

on apprécie d'abord les machines qui sonnent les heures, puis celles qui les affichent. L'idée naît alors de fabriquer des horloges astronomiques qui représentent, en plus du mouvement quotidien du Soleil (elles indiquent l'heure), son mouvement annuel. Dès leur apparition, les horloges astronomiques connaissent une grande vogue et contribuent, tout au long du XIV^e siècle, à la promotion de l'horlogerie elle-même. Vers 1350, Jacopo Dondi, le père de Giovanni Dondi, réalise pour sa ville de Padoue une horloge astronomique publique installée sur le Palais du Capitaine (elle y est encore, mais a subi de nombreuses transformations au cours de son histoire). Quant à l'équatoire que Campanus avait imaginé vers 1260, il connaît également une certaine notoriété au XIV^e siècle, après son adoption par l'enseignement universitaire.

L'astrarium est la première horloge planétaire, conçue comme un équatoire mécanisé où les mouvements des planètes sont mus par un mécanisme d'horlogerie. Dondi commence les calculs préalables à la conception de l'astrarium en 1365. Il met ensuite 16 ans à le réaliser. Il l'achève vers 1380, à un moment où les événements politiques le contraignent à quitter Padoue (l'Italie est alors organisée en plusieurs cités-états indépendantes dont les rivalités entraînent des troubles). Il se retire à Pavie, en Lombardie, en emportant son précieux chef-d'œuvre qui aurait dû faire la gloire de Padoue. Il reçoit des visiteurs illustres et enthousiastes qui considèrent

l'horloge comme la huitième merveille du monde et ne sont apparemment guère déçus de la trouver en panne : la documentation sur l'histoire de l'astrarium à Pavie se ramène, hélas, à des réparations répétées qui ne parviennent pas à le faire fonctionner correctement. Ses responsables ont dû se lasser de ces soins inutiles, car, à partir du début du XVI^e siècle, on perd toute trace de l'astrarium, qui a probablement fini ses jours à la décharge, comme toutes les vieilles horloges hors service.

Lors de la construction de l'astrarium, Dondi avait rédigé une sorte de compte-rendu d'atelier où il a décrit les étapes de sa réalisation. Grâce à ce document, le seul de ce genre qui nous vienne du Moyen Âge, nous connaissons tous les détails techniques de la construction de l'astrarium et nous avons reconstitué cet instrument unique.

L'astrarium est une tour polygonale à sept côtés d'environ 1 mètre de hauteur (voir la figure 1). Dans la partie inférieure se trouve le mécanisme d'horlogerie, installé au centre, ainsi qu'une horloge, sur l'une des faces : c'est une horloge ordinaire, à ceci près que le cadran comporte 24 graduations correspondant aux heures et que c'est lui qui tourne devant un repère fixe. Dans la partie supérieure se trouvent sept cadrans, sur chacune des faces, qui portent les mécanismes des sept planètes (le Soleil, la Lune, ainsi que les planètes que l'on connaît à l'époque : Mercure, Venus, Mars, Jupiter et Saturne). Chaque mécanisme est indépendant des autres. L'astrarium se veut le reflet du

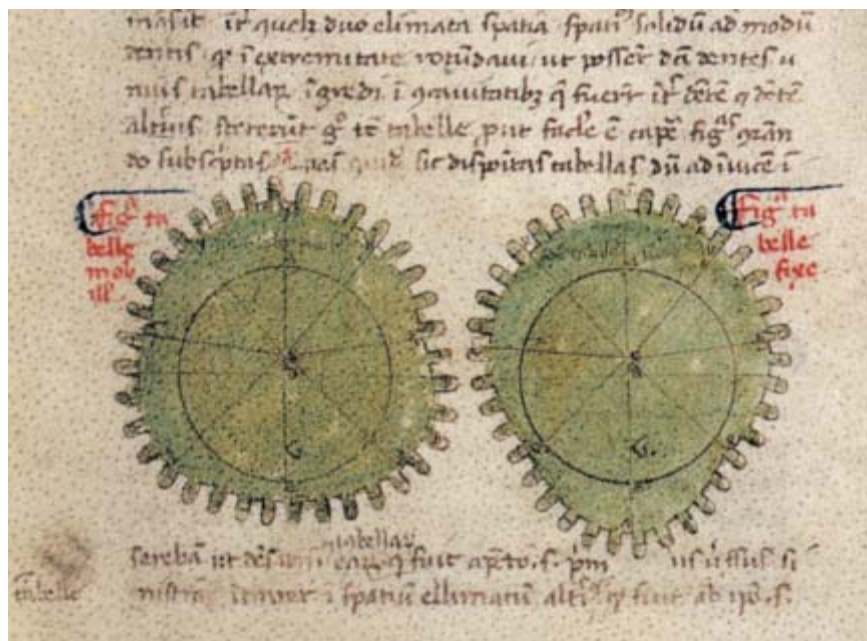
monde. Depuis Ptolémée, on admettait que le mouvement quotidien de la voûte céleste est le moteur de tous les autres mouvements célestes. De même, le mécanisme d'horlogerie commande tous les mécanismes planétaires.

Comment l'astrarium fonctionne-t-il ? Le mécanisme d'horlogerie fait tourner une grande couronne horizontale qui compte 365 dents, dite roue de l'année, située à la jonction de la partie inférieure et de la partie supérieure, sous les cadrans planétaires (voir la figure 1). Son centre est sur l'axe de la tour. Elle est le moteur commun de tous les mécanismes planétaires portés par les cadrans (sauf celui de la Lune). Elle avance d'un cran par jour, actionnant chaque mécanisme planétaire.

Les mécanismes planétaires des cadrans reproduisent les mouvements des planètes en matérialisant la construction géométrique de Ptolémée : la planète parcourt un petit cercle, l'épicycle, dont le centre parcourt un grand cercle, le déférent, excentrique par rapport au centre du monde, c'est-à-dire par rapport à la Terre. La vitesse angulaire du centre de l'épicycle sur le déférent est uniforme par rapport à un troisième point, dit centre de l'équant (voir la figure 2). Giovanni Dondi reproduit à petite échelle ce que l'on suppose alors être le mouvement des planètes. Il résout trois types de problèmes posés par la mécanisation : le respect de la périodicité, l'existence de deux excentricités (celle du centre du déférent et celle du centre de l'équant) et le mouvement épicyclique.

Afin que les périodicités des mouvements des planètes soit respectées, il fait des calculs compliqués pour concevoir des trains d'engrenages situés derrière et sur chaque cadran, qui font tourner respectivement la roue de l'équant et la planète sur l'épicycle aux vitesses voulues. Comme Dondi a limité le nombre de roues et de pignons, ses trains d'engrenages sont peu précis. D'ailleurs, il en a bien conscience puisqu'il complète son compte-rendu d'atelier par une longue liste d'instructions concernant la fréquence avec laquelle il convient d'avancer ou de retarder manuellement les mécanismes planétaires.

En revanche, Dondi résout avec brio la difficulté liée à l'excentricité en respectant, sans aucune concession, les règles de la théorie ptoléméenne. Comme le mouvement du centre de l'épicycle n'est régulier que par rapport au centre de l'équant, l'axe de l'épicycle est entraîné par une roue tournant autour de ce centre (actionnée par le mécanisme d'horlogerie). Le problème se pose alors de maintenir l'axe de l'épicycle à distance constante



4. Dondi a imaginé des aménagements particuliers pour tenir compte des caractéristiques propres de chaque planète notamment deux roues des engrenages qui transmettent son mouvement épicyclique à la Lune ont des contours irréguliers et complémentaires : l'une a un côté aplati (à gauche) alors que l'autre a un côté plus bombé (à droite).

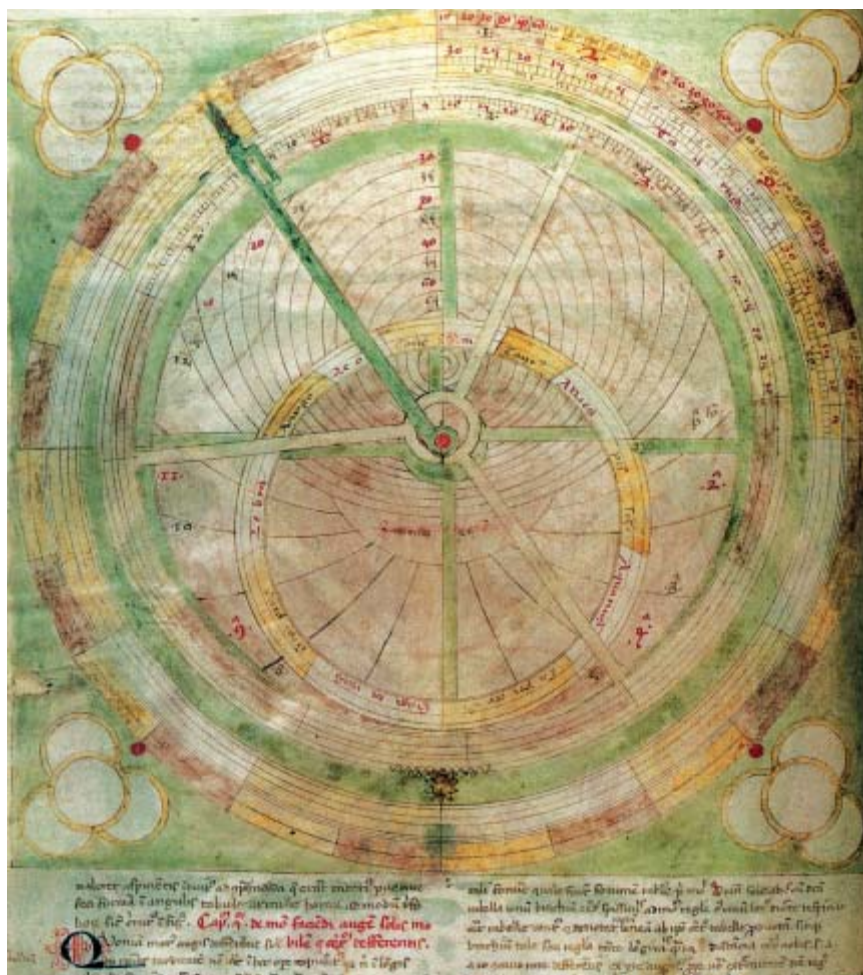
du centre du déferent : une règle, qui pivote autour du centre du déferent, porte l'axe de l'épicycle. D'autre part, ce dernier passe dans une fente ménagée dans l'un des rayons de la roue de l'équant, roue motrice de son mouvement (voir la figure 3). Ainsi, le centre de l'épicycle reste à distance constante du centre du déferent, grâce à la règle du déferent, et tourne régulièrement autour du centre de l'équant, grâce à la roue de l'équant.

Les trains d'engrenages responsables du mouvement épicyclique doivent être organisés autour du centre de l'équant (puisque c'est par rapport à lui que les vitesses angulaires relatives au mouvement de la planète sont uniformes). La première roue, fixe, est centrée sur le déferent et les autres roues sont portées par l'un des rayons de la roue de l'équant. Pour que ces roues continuent d'engrener sur la roue fixe, quelle que soit la distance du centre de l'épicycle au centre de la roue de l'équant, tout le support du train, et par seulement l'axe de l'épicycle, coulisse dans la fente précédente. Ce support est une réglette où sont fixés les axes des roues intermédiaires et l'axe de l'épicycle. Pour tenir compte des caractéristiques propres aux théories ptoléméennes de Mercure et de la Lune, Dondi a imaginé des aménagements particuliers : par exemple, le train épicyclique de Mercure comporte deux roues ovales, et celui de la Lune deux roues de contours irréguliers et complémentaires (voir la figure 4).

Comment les mécanismes planétaires indiquent-ils la position des planètes dans le ciel ? Avec une aiguille pivotant autour du centre du monde et percée d'une fente où passe le corps de la planète. Cette aiguille est ainsi entraînée par le mouvement de la planète et indique sa position sur la graduation fixe du pourtour du cadran, qui représente le zodiaque (voir la figure 3).

Le cadran du Soleil est différent de celui des autres planètes. Il est actionné directement par l'horloge ordinaire (dans la partie inférieure de la tour) qu'il surplombe. Le mouvement du Soleil est extrêmement simple (il n'a ni épicycle ni déferent). Il constitue un astrolabe mécanisé, l'astrolabe étant un instrument qui montre à la fois le mouvement quotidien du Soleil et son mouvement annuel dans le zodiaque (voir la figure 5).

Première horloge planétaire de l'histoire, l'astrarium inspira pendant 200 ans les concepteurs des modèles suivants. Ainsi, certains dispositifs sont quasiment devenus de règle, notamment les roues autour du centre de l'équant et les fentes aménagées pour faire varier la distance entre deux points en liaison mécanique. En revanche, les roues ovales et les roues



5. Le cadran du Soleil est un astrolabe mécanisé, qui montre à la fois le mouvement quotidien du Soleil et son mouvement annuel dans le zodiaque.

à contour irrégulier ne paraissent pas avoir fait école, peut-être parce qu'elles ont été tenues pour responsables des médiocres prestations de l'astrarium.

L'existence du compte-rendu d'atelier décrivant la construction de l'astrarium, conservé à la bibliothèque capitulaire de Padoue, a motivé trois entreprises de reconstruction. Cependant, les deux premières n'ont pas respecté en tous points les instructions de Dondi. Grâce à une bonne compréhension de son texte qui suppose des compétences à la fois en paléographie, en latin et en astronomie médiévale, mes collègues et moi-même avons réalisé une reconstruction fidèle de l'astrarium, conservée à l'Observatoire de Paris.

Elle est en laiton, comme l'original. Au Moyen Âge, on usait mécaniquement les dents des engrenages des horloges pour leur donner la forme adéquate. À cette méthode, nous avons préféré la conception assistée par ordinateur, pour tracer la forme des dents des roues, que Dondi n'a pas précisée. Nous avons vérifié leur bon fonctionnement sur des maquettes en contre-plaqué et avons

notamment constaté que les roues dont le contour n'est pas circulaire ne constituaient pas un obstacle à la bonne marche de l'astrarium, sous réserve que la forme des dents soit adaptée. Pour supprimer les frottements de la roue de l'année, nous l'avons installée sur un roulement à billes. Si l'astrarium était génial sur le plan scientifique, cette reconstruction a montré qu'il n'a sans doute jamais bien fonctionné. L'admiration qu'ont éprouvée ses visiteurs, au XV^e siècle, ne s'adressait pas tant à ce qu'ils voyaient qu'à ce qu'ils espéraient ou rêvaient voir.

Emmanuel POULLE est historien des sciences, directeur honoraire de l'École des chartes et secrétaire perpétuel de l'Académie internationale d'histoire des sciences.

John NORTH, *The Astrolabe*, in *Scientific American*, n° 230, pp. 96-106, 1974.

Emmanuel POULLE, *Pour une typologie de l'horlogerie astronomique médiévale*, Académie des inscriptions et belles lettres, Comptes-rendus, pp. 635-662, 1997.