

## MUSEE DU TEMPS / BESANÇON



**Transmissions**

L'immatériel photographié  
Jusqu'au 07.11.21

Musée International d'horlogerie  
La Chaux-de-Fonds  
Jean-Christophe Béchet  
Joseph Gobin  
Marie Hudelot  
mih.ch

Musée du Temps  
Besançon  
Thomas Brasey  
Raphaël Dallaporta  
Christophe Florian  
mdt.besancon.fr

### **DOSSIER PEDAGOGIQUE** **TRANSMISSIONS. L'IMMATERIEL PHOTOGRAPHIE** **(JUSQU'AU 7 NOVEMBRE 2021)**

#### **L'ASTRARIUM DE DONDI**

Dossier réalisé par Stéphane Verjux, enseignant chargé de mission DRAEAC Bourgogne-Franche-Comté, professeur de physique

## Sommaire

L'ASTRARIUM DE DONDI .....	
Géocentrisme et Héliocentrisme, visions du monde .....	6
Le Soleil se balade... Visions du ciel depuis la Terre .....	7
Mars se balade... Visions du ciel depuis la Terre .....	9
Les épicycles .....	11
Les origines du système de Ptolémée .....	16
Sources et références .....	17

## L'ASTRARIUM DE DONDI

Dans le cadre de l'exposition temporaire proposée conjointement par le musée du Temps de Besançon et par le Musée International de l'Horlogerie (MIH) de la Chaux de Fonds, le photographe **Raphaël Dallaporta** a choisi d'explorer un objet exceptionnel, **l'Astrarium de Dondi**.

L'Astrarium est une horloge conçue par Giovanni Dondi au XIV<sup>e</sup> siècle, entre les années 1365 et 1380. Giovanni Dondi (1330-1388) est un savant (médecin, astronome, philosophe, poète) mais aussi un des pionniers de l'horlogerie. Il ne subsiste malheureusement, aujourd'hui, plus aucun exemplaire original de l'Astrarium qui lui a demandé 16 ans de travail et qui était considéré à l'époque comme la huitième merveille du monde... Mais en 1985, Luigi Pippa, un horloger milanais en construit une reconstitution, en s'appuyant sur de nombreuses et précises documentations, écrites par Dondi lui-même, décrivant le mécanisme de l'Astrarium. Une copie de l'Astrarium signée Luigi Pippa est présentée au public depuis quelques années au Musée International de l'Horlogerie de la Chaux de Fonds, en Suisse.



Astrarium Dondi, Musée international d'horlogerie, La Chaux de Fonds (Suisse)

© Photographie Raphaël Dallaporta

L'Astrarium est une horloge qui fournit de multiples indications outre l'heure et la date du jour, bien entendu... Mais c'est aussi une **horloge astronomique**. Elle possède en effet **7 cadrans** dans sa partie supérieure qui permettent de connaître les positions dans le ciel du Soleil, de la Lune et des cinq planètes connues à l'époque, car visibles à l'œil nu : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne.



Cadran de la planète Mars, Astrarium Dondi, Musée international d'horlogerie, La Chaux de Fonds (Suisse)  
© Photographie M. Savanyu, MIH



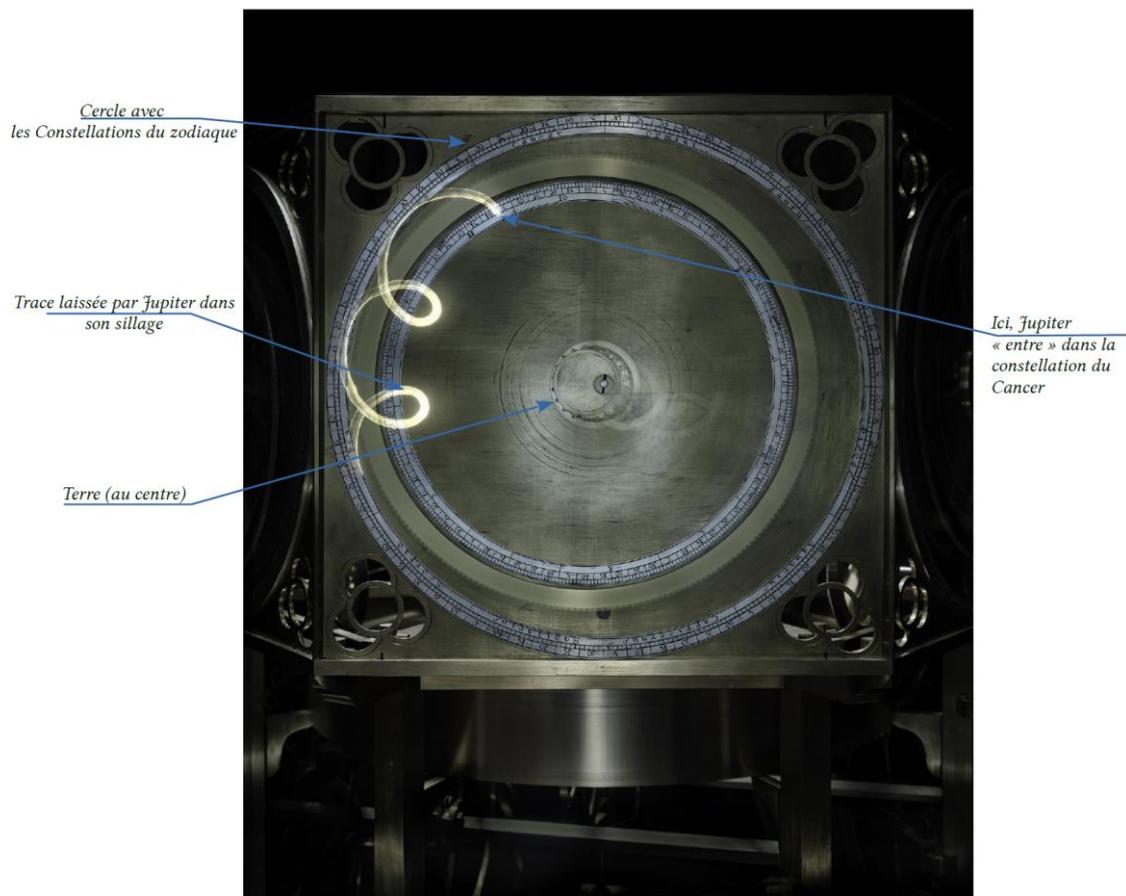
Cadran de la planète Jupiter, Astrarium Dondi, Musée international d'horlogerie, La Chaux de Fonds (Suisse)  
© Photographie M. Savanyu, MIH

A l'époque de Giovanni Dondi, la vision commune de l'organisation du système solaire est bien différente de celle d'aujourd'hui. En effet, les savants de l'époque considèrent **la terre immobile au centre du monde**. C'est ce qu'on appelle le **géocentrisme**. Les astres planétaires observés depuis la terre sont mobiles et décrivent, sur le fond du ciel étoilé, de curieuses trajectoires. Dondi s'est attaché, en suivant les préceptes de son illustre ancêtre Ptolémée (II<sup>ème</sup> siècle après J.-C.), à concevoir un mécanisme reproduisant les étranges arabesques des planètes...

Sur l'Astrarium, chaque astre est représenté par un petit disque muni du symbole de la planète. Afin de pouvoir visualiser les trajectoires qui se dessinent progressivement sur des mois, voire des années, le photographe **Raphaël Dallaporta** a mis en place un dispositif particulier. Il a fixé de petites lampes LED sur chaque disque représentant une Planète.

Puis le photographe a utilisé une technique appelée « **light painting** ». Peindre avec de la lumière... L'appareil photographique est mis en marche sur une pose longue (plusieurs minutes ou heures...), ce qui permet de suivre le trajet des planètes sur le cadran de l'Astrarium. Les planètes sont entraînées par le mécanisme de l'horloge. Elles laissent derrière elles une trace lumineuse que l'appareil photographique enregistre. Cette technique permet de mettre en évidence l'invisible. C'est à dire, ce que vous ne verriez pas en vous rendant au MIH. Ou alors, il vous faudrait bien de la patience... Le « **light painting** » permet de rendre visible sur la photographie le trajet apparent des planètes dans le ciel pour un observateur terrien. Et c'est alors que nous voyons se dessiner des courbes formant des boucles bien mystérieuses...

Le cadran ci-dessous reproduit le mouvement apparent de la planète Jupiter, vu depuis la Terre, sur le fond du ciel. L'Astrarium de Dondi permet de connaître la position de Jupiter...



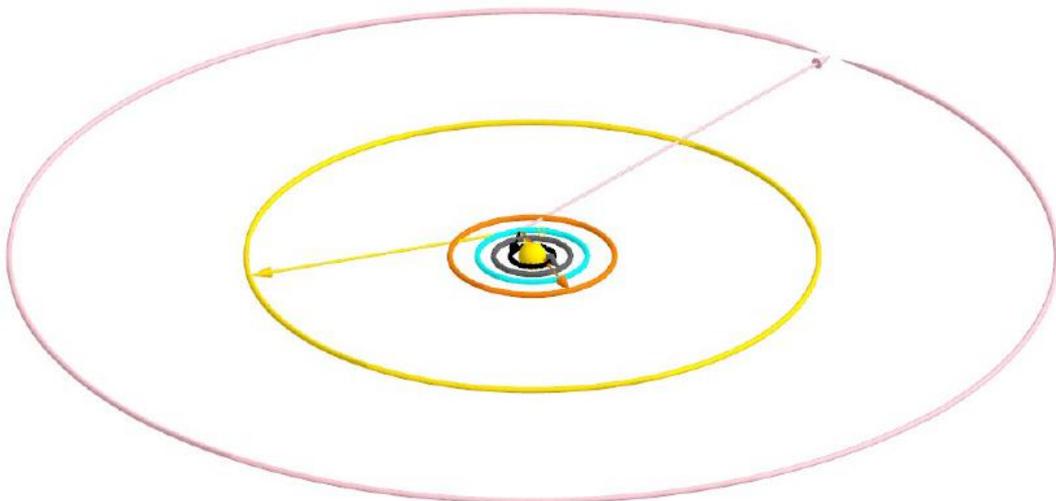
Trajectoire de Jupiter, Astrarium Dondi, Musée international d'horlogerie, La Chaux de Fonds (Suisse) © Photographie Raphaël Dallaporta

Sur le cadran de l'Astrarium, Jupiter, met près de **trente ans**, pour faire le tour complet du cadran représentant le tour du ciel... Nous remarquons que la trajectoire apparente de Jupiter forme des « **boucles** » qui apparaissent dans le ciel tous 400 jours environ...

Soulignons l'extrême rigueur et pugnacité dont ont fait preuve les astronomes depuis l'antiquité. Ils ont en effet observé et consigné dans des tables les positions des planètes, transmises de générations en générations jusqu'à aujourd'hui... Ces données accumulées au fil du temps ont permis de comprendre peu à peu la structure de l'univers... Essayons donc maintenant d'éclaircir le mystère de ces courbes...

## Géocentrisme et Héliocentrisme, visions du monde

Le système solaire est formé du Soleil, des planètes, astéroïdes, comètes... Depuis **Copernic** (1473-1543), **Galilée** (1564-1642) et **Kepler** (1571-1630), nous percevons le système solaire dans une optique **héliocentrique**. Nous imaginons le **Soleil au centre, immobile**, les planètes décrivant autour de l'astre central des orbites quasi-circulaires dans un même plan appelé **écliptique**. C'est la vision d'un observateur qui serait assis sur le rebord du monde et qui le contemplerait en se plaçant à l'extérieur et au-dessus du système solaire.



Système solaire, les cercles représentent les trajectoires des planètes Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel GeoGebra

Cette vision qui nous semble naturelle, ne s'est imposée que tardivement. En effet, il est difficile d'admettre à l'époque de Giovanni Dondi, au Moyen-Âge, que nous vivons sur un bolide sphérique, la Terre, se déplaçant à près de 100 000km/h, sans ressentir aucunement les trépidations de ce véhicule spatial !

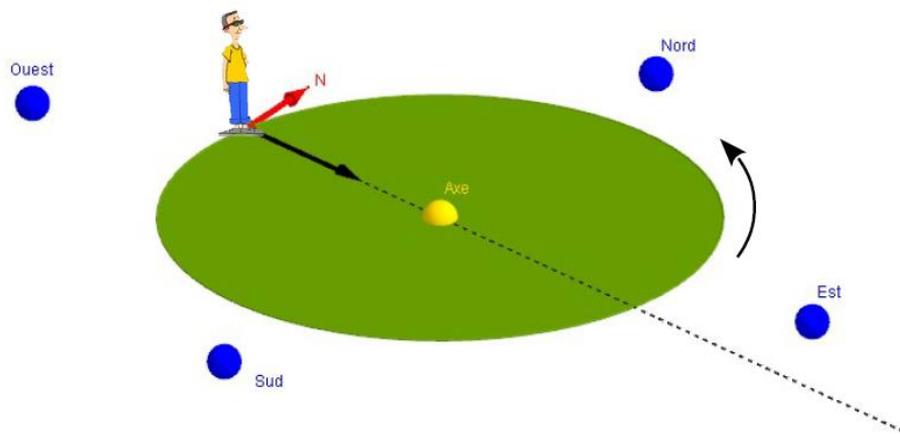
Pendant longtemps et jusqu'au XVI<sup>ème</sup> siècle, les hommes ont donc posé la Terre, immobile, au centre du monde. Autour d'eux, les astres se déplacent en décrivant des arabesques plus ou moins complexes. Une volonté habita alors les observateurs de l'antiquité pour « **mathématiser** » les trajectoires des planètes. C'est ainsi que fut inventée **la théorie des épicycles** mise en œuvre par Dondi dans l'Astrarium, horloge cosmique géocentrique.

Depuis Galilée, puis ensuite avec Newton, nous avons compris que la vision du monde dépend de la situation de l'observateur. Les physiciens appellent **référentiel**, l'observateur qui voit et décrit le monde. Nous avons tous vécu cette étrange impression quand nous sommes dans un train à l'arrêt dans une gare. A côté de notre train, se trouve un second train, immobile également. Soudain, le train voisin nous semble se mettre en marche et pendant un court instant, une hésitation nous saisit... Et puis, le doute s'évanouit, c'est le train dans lequel nous sommes qui démarre... *Car le quai et les amis que nous venons de quitter s'éloignent de nous.* En revanche, un voyageur en attente sur le quai, n'a pas vécu la même histoire. Pour lui, *c'est le train qui s'éloigne, sans aucun doute, du quai de la gare et non l'inverse !* Newton a établi que **les mouvements des corps ne sont pas absolus, mais relatifs** à un observateur ou à un référentiel.

## Le Soleil se balade... Visions du ciel depuis la Terre

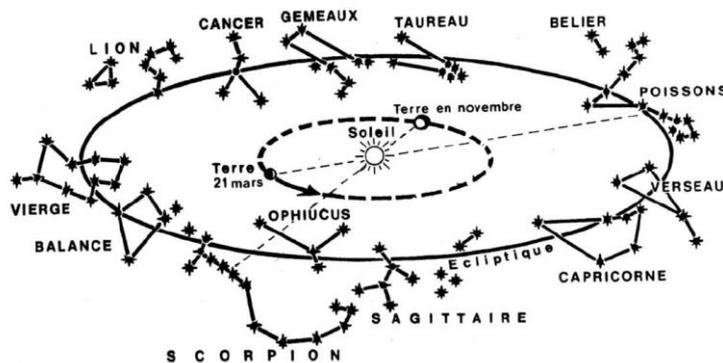
Essayons d'abord de comprendre la vision d'un observateur placé sur un manège circulaire en rotation. Le manège tourne et l'observateur regarde l'axe central du manège. Plaçons au centre de ce manège une boule jaune. Ajoutons sur le schéma les points cardinaux : Sud, Nord, Ouest et Est.

En tournant autour de l'axe sur le manège, l'observateur perçoit un **mouvement apparent** de la boule jaune. En effet, l'observateur voit successivement la boule jaune dans la direction de l'Est, du Nord, puis de l'Ouest, et enfin du Sud. Du point de vue de l'observateur, la boule jaune suit une trajectoire circulaire, dont l'observateur lui-même est le centre.



Manège © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel GeoGebra

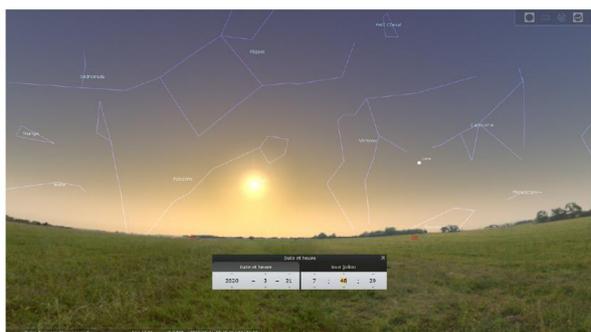
Disons maintenant, que ce manège représente le système solaire : l'observateur représente la Terre, la boule jaune figure le Soleil... Alors nous comprenons qu'un observateur terrien, attentif et patient, peut également constater que le Soleil semble se déplacer autour de la terre dans un mouvement circulaire d'une durée d'une année. Pour un terrien, qui se sent immobile, la trajectoire apparente du Soleil est un cercle centré sur la Terre. Le Soleil décrit en un an, une trajectoire apparente au milieu des étoiles. Plus précisément, il traverse les constellations bien connues du Zodiaque. En revanche, pour un observateur placé au-dessus du système solaire, le Soleil est immobile et la Terre décrit un cercle en 365 jours ! On peut « facilement » passer d'une représentation à l'autre. Il n'y a pas de contradiction ! Les mouvements sont relatifs !



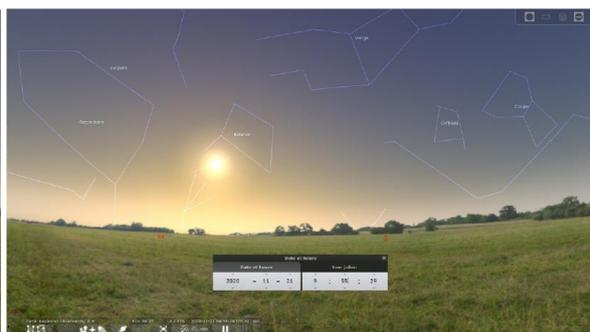
Le 21 mars, un Terrien observe le Soleil dans la direction de la constellation des Poissons. En novembre, ce même Terrien voit le Soleil dans la direction de la constellation du Scorpion.

### Mouvement apparent du soleil

Pour déterminer la constellation dans laquelle le soleil se situe, il faut procéder de la façon suivante. Le matin, il suffit d'observer à l'Est la dernière constellation étoilée que l'on voit avant le lever du Soleil. Nous savons alors que le Soleil est dans la constellation suivante... On peut également procéder le soir, en regardant cette fois à l'Ouest, la première constellation qui apparaît après le coucher du Soleil...



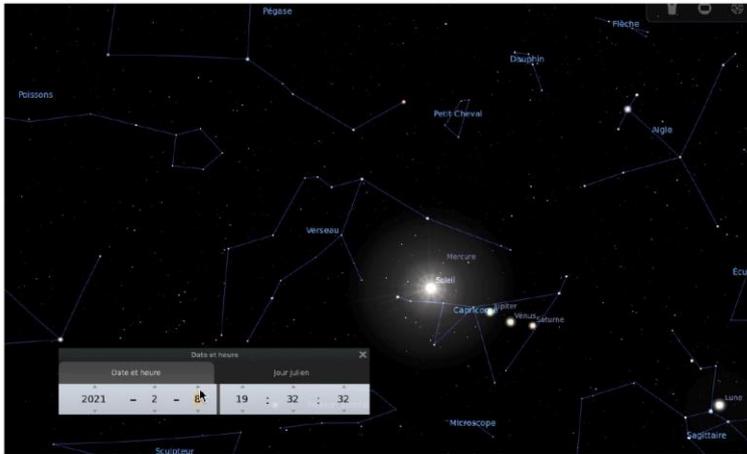
21 mars au matin, Soleil dans les Poissons



21 novembre au matin, Soleil entre Balance et Scorpion

Le Soleil dans constellations Poissons & Balance © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel Stellarium

La vidéo suivante montre une simulation du ciel vue par un passager de la Station Spatiale Internationale (ISS) pendant un an. Pour les astronautes, qui sont au-dessus de l'atmosphère terrestre, le ciel est toujours noir donc ils voient un ciel étoilé en permanence. Les passagers de l'ISS, constaterons, jour après jour, le lent déplacement du soleil dans les constellations du Zodiaque.



8 février 2021 : Le Soleil au milieu des étoiles suivi par son cortège de planètes

Soleil et planètes © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel Stellarium. Animation à voir sur [www.mdt.besancon.com](http://www.mdt.besancon.com).

## Mars se balade... Visions du ciel depuis la Terre

En observant le ciel chaque nuit depuis la Terre et à la même heure, nous voyons la planète Mars se déplacer au milieu des étoiles qui forment une sorte de quadrillage fixe sur le fond du ciel. La simulation ci-dessous montre le déplacement de Mars entre le mois de mai 2020 et le mois de février 2021. La planète traverse d'abord la constellation du Sagittaire, puis exécute une boucle, une valse hésitation dans la constellation des Poissons.



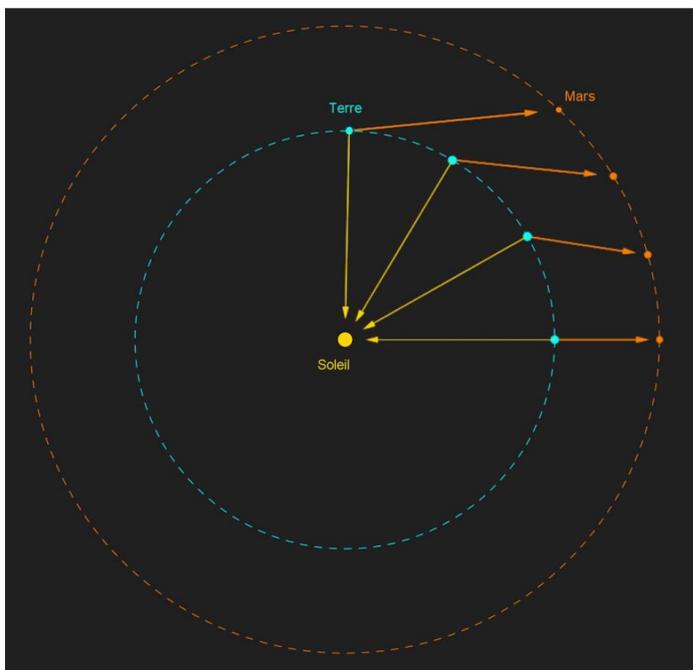
18 septembre 2020 à 23h48min et 16s : Mars dans la constellation des Poissons

Mars © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel Stellarium. Animation à voir sur [www.mdt.besancon.com](http://www.mdt.besancon.com).

Le schéma ci-dessous montre la révolution de la Terre et de Mars autour du Soleil. Le Soleil, représenté par un point jaune est au centre, il s'agit donc d'une vision héliocentrique. La Terre est représentée par un point bleu et Mars par un point orange. L'avancement de la Terre et de Mars est représenté à quatre dates différentes séparées d'un mois. Rappelons que la Terre effectue une révolution complète en 365 jours. Alors que Mars accomplit le tour complet en 687 jours.

**Les flèches jaunes pointent depuis la Terre vers le Soleil. Les flèches oranges pointent depuis la Terre vers Mars. Ces flèches indiquent donc respectivement les directions du soleil et de mars vues depuis la terre** à quatre instants différents. Sur la première position Mars et le Soleil sont à l'opposé l'une de l'autre. Au contraire, pour la dernière position, les directions de Mars et du Soleil forme un angle de  $90^\circ$  environ.

Nous observons donc que les directions indiquées par les flèches changent. **C'est pour cette raison, que nous voyons le Soleil et les planètes, Mars en particulier, se déplacer dans le ciel au milieu des étoiles...**

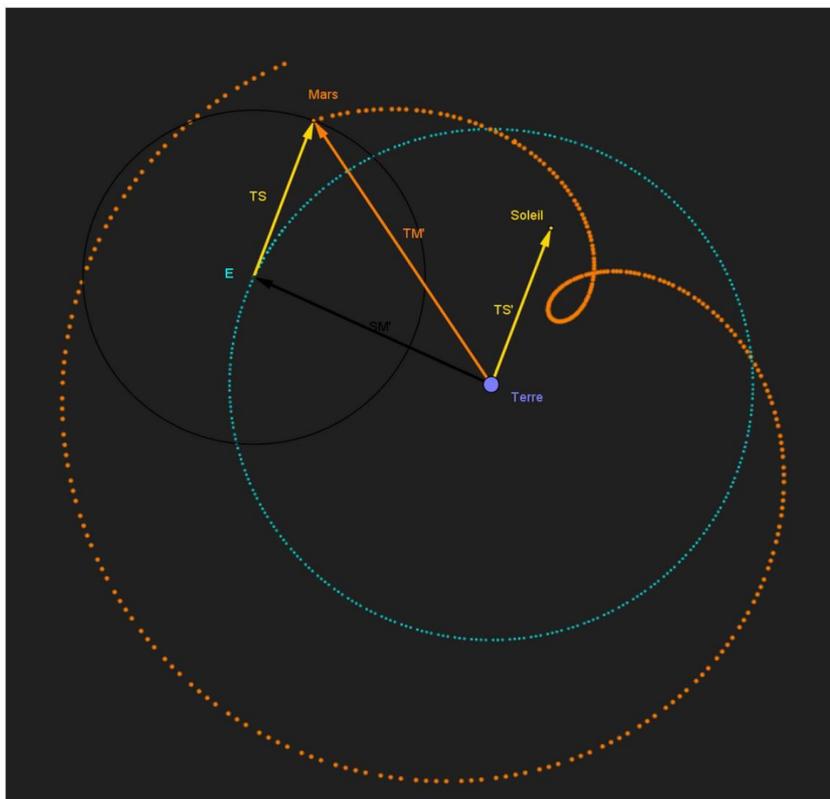


La Terre et Mars autour du Soleil © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel GeoGebra

## Les épicycles

Vue depuis la terre, la planète Mars « semble » faire un bref demi-tour... Ce phénomène apparent est appelé **rétrogradation**. Ce curieux comportement de la planète Mars dans le ciel est bien difficile à expliquer quand on considère la terre immobile au centre du cosmos... Alors les « anciens », **Hipparque** (Astronome, géographe et mathématicien grec, v.190 – v.120 av J.-C.) en premier puis **Ptolémée**, ont imaginé un système bien original à base **d'épicycles**...

Selon cette théorie, la **planète Mars parcourt un petit cercle appelé épicycle (en noir sur le schéma). Le centre de l'épicycle E parcourt un grand cercle, le déferent (en bleu cyan), centré sur la terre.** Avec ce système « étrange » à priori, on peut construire des trajectoires particulièrement complexes ! Vous avez bien noté, que dans ce système, la Terre est au centre. Il s'agit donc d'une représentation géocentrique...



Etrange danse de Mars dans le ciel au milieu des étoiles. Un pas en avant, un pas en arrière, une valse hésitation...

Epicycles © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel GeoGebra

Dondi a construit une mécanique qui reproduit à l'aide d'engrenages ce mouvement apparent dans le système géocentrique.

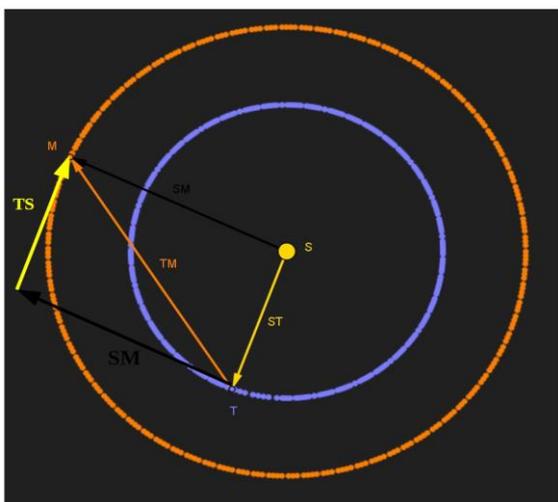


- Planète Mars avec son symbole
- Point E
- Cercle épicycle
- Terre (au centre)
- Cercle déferent

Cadran Mars, Astrarium Dondi, Musée international d'horlogerie, La Chaux de Fonds (Suisse) © D'après photographie Raphaël Dallaporta

Justifions maintenant ce système à la lumière de nos connaissances actuelles...

Revenons d'abord à la représentation héliocentrique. Appelons  $\vec{ST}$  le vecteur (ou flèche) ayant pour origine S (le Soleil) et pour extrémité T (la Terre). La flèche  $\vec{SM}$  a pour origine S et pour extrémité M (Mars). **Ces deux vecteurs tournent.** Le vecteur  $\vec{ST}$  effectue un tour complet en **365 jours**. C'est le temps qu'il faut à la Terre pour effectuer une révolution complète autour du soleil. Le vecteur  $\vec{SM}$  tourne un peu plus lentement en **687 jours**, durée de la révolution de Mars autour du Soleil.

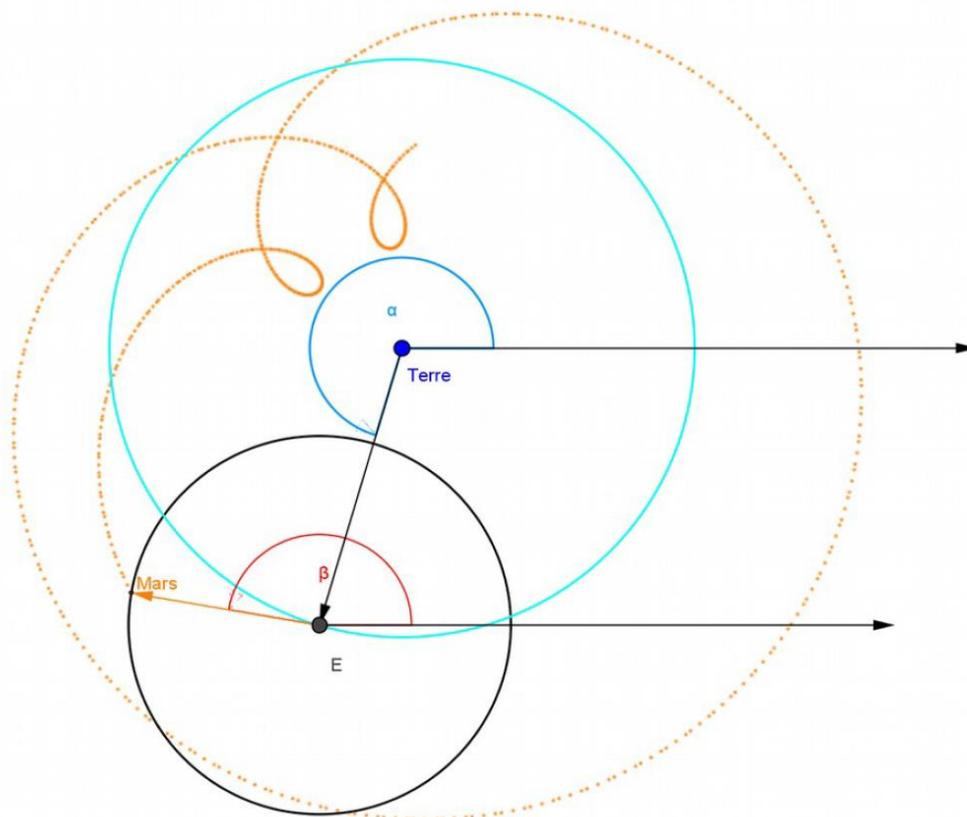


Modèle héliocentrique © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel GeoGebra

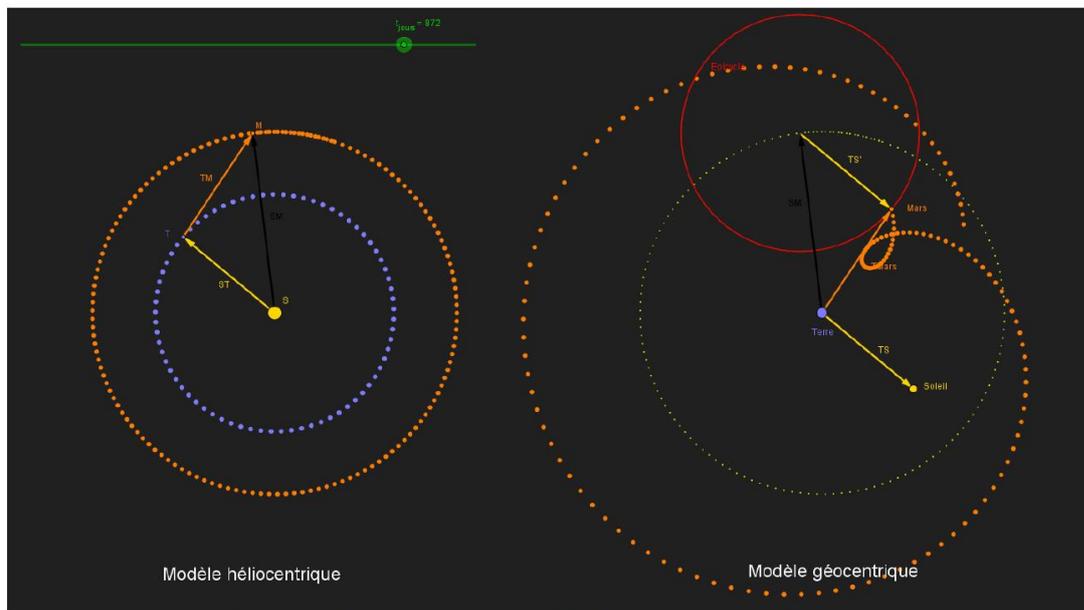
Considérons maintenant le vecteur  $\overrightarrow{TM}$  qui pointe depuis la Terre en direction de Mars. Nous voyons que ce vecteur est égal à :  $\overrightarrow{TM} = \overrightarrow{SM} - \overrightarrow{ST}$ . En effet, depuis la Terre, il suffit de suivre le vecteur  $\overrightarrow{SM}$  puis de se déplacer ensuite dans le sens opposé du vecteur  $\overrightarrow{ST}$  (c'est à dire dans le sens du vecteur  $\overrightarrow{TS}$ ) pour aboutir sur Mars.

Donc la planète **Mars** (extrémité du vecteur  $\overrightarrow{TM}$ ), parcourt un cercle de rayon  $R_2 = TS$ , dont le **centre E** parcourt un grand cercle (bleu cyan) de rayon  $R_1 = SM$ ... Le premier cercle en noir, est un **épicycle**...

Le cercle bleu centré sur la terre est appelé **déférent**. Ce cercle « porte » le point E qui effectue un mouvement uniforme. Le cercle noir est appelé **épicycle**. Ce cercle de centre E « porte » la planète Mars qui tourne selon un mouvement uniforme sur ce cercle. Le mouvement circulaire uniforme de Mars autour du soleil dans la vision héliocentrique a été remplacé pour une **composition de mouvements circulaires et uniformes** (déférént + épicycle) dans la vision géocentrique du Moyen-Âge. La trace orange représente la trajectoire apparente de Mars vue depuis la terre. Cette trajectoire forme des boucles. Mars semble revenir sur ses pas : ce phénomène est appelé **rétrogradation**.



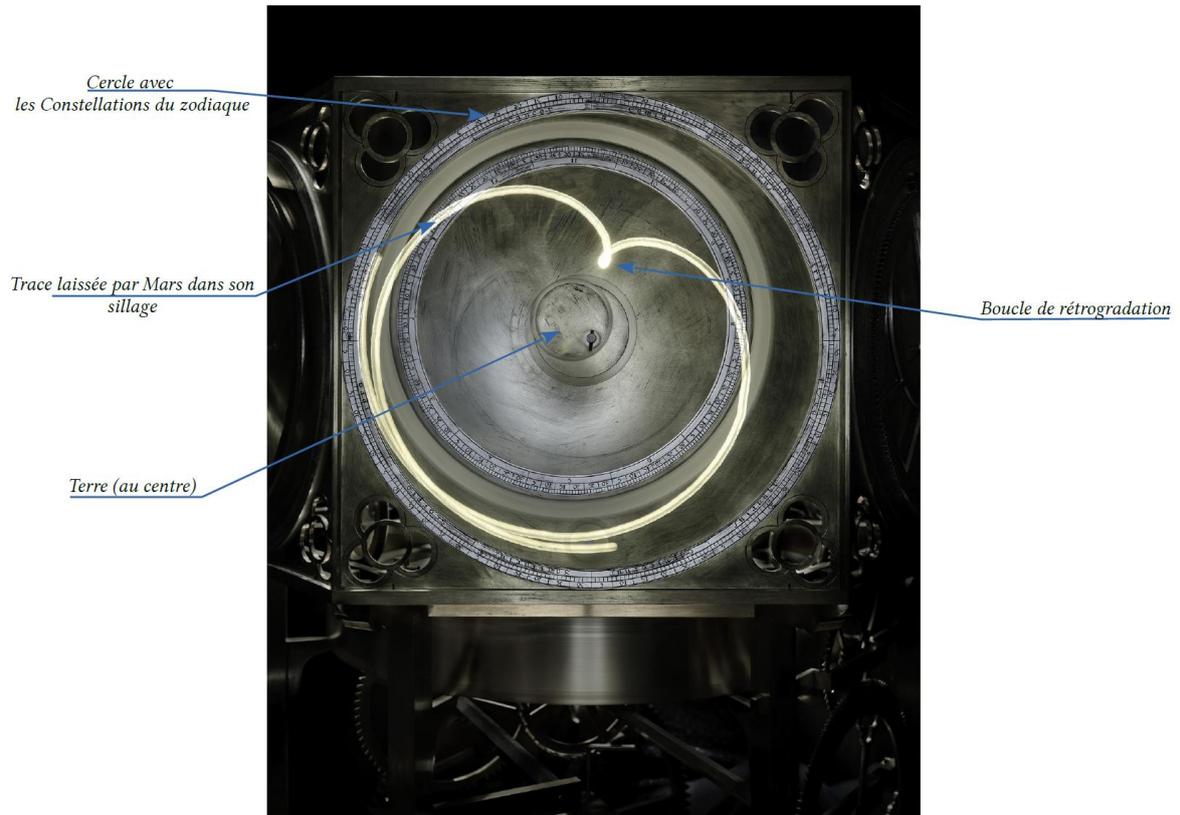
Sur l'animation suivante, vous pourrez suivre simultanément, les trajectoires des astres dans une vision héliocentrique (à gauche) puis dans une vision géocentrique (à droite).



*Animation : Comparaison des modèles héliocentrique et géocentrique*

Animation GeoGebra, Comparaison des modèles héliocentrique et géocentrique © visuel de Stéphane Verjux, avec le logiciel GeoGebra. Animation à voir sur [www.mdt.besancon](http://www.mdt.besancon).

Le cadran ci-dessous reproduit le mouvement apparent de la planète Mars vu depuis la Terre sur le fond du ciel. L'Astrarium de Dondi permet de connaître la position de Mars...



*Astrarium de Dondi – Trajectoire de Mars - R. Dallaporta*

Trajectoire de Mars, Astrarium Dondi, Musée international d'horlogerie, La Chaux de Fonds (Suisse) © Photographie Raphaël Dallaporta

Sur le cadran de l'Astrarium, Mars, met **687 jours**, pour faire le tour complet du cadran représentant le tour du ciel... Nous remarquons que la trajectoire apparente de Mars forme des « **boucles de rétrogradation** » qui apparaissent dans le ciel tous **780 jours** environ...

## Les origines du système de Ptolémée

Comment Ptolémée, Hipparque ont-ils pu imaginer ce système ? **Jean-Pierre Verdet** dans le film d'**Yves TERRENOIRE** « **Entre terre et ciel** » nous propose une réponse...

« ... Dondi veut vraiment matérialiser l'astronomie de Ptolémée qui est une astronomie géométrique. Le grand apport des grecs est d'avoir construit des modèles. A l'époque, on est persuadé, ce qu'on peut comprendre, que la Terre est rigoureusement immobile au centre du monde. La Terre ne tourne pas sur elle-même, elle ne tourne pas autour du Soleil. Donc on croit que c'est le ciel qui tourne autour de la Terre. Ce qui frappe en premier, c'est ce qu'on appelle le mouvement quotidien. C'est de voir les étoiles, les planètes, le Soleil, la Lune se lever à l'est, monter dans le ciel, culminer au méridien Sud et puis redescendre et se coucher à l'Ouest. Sur ce quadrillage idéal fixe, formé par les étoiles, on voit des points lumineux qui eux se promènent. D'où le nom de **planète** qui signifie **astre errant ou vagabond**. »

« **Pour les anciens, les mouvements célestes et la sphère sont parfaits.** Le corps géométrique parfait, c'est la sphère ou le cercle dans un plan. **Donc les mouvements planétaires sont astreints à être circulaires et uniformes.** Mais on s'aperçoit rapidement, qu'une planète comme Mars change terriblement de brillance, d'éclat ou de luminosité au cours du temps. Donc, soit Mars change de brillance soit la distance entre Mars et la Terre change. Mais comme au-delà de l'orbe lunaire rien ne bouge, Mars ne peut pas changer de luminosité donc Mars change de distance. Cela pose donc un problème non pas physique mais géométrique. Alors on va dire que les astres ne se meuvent pas d'un mouvement circulaire et uniforme. **Mais les astres se meuvent d'une combinaison de mouvements circulaires et uniformes.** Pour Mars, on invente ce qu'on appelle le système du **déférent** et de **l'épicycle**. Le déférent vient de **déférence** qui veut dire **portant**, porteur. Donc il y a un grand cercle porteur, qui est ce qu'était auparavant la sphère porteuse de Mars. Sur la circonférence de ce cercle qui va tourner uniformément autour du centre du monde donc autour de la Terre. Sur la circonférence de ce cercle, le déférent, on va mettre un point qui sera le centre d'un deuxième cercle beaucoup plus petit qu'on appelle l'épicycle. La planète va être fixée sur la circonférence de l'épicycle. Donc le centre de l'épicycle va se déplacer d'un mouvement circulaire et uniforme sur le déférent et la planète va tourner sur la circonférence de l'épicycle d'un mouvement circulaire et uniforme autour du centre de l'épicycle. Donc, on va remplacer le mouvement circulaire uniforme par une combinaison. On voit que l'épicycle de Mars remplace le trajet de la Terre autour du Soleil... Après on raffine encore le modèle avec des excentriques, avec des épicycles d'épicycles... **La fonction principale du système de cercles empilés les uns sur les autres est effectivement pour simuler le mouvement apparemment vagabond des planètes alors que ce vagabondage est lié au fait que la terre elle-même bouge par rapport aux planètes.** Donc cela veut dire que le système à épicycles a pour fonction principale de compenser le mouvement de la terre puisqu'on croit qu'elle est fixe. Mais il y a un deuxième problème qu'on ne connaîtra qu'à partir de Kepler, c'est qu'en réalité les planètes ne se déplacent pas sur des cercles mais sur des ellipses. Donc il y a des petites corrections qui n'ont plus rien à voir avec le mouvement de la terre autour du soleil mais au fait qu'il faut passer du cercle à l'ellipse... ».

## Sources et références

- Notice Astrarium de Dondi, Musée International de l'Horlogerie, La Chaux-de-Fonds, Suisse
- Entre Terre et Ciel, Yves Terrenoire, Les films du chêne et l'observatoire de Paris, 2010
- Figures réalisées avec GeoGebra, Stéphane Verjux
- Séquences animations réalisées avec Stellarium, Stéphane Verjux