger-LeCoultre de la figure 6, où les heures sidérales indiquées directement par la carte des étoiles sont dans le sens antihoraire et sur la Sky Moon Tourbillon de Patek Philippe de la figure 5, où les indications «E», «S», «W», «N» sont dans le sens antihoraire.

En revanche, les montres d'Ulysse Nardin et de Christiaan van der Klaauw sont basées sur l'astrolabe, qui est une projection d'un globe céleste comme celui de la figure 8 qui est exactement la figure 7 d'un point de vue extérieur à la sphère céleste. De ce point de vue extérieur, la constellation en «_» forme un «L» inversé, tandis que l'observateur intérieur de la figure 7 voit «_» et la constellation ressemble à une véritable lettre «L».

Plus généralement, le point de vue extérieur inverse tous les objets célestes. Il s'ensuit que la projection sur l'astrolabe est inversée, et que les étoiles paraissent comme reflétées dans un miroir, donc elles tournent dans le sens inverse = horaire ! D'ailleurs, dans l'astrolabe de la figure 11, un habitué du ciel étoilé remarquera tout de suite l'inversion.

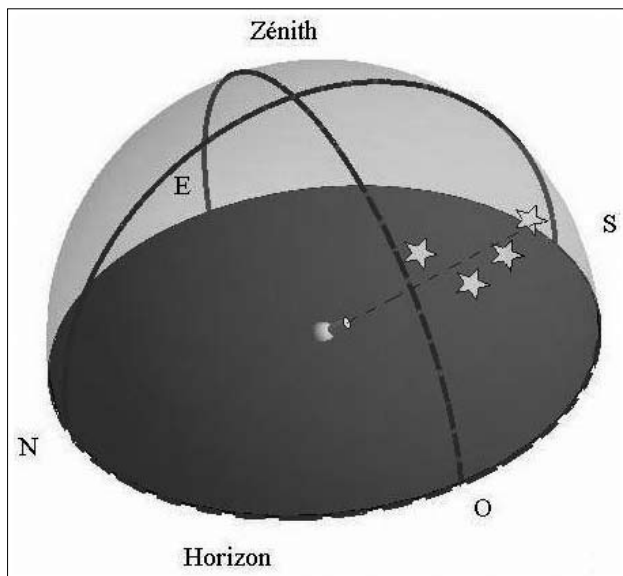


Fig. 8 : Les étoiles vues de l'extérieur de la sphère céleste.

Cette dichotomie revient donc à la différence entre le point de vue intérieur, où l'observateur est au milieu de la voûte céleste et le point de vue extérieur où l'on regarde un globe céleste. Comme pour les montres astronomiques, la longue épopée des cartes du ciel est divisée, on reconnaît facilement les cartes intérieures par les signes astrologiques progressant en sens horaires et les cartes extérieures par ces signes en sens antihoraire [2]. On peut même voir sur le Google Sky actuel que la carte du ciel ancienne (option « Historical ») a une écriture inversée, ceci parce que Google a fait le choix malheureux d'une carte classique extérieure tandis que la carte scientifique doit nécessairement être intérieure pour faciliter l'observation directe [3].

Pour ajouter à la confusion, on remarque que l'orientation est inversée dans l'hémisphère sud où les objets célestes tournent : est, nord, ouest (si la montre avait été inventée dans l'hémisphère sud, nos aiguilles tourneraient dans le sens inverse). Ceci explique pourquoi la phase de Lune est inversée dans l'hémisphère sud, l'illumination de la Lune qui croît de droite à gauche dans notre ciel s'y fait de gauche à droite. Finalement, le cas le plus délicat est la région entre les tropiques du Cancer et du Capricorne, où les clients fortunés peuvent s'attendre à une montre astronomique personnalisée réellement unique !

6. La montre

Notre temps civil est basé sur le Soleil et la montre est une figuration du Soleil faisant une gigantesque aiguille dans le ciel qui fait office de gigantesque cadran. Ceci est plus évident pour les montres GMT et pour les montres à équation

tion du temps marchante prenant en compte la variabilité du Soleil [1].

L'indication du mois lunaire est simplement la phase de Lune, une complication standard [4]. A la base, elle est mécanisée par un disque à deux Lunes opposées tournant une fois tous les 59 jours et un guichet ne laissant apparaître que la partie supérieure du disque, donc n'affichant qu'une des deux Lunes. La rotation du disque est effectuée de manière similaire au quantième ou jour de la semaine. Puisque ce rythme revient à un mois lunaire de 29,5 jours, l'erreur de 44 minutes par mois donne un affichage rapidement déphasé par rapport à la réalité astronomique : un décalage d'un jour en 3 ans. Les montres de haute horlogerie ajoutent des mobiles supplémentaires donnant un mois lunaire d'exactly 29 jours 45 minutes, une amélioration sensible puisque l'erreur n'atteint les 24 heures qu'en 122 ans. IWC a amélioré ce mécanisme et réduit l'erreur à un jour en 577 ans et A. Lange & Söhne à un jour en 1'058 ans [5].

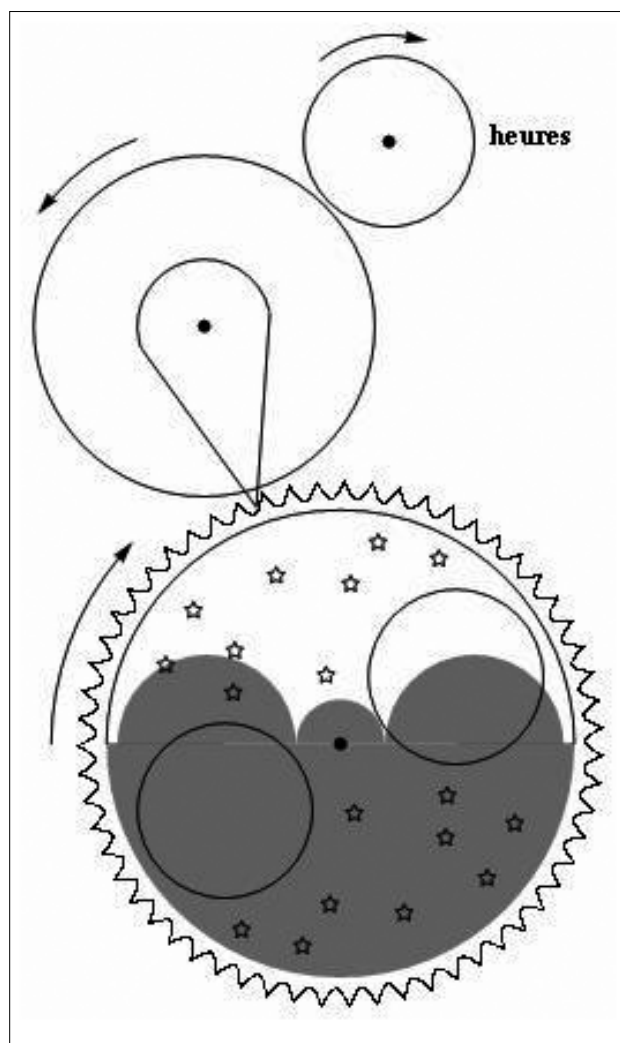


Fig. 9 : Affichage et mécanisme de phase de Lune.

L'orientation affecte aussi le mécanisme de phase de Lune. Puisque la croissance de l'éclairage de la Lune est de droite à gauche dans notre hémisphère nord, nos montres ont un disque de Lune tournant dans le sens horaire, voir la figure 9. En revanche, l'inversion de l'hémisphère sud, nécessite un disque tournant dans le sens antihoraire où la Lune croît de gauche à droite, ce qui est facilement réalisable en posant le guichet sur la portion inférieure du disque de Lune. Certaines montres posent les deux guichets pour que chaque Lune soit fidèle à son hémisphère.

Le temps sidéral est une complication plutôt rare mais utile pour les astronomes qui doivent respecter des rendez-vous terrestres et célestes. Un bel exemple est la Space Traveller's Watch où l'horloger George Daniels a fait appel au mathématicien Henry Daniels pour inventer un mécanisme liant temps civil et sidéral avec une erreur de moins de 1/2 seconde par an [6], [7, Planche XVII]¹. Cette montre réglée au temps civil permet donc de prédire pendant une année la position des étoiles à la seconde près, en prenant compte de la marche des étoiles de 3 secondes par an due à la précession. Le double affichage par deux trains roulants réglés par un seul balancier-spiral est possible grâce au nouvel échappement à double roue indépendante inventé par George Daniels.

Les montres les plus impressionnantes sont sans doute celles ayant une carte des étoiles, elles sont certainement les plus compliquées et souvent les plus chères. Parmi les plus connues on trouve le Calibre 89 de Patek Philippe, la Hybris Mechanica à Triptyque de Jaeger-LeCoultre et l'Astrolabium Galileo Galilei d'Ulysse Nardin. La précession des équinoxes est bien illustrée sur la Triptyque qui affiche les signes astrologiques ainsi que leurs constellations décalées d'un signe comme sur l'astrolabe de la figure 11. Ces cartes des étoiles seront nécessairement affectées par la précession qui les rendra obsolètes d'ici 2'000 ans. Ce sera à nos descendants de choisir entre une mise à jour ou un mémorial à notre ère.

Appendice A – La précession culturelle

Bien que jour, mois et année soient impossibles à dissocier de notre culture, la précession des équinoxes est associée à des faits insolites qui méritent un petit détour. La précession veut dire que l'étoile polaire indiquant le nord ne le fera plus dans quelques millénaires et que des étoiles de la constellation du Centaure visibles par les grecs anciens il y a 2'500 ans sont « descendues » pour former la Croix du Sud incarnant le ciel austral actuel. Plus d'actualité, l'astronome Milutin Milankovitch a proposé une théorie pour expliquer le changement climatique basé sur le fait

qu'il y a 10'000 ans, c'était notre hiver qui était plus long que notre été [8].

S'éloignant du domaine scientifique, la précession démontre que les signes astrologiques actuels n'ont rien à voir avec les astres, remarque rassurante pour ceux qui n'y croient pas. D'abord un rappel de leur définition: La Terre tourne autour du Soleil dans un plan où se trouvent 12 constellations, le Zodiaque, et un alignement Terre–Soleil–constellation veut dire que l'on est dans ce signe astrologique. En raison de la précession, ces constellations tournent et, en à peu près 2'000 ans, la même date du calendrier change de constellation, donc de signe. En revanche, les signes astrologiques utilisés en astrologie ont été instaurés il y a 2'500 ans et par la suite définis par rapport au calendrier donc ils se sont décalés d'un signe par rapport aux constellations réelles. Ceci se voit très bien dans la figure 11 où la constellation du Taureau en forme de Y est décalée sous le signe des Gémeaux.

Le signe astrologique de l'équinoxe du printemps a une importance toute particulière, chaque période de 2'000 ans correspondant à un signe différent appelé une ère. Par exemple, les signes astrologiques ont été établis pendant l'ère du Bélier et nous sommes actuellement dans l'ère des Poissons. Ces ères ont des interprétations religieuses, le poisson, symbole du christianisme correspond bien aux 2'000 dernières années. David Ulansey a aussi proposé que le symbole de la mise à mort d'un taureau dans le mithraïsme, religion mystère romaine, a été inspiré par la fin de l'ère du Taureau [9]. Plus connue est l'ère du Verseau, en anglais *Age of Aquarius* du tube planétaire éponyme et la conviction que cette prochaine ère sera un changement profond est à la base des croyances *New Age*.



Fig. 10: Mithra et le taureau, bas-relief romain, II^e – III^e siècles ap. J.-C. (Musée du Louvre).

¹ Les calculs des rapports d'engrenage solaires et sidéraux donnés par Daniels sont corrects, mais inversés.

Appendice B – La précession illustrée

Il n'a peut-être pas été remarqué auparavant que l'astrolabe donne une excellente illustration de la précession². Cet exercice met en valeur cet instrument ancien dédié à la prédiction de phénomènes astronomiques qui est à l'origine du garde-temps astronomique, la Zytglogge de Berne, la montre de poche de Richard Daners et l'Astrolabium d'Ulysse Nardin [1], [12] et [13]. D'ailleurs, les astronomes du Moyen Age utilisant de vieux astrolabes étaient contraints à physiquement déformer les pointes métalliques d'étoiles pour qu'elles correspondent à leurs positions décalées par la précession [13].

On commence par remarquer que si l'on se déplace sur le cercle polaire (66,5° nord) et que l'on attend 18:00, heure sidérale, alors le solstice d'hiver est directement au sud, donc le pôle écliptique nord (qui est sur l'axe de rotation de la précession) correspond exactement au zénith et l'écliptique à l'horizon. Donc, dans ce lieu et à ce moment, on peut visualiser la précession directement en s'imaginant une rotation dans le sens horaire du ciel au rythme de 1° en 70 ans. Malheureusement, cette expérience ne marche pas très bien puisque l'écliptique, où tourne le Soleil, est à l'horizon, donc on se trouve toujours au lever ou au coucher de Soleil, et on ne verra jamais bien le ciel étoilé!

Pour résoudre ce problème, on construit un astrolabe réglé à 66,5° nord et on tourne l'araignée (carte des étoiles) à 18:00, heure sidérale. Ceci est illustré dans la figure 11 par un astrolabe de mon propre design commémorant le mathématicien et poète Omar Khayyam (1048-1131). L'astrolabe est une projection du ciel donc on aura une configuration équivalente, mais sans l'éclairage solaire nuisible à l'observation des étoiles.

Puisque l'astrolabe préserve les cercles et les angles vus dans le ciel, la précession est aussi une rotation des étoiles dans chaque cercle de même altitude autour du zénith (dans le sens antihoraire dû à l'orientation opposée), d'environ 30° en 2'000 ans, et toutes les étoiles sur une même courbe d'azimut (émanant du zénith) restent toujours sur une courbe de zénith commune. En particulier, en examinant le cercle d'altitude 66,5° passant directement à travers le pôle nord céleste dans la figure 11, on peut trouver les étoiles qui remplaceront l'étoile polaire et trouver l'ère où ceci sera le cas en utilisant le fait que l'équinoxe du printemps se situe à 6 heures dans la figure et que, par définition, les signes astrologiques gardent leurs positions et ne bougent pas. Par exemple, Deneb, la queue de la constellation du Cygne, est bien visible à 110° (11 courbes d'azimut à gauche de l'étoile polaire actuelle), donc sera l'étoile polaire dans $110/360 * 26'000 = 8'000$ ans. Pour trouver l'ère correspondante, on cherche la constellation du zodia-

que à 110° (11 courbes d'azimut dans le sens horaire) de l'équinoxe du printemps, donc dans le signe de Sagittaire, et l'on sait qu'en raison du décalage actuel d'un signe, ce sera l'ère du Scorpion. ■

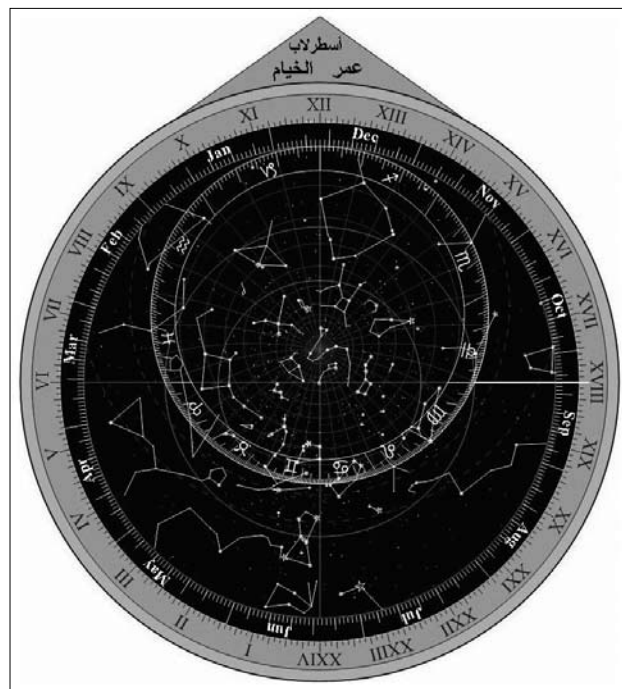


Fig. 11 : Astrolabe pour 66,5° nord, à 18:00, heure sidérale.

Références

- [1] Ilan VARDI, *La Marche du Soleil*, Bulletin de la SSC 62 (2009), pp. 37-44.
- [2] Nick KANAS, *Star Maps*, Springer-Praxis, Chichester, UK, 2007.
- [3] Google Sky, www.google.com/sky/.
- [4] C.-A. REYMONDIN, G. MONNIER, D. JEANNERET, U. PELARATTI, *Théorie d'horlogerie*, Editions de la Fédération des Ecoles Techniques (FET), Suisse, 1998.
- [5] Grand Complications Magazine, Vol. VII 2011, Tourbillon International, New York.
- [6] George DANIELS, *All in Good Time*, Premier Print Ltd., Isle of Man, 2006.
- [7] George DANIELS, *La montre*, Watchprint.com, La Croix, 2011.
- [8] Milankovitch Cycles, en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles.
- [9] David ULANSEY, *The Origins of the Mithraic Mysteries*, Oxford University Press, 1989.
- [10] Ludwig OECHSLIN, *Die Türler-Uhr*, Chronométriphilia 41 (1996), pp. 14-32.
- [11] Richard DANERS, *Astronomische Uhren*, Chronométriphilia 56 (2004), pp. 23-42.
- [12] Philippe DUTARTE, *Les Instruments de l'Astronomie Ancienne*, Vuibert, Paris, 2006.
- [13] James E. MORRISON, *The Astrolabe*, Janus, Rehoboth Beach, DE, USA, 2007.
- [14] Jean MEEUS, *Mathematical Astronomy Morsels I-V*, Willmann-Bell, 1997-2009.

² L'horloge de Türler à Zurich fait mieux puisqu'elle prend la précession directement en compte [10].