



# À LA MESURE DU TEMPS

**L**a mesure du temps a toujours été une préoccupation des hommes depuis qu'ils ont pris conscience de son écoulement. Cette mesure a très vite permis d'organiser la société. Pour cela, les hommes ont créé des dispositifs de plus en plus ingénieux pour mesurer le temps à l'aide de phénomènes physiques bien choisis. Les liens entre la mesure du temps et l'astronomie sont d'ailleurs des plus anciens. C'est pour cette raison que la mesure du temps et la mesure de l'espace ont souvent été regroupées dans les observatoires astronomiques. Et cette intrication de l'espace et du temps est encore plus prégnante dans le cadre de la théorie de la relativité d'Einstein.

# TEMPS MESURÉS, TEMPS DÉMESURÉS – I

---

**L**e *xiv<sup>e</sup>* siècle marque un tournant dans la mesure du temps. On passe d'une mesure continue du temps (marche du Soleil, écoulement de l'eau) à une mesure discontinue obtenue par des dispositifs mécaniques divers. La mesure du temps prend alors son essor technologique. Elle commence à entrer dans le domaine de la physique tout en restant intimement liée à l'astronomie. Plus tard, au *xx<sup>e</sup>* siècle, on passera de ces dispositifs mécaniques à des dispositifs encore plus complexes mettant en jeu la structure même de la matière (atomes). La démesure de la précision obtenue sera telle que les horloges du début du *xxi<sup>e</sup>* siècle seront capables de garder le temps à quelques secondes près pendant l'âge de l'Univers. La mesure du temps, d'astronomique, entre totalement dans le domaine de la physique.

*C'est cette nouvelle approche de la mesure du temps, essentiellement occidentale, qu'on se propose de décrire ici, de façon forcément succincte. Bien sûr, la transition s'est effectuée lentement et les aspects sociétaux sont toujours présents (organisation de la vie religieuse...). Mais les progrès technologiques et les concepts théoriques sous-jacents sont tels que les scientifiques, comme à chaque fois qu'ils se posent des questions, ont dû résoudre moult problèmes spécifiques, leur permettant concomitamment de progresser dans de nombreuses disciplines parfois connexes (par exemple la gravimétrie). Cette mesure du temps d'une extrême précision a permis des avancées dans des domaines comme l'astrophysique, la géodésie, mais aussi parfois dans des domaines inattendus comme les transactions financières. Cette extrême précision sera également à l'origine de nouvelles disciplines comme la chronogéodésie, nous aurons l'occasion d'y revenir.*

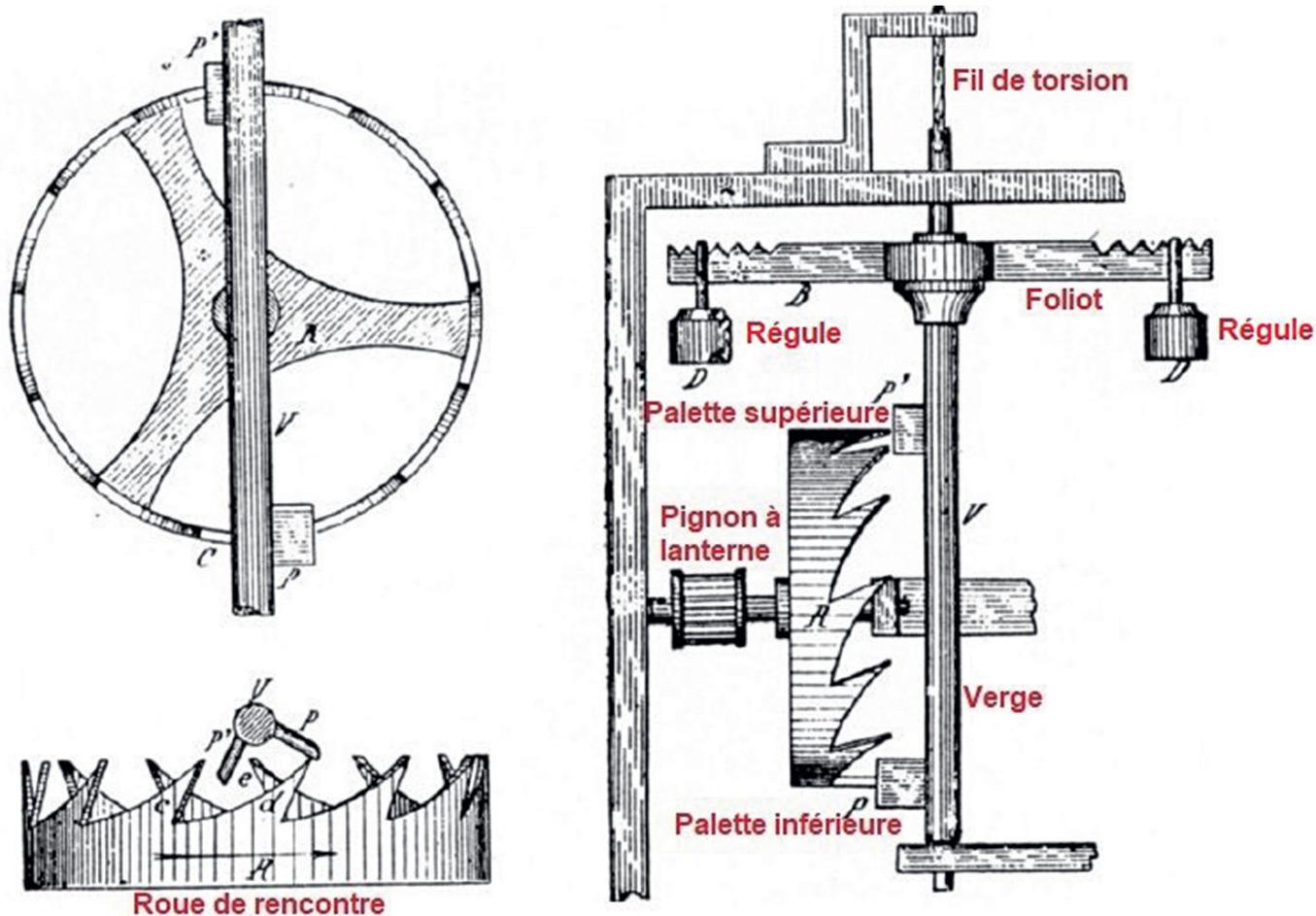
*Depuis les Grecs, les philosophes ont toujours réfléchi à la nature du temps. Dans ce domaine, les progrès scientifiques réalisés ont continué de leur apporter matière à réflexion. L'évolution des idées concernant la nature du temps sort du cadre réduit des épisodes proposés dans cette lettre d'information. Quelques éléments bibliographiques seront néanmoins fournis ultérieurement dans un épisode dédié afin de guider le lecteur intéressé.*

## Les premières horloges astronomiques mécaniques

Les débuts de l'horlogerie en Europe (au sens où nous l'entendons actuellement) remontent au début du XIV<sup>e</sup> siècle. C'est en effet à cette époque que le dispositif à foliot, verge et roue de rencontre sera mis en place couramment dans les horloges mécaniques. Un commentaire de Robertus Anglicus sur la Sphère de Sacrobosco (1271) montre en effet que ce dispositif était inconnu au XIII<sup>e</sup> siècle. Bien que très populaire jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle (la quatrième horloge H4 de Harrison, qui remporta le prix des Longitudes en 1760, était à roue de rencontre), ce dispositif sera remplacé à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle par

le pendule régulateur (1657) et le spiral réglant (1675) dus à Huygens, nous y reviendrons.

Ce dispositif est constitué d'un moteur (une masse subissant la gravité terrestre), d'un oscillateur (le foliot, terme semblant provenir de fol, « fou », à cause de son mouvement de va-et-vient qui sera détaillé plus loin), d'un fil de torsion et d'un échappement (la roue de rencontre). C'est un système efficace, très robuste, mais sa précision est relativement faible, de l'ordre de 15-20 minutes par jour. Par comparaison, le pendule de Huygens permettra une précision de l'ordre de la dizaine de secondes en 24 heures.



### Échappement à foliot.

Le train d'engrenages et la masse pesante ne sont pas représentés.

Voir aussi <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/SMIL-ENS-Lyon-Real.xml>.

Domaine public (légendes LTE)

Le principe de fonctionnement est très simple. Une masse subissant la gravité met en tension (via une corde enroulée autour d'un axe) un train d'engrenages relié à l'échappement par un pignon à lanterne. Si la roue de rencontre n'existait pas, la masse tomberait instantanément sous l'effet de la gravité (entraînant le train d'engrenage à très grande vitesse). Le rôle de la roue de rencontre est donc de bloquer cette chute libre par l'intermédiaire d'une des palettes. Mais le foliot et la verge oscillent autour d'un axe vertical passant par cette dernière. Cette oscillation est due au fil de torsion qui a tendance à revenir dans sa position d'équilibre (et le système auquel il est lié avec lui). La fréquence de cette oscillation est réglable via la distance des deux régules à l'axe vertical (penser à la patineuse qui rapproche ou écarte ses bras pour tourner plus ou moins vite sur elle-même). Donc, lorsque le foliot oscille autour de l'axe vertical, les palettes supérieure et inférieure bloquent puis libèrent alternativement la roue de rencontre. Lorsque, pendant un très court moment, la roue de rencontre n'est pas bloquée, elle laisse s'échapper l'énergie de la pesanteur (la masse tombe). D'où le nom d'échappement. Une aiguille, indiquant l'heure sur un cadran, est solidaire d'une des roues du train d'engrenages. La seconde aiguille indiquant les minutes est inutile étant donné la faible précision de ce dispositif.

Les deux plus célèbres horloges astronomiques mécaniques équipées de l'échappement à foliot datant du XIV<sup>e</sup> siècle sont sans nul doute l'horloge de Richard de Wallingford (1292-1336) et celle de Giovanni Dondi (1330-1388).

Celle de Richard de Wallingford, abbé de Saint-Albans (Angleterre), malheureusement disparue, est la plus ancienne des deux (1327). Une étude complète de cette dernière a été publiée par John North en 1976, étude à laquelle nous renvoyons le lecteur pour de plus amples informations.

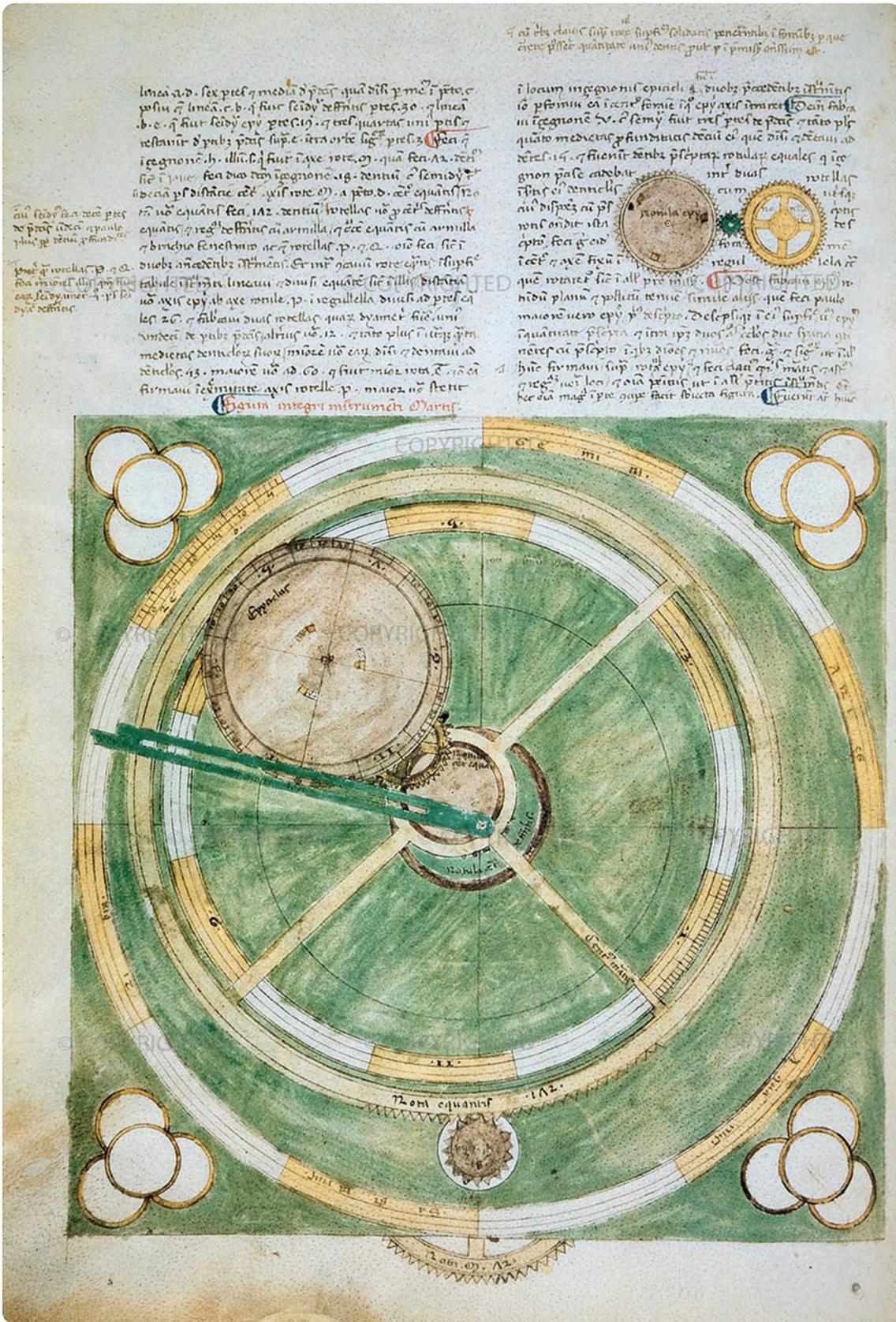
C'est entre 1365 et 1380 que Giovanni Dondi réalisa son célèbre « astrarium », dont une réplique fidèle (d'autres existaient) a été réalisée entre 1987 et 1989 à l'Observatoire de Paris (SYRTE). E. Poulle, paléographe, historien et directeur de l'École des chartes a transcrit et traduit le *Tractatus astrarii* de Giovanni Dondi (retrouvé dans un monastère à Padoue). J.-P. Verdet, A. Segonds (astronomes à l'Observatoire de Paris, SYRTE) et Y. Zéau (ingénieur) se sont appuyés sur ce travail pour réaliser la réplique.

L'astrarium est un objet mythique de l'horlogerie et de l'astronomie médiévale, parfois qualifié de « huitième merveille du monde », qui a malheureusement totalement disparu au début du XVI<sup>e</sup> siècle. Giovanni Dondi a donc mis seize ans pour construire sa machine dans un contexte politique difficile qui lui fit quitter Padoue pour Pavie.

G. Dondi indique dans son livre :

*« J'ai imaginé avec l'aide divine de réaliser un ouvrage où puissent être vus par l'œil tous les mouvements en longitude que les astronomes assignent aux planètes avec leurs cercles et leurs périodicités, où puissent être remarquées ces nombreuses particularités que les savants enseignent et que l'expérience montre, où l'on puisse même avoir à chaque instant, sans aucun calcul fastidieux, les positions de toutes les planètes. »*

L'idée de Dondi était de permettre de positionner le Soleil, la Lune et les planètes parmi les étoiles sans calcul, l'utilisation principale de l'astrarium étant astrologique. L'astrologie était en effet très importante au Moyen Âge, car elle permettait aux dirigeants de prendre des décisions. D'ailleurs, l'astrarium ne pouvait fonctionner qu'en longitude, ce qui interdisait son utilisation à une autre latitude que celle de Padoue.



Giovanni Dondi dell'Orologio (1330-1388), *Tractatus astrarii*  
(manuscrit décrivant la construction de l'astrarium).

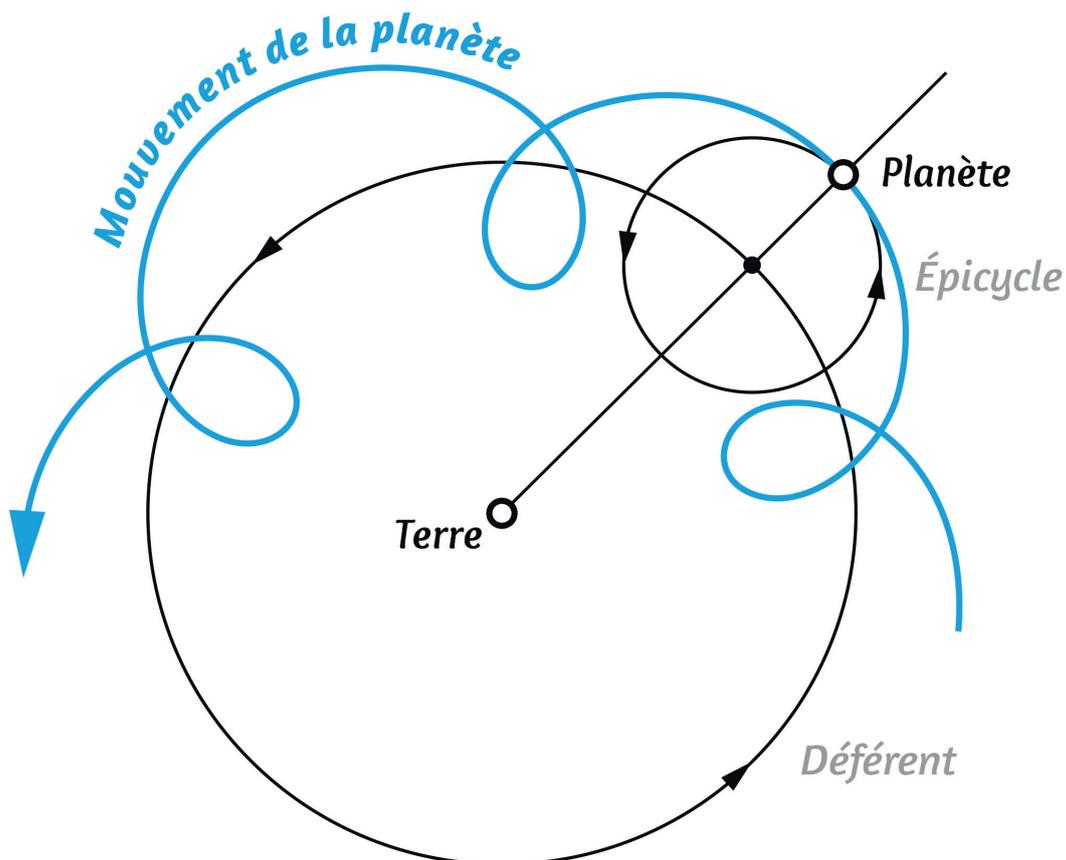
Page montrant le cadran de Vénus (Padoue, Bibliothèque capitulaire, Ms. D.39, 12v).

Domaine public

Dondi voulait matérialiser l'astronomie de Ptolémée qui est une astronomie géométrique. La Terre est immobile au centre du monde et le ciel tourne à la surface d'une sphère centrée sur elle. Les planètes décrivent des orbites circulaires à vitesse constante. Comme au-delà de la Lune, tout est immuable, la seule façon d'expliquer le changement d'éclat de Mars était de faire varier sa distance à la Terre. Ce paradoxe a été résolu en inventant les épicycles et les déférents. En combinant des mouvements circulaires uniformes, on pouvait expliquer la variation de distance de Mars et donc sa variation d'éclat, cela sans remettre en cause l'immuabilité et la perfection de l'Univers au-delà de la Lune. Ce système permet également d'expliquer la rétrogradation des planètes par rapport aux étoiles.

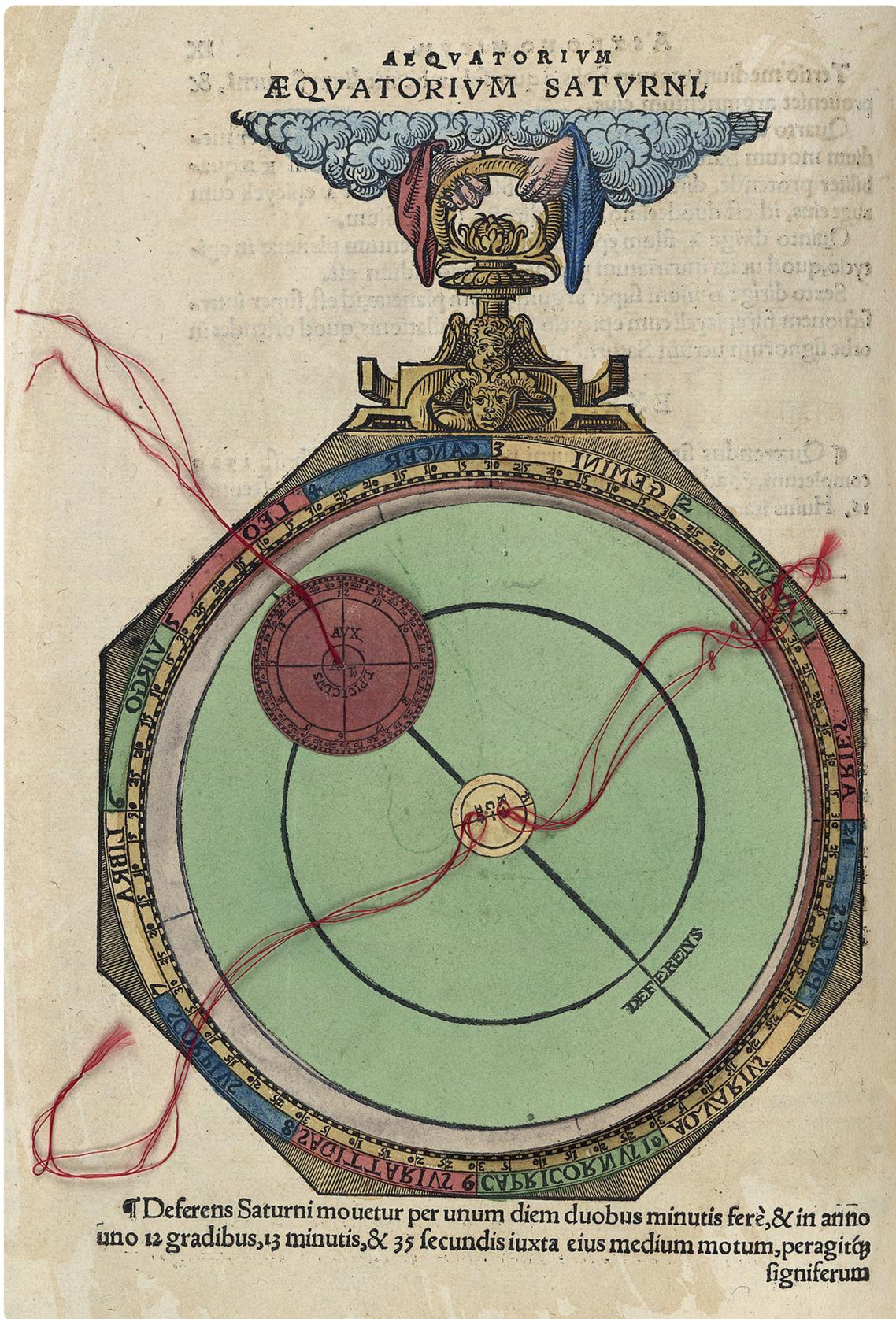
Toutes les pièces de l'astrarium, sans exception, sont dessinées sans être à l'échelle, ce qui a compliqué la compréhension de l'ouvrage, sans même parler de la taille des caractères, du vocabulaire « universitaire » et des abréviations utilisées.

L'idée géniale de Dondi est de s'être appuyé sur l'instrument de Campanus de Novare (1220-1296), décrit dans son traité sur la construction d'un « équatoire » (l'équatoire est un livre « animé », à l'image des cartes célestes tournantes d'aujourd'hui), en y ajoutant une « horloge centrale » faisant office de moteur.



**Épicycle et déférent.**

CC BY-SA 4.0 Y. Gominet/LTE

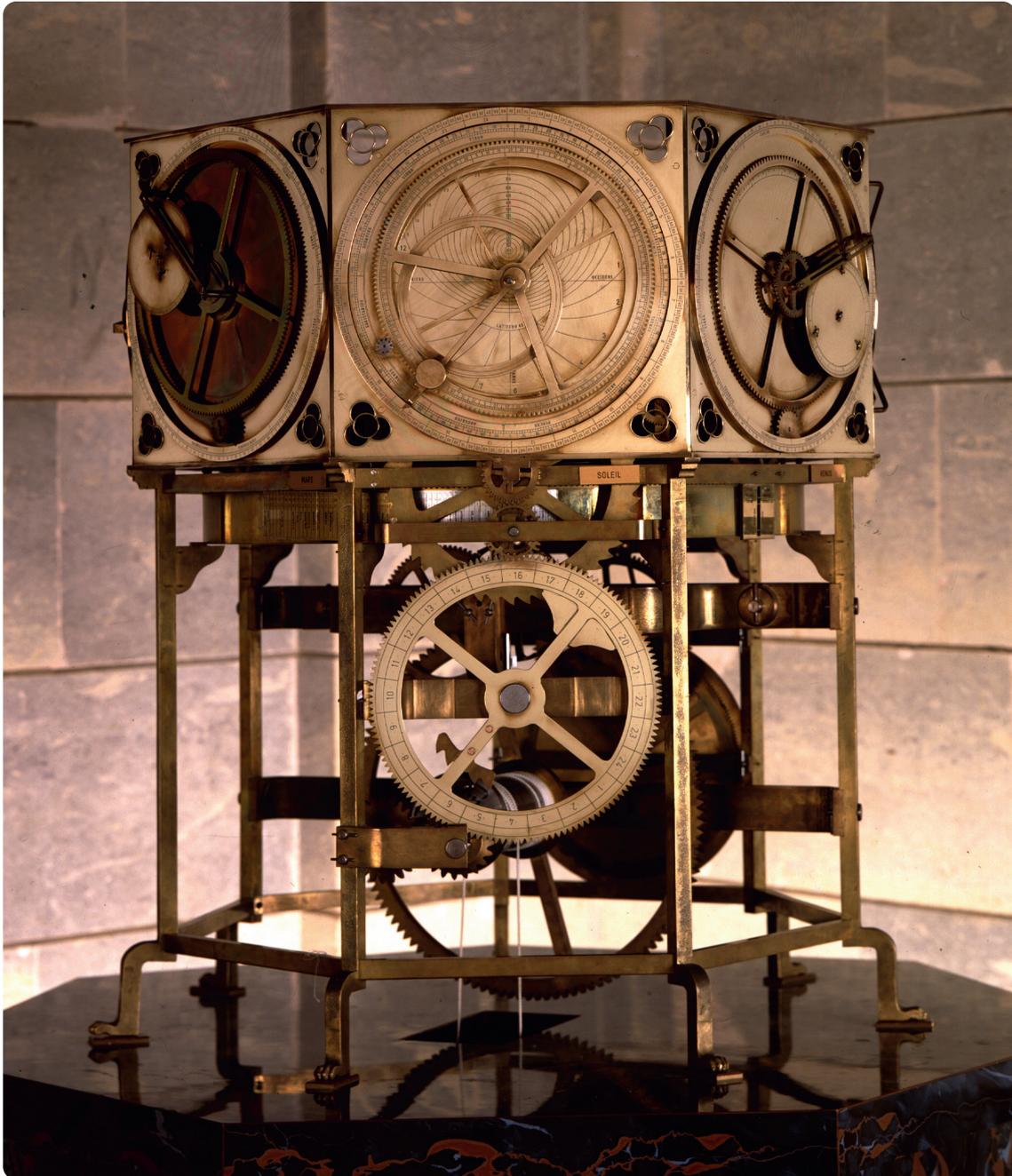


Équatoire de Saturne de Johann Schöner (1477-1547).

Domaine public

Même si d'autres horloges planétaires avaient existé avant l'astrarium (notamment en Chine), elles étaient hydrauliques. Celle de Dondi était donc la première horloge planétaire mécanique occidentale. Elle donnait les heures, indiquait le mouvement du Soleil et de la Lune, ainsi que celui des cinq planètes connues (de Mercure à Saturne).

L'astrarium a donc sept faces représentant ces mouvements, chacune de ces faces possédant des engrenages permettant de donner la position des objets célestes dans le ciel. Tous les engrenages sont circulaires sauf celui du mouvement de la Lune, eu égard à la complexité du mouvement à représenter.



**Reconstitution de l'astrarium de Dondi, réalisée de 1987 à 1989, par une équipe d'historiens, ingénieurs et chercheurs de l'Observatoire de Paris, sous l'égide d'Alain Segonds et de Jean-Pierre Verdet.**

Le cadran du bas indique l'heure, celui du haut le mouvement du Soleil, celui de gauche le mouvement de Mars et celui de droite le mouvement de Vénus. On distingue également la corde qui retient le poids moteur de l'horloge centrale.

*Crédits Bibliothèque de l'Observatoire de Paris*

Les sept trains d'engrenages (très sophistiqués) sont tous reliés à la « roue de l'année » (pièce exceptionnelle de fonderie d'art), elle-même mue par l'horloge centrale. Cette roue de l'année tourne d'un dent en quatre heures tous les jours à minuit. L'horloge devait être remontée toutes les deux heures, à défaut, il fallait démonter tout l'Astrarium afin de refaire les réglages des sept faces avant le redémarrage.

## Les horloges astronomiques médiévales en Europe

Les horloges monumentales sont bien recensées en Europe et sont de plusieurs types (voir par exemple <https://www.ens-lyon.fr/RELIE/Cadrans/Musee/Europe/Carte.htm> ainsi que la bibliographie) :

- Les horloges astrolabiques (une vingtaine) ;
- Les horloges à zodiaque fixe (une douzaine) ;

- Les horloges à zodiaque mobile (une demi-douzaine) ;
- Les horloges indiquant uniquement les phases de la Lune (une vingtaine de différents sous-types).

L'horloge de la cathédrale de Chartres est un exemple d'horloge astrolabique. Sa construction date très probablement de 1407, sans que l'on sache qui en est le concepteur. Un acte capitulaire décrit en effet une horloge indiquant, outre les heures, les signes du zodiaque, mais à un emplacement qui n'est pas connu de façon certaine. Cette horloge semble avoir été remaniée jusqu'en 1528. La complexité du mécanisme (nous reviendrons plus tard sur les mécanismes d'horlogerie, hors foliot) a fait que dès le milieu du xvii<sup>e</sup> siècle, il devint difficile de trouver un spécialiste pour en assurer l'entretien. Il fut totalement abandonné, puis partiellement détruit en 1793, le fer du mouvement de l'horloge étant employé pour forger des piques.



*L'horloge de la cathédrale de Chartres.*

*Crédits F. Taris*



*L'horloge de la cathédrale de Chartres.*

*Crédits F. Taris*

Le cadran mesure un mètre de diamètre et est constitué de quatre plaques portant chacune :

- un cadran horaire, fixe, indique les 24 heures (deux fois douze heures), ainsi que les demi-heures (marquées par des feuilles de trèfles). Une croix en fer forgée servait de support à l'axe d'une aiguille qui faisait le tour du cadran en 24 heures. Ces heures sont des heures équinoxiales ou égales, les heures inégales n'étant pas présentes à Chartres. Une fente est réalisée le long de cette aiguille permettant le coulissement d'un petit Soleil ;
- un cadran lunaire orné d'étoiles or sur fond bleu azur. Il est mobile et fait un tour en une journée lunaire ;
- un disque montrant les phases de la Lune. Ce disque est visible par un trou circulaire ménagé dans le cadran lunaire. Le masquage plus ou moins important du disque par le cadran lunaire reproduit les phases de la Lune ;

- un cadran zodiacal qui montre les douze signes du zodiaque. Il tournait d'environ un degré par jour. Le petit Soleil qui coulisse sur l'aiguille est à l'aplomb du signe du zodiaque dans lequel le Soleil se trouve réellement dans le ciel.

Une ligne en arc de cercle fixée sur le cadran horaire montre l'horizon du lieu. La position du petit Soleil de l'aiguille des heures par rapport à cette ligne en arc de cercle donne la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon de Chartres. Cette ligne permettait donc également de montrer les constellations du zodiaque observables de nuit.

L'horloge de Chartres était remise à l'heure chaque midi à l'aide des cadrans solaires et, en particulier à partir de la fin du *xvi*<sup>e</sup> siècle, à l'aide des méridiennes extérieure et intérieure (il n'en subsiste qu'une datée de 1701).

L'horloge de Bourges présente de fortes similitudes avec celle de Chartres. Elle est très bien documentée et nous savons en particulier que son constructeur, Jean Fusoris (1365-1436), l'a réalisée en 1424. D'autres horloges astrolabiques subsistent en France, par exemple :

- Saint-Omer (<https://www.patrimoine-horloge.fr/as-stomer.html>) ;
- Strasbourg (<https://www.patrimoine-horloge.fr/as2-strasbourg-cath.html>) ;
- Lyon (<https://www.ens-lyon.fr/RELIE/Cad战略/Musee/HorlogesAstro/Lyon/Cathedrale.htm>). ■



*L'horloge de la cathédrale de Bourges.*

CC BY-SA 2.0 Morio60

## Bibliographie

A. Desannaux, « Mesure du temps et histoire des techniques : Les débuts de l'horlogerie en Normandie (XIV<sup>e</sup>-XVI<sup>e</sup> siècles) », *Annales de Normandie*, 60<sup>e</sup> année, n° 1, janvier-juin 2010.

C.-H. Eyraud, *Horloges astronomiques au tournant du XVIII<sup>e</sup> siècle : de l'à-peu-près à la précision*, thèse de doctorat d'histoire de l'Université de Lyon, 2004.

I. Jourd'heuil, *Chartres cathédrale horloge astrolabique*, éd. Irène Jourd'heuil, coordinatrice éditoriale Sylvie Marchant, ministère de la Culture, Conservation régionale des monuments historiques, Orléans : Direction régionale des affaires culturelles du Centre, 2010.

J.-P. Mourat, « Dossier l'échappement à foliot », Musée du temps de Besançon.

J. North, *Richard of Wallingford*, Oxford University Press, 1976.

E. Poulle, « Pour une typologie de l'horlogerie astronomique médiévale », *Comptes rendus des séances de l'Académie des inscriptions et belles-lettres*, 141<sup>e</sup> année, N. 2, 1997, p. 635-662.

E. Poulle, *Un constructeur d'instruments astronomiques au XV<sup>e</sup> siècle : Jean Fusoris*, Paris, 1963.

E. Poulle, « Quelques reconstructions d'horloges astronomiques », séance du 21 juin de la Société nationale des antiquaires de France, Paris, 1995.

E. Poulle, « L'horloge astronomique de Bourges », *Bulletin de l'Association nationale des collectionneurs et amateurs d'horlogerie ancienne et d'art*, n° 113, 2008, p. 21-32.

Y. Terrenoire, *Entre terre et ciel, l'astrarium de Giovanni Dondi : histoire d'une horloge planétaire du Moyen Âge*, Les films du chêne & Observatoire de Paris, 2010, DVD 52 minutes.