

Deuxième partie

Les premières horloges mécaniques

Au début du XIV^e siècle, le dispositif à foliot et roue de rencontre (Voir chapitre 2.1), fut adopté dans toute l'Europe pour construire les horloges mécaniques. Le texte qui suit atteste que ce dispositif n'était pas encore inventé en 1271. Cette année là, Robertus Anglicus, commente en effet ainsi le livre « de sphaera » de Johannes de Sacrobosco.

Commentaire de Robertus Anglicus sur la Sphère de Sacrobosco, 1271 ([171, 148]).

Quand on parle d'heures égales, cela veut dire que le jour en compte autant que la nuit. Pour les heures inégales, nous employons ce mot au sens des heures fournies par les astrolabes et les autres instruments astronomiques (ou par les instruments gnomoniques [horologica] construits selon l'astronomie) ; mais il n'est pas possible qu'un tel instrument [horologium] soit rigoureusement exact quant aux lois de l'astronomie. Les « artifices horologiorum », cependant, s'efforcent de fabriquer un cercle qui tournerait exactement selon le mouvement de l'équinoctial, mais ils ne peuvent pas encore réaliser cette entreprise ; s'ils pouvaient la fabriquer, on aurait un horologium absolument exact, bien plus exact pour mesurer les heures que l'astrolabe ou quelque autre instrument astronomique, si on savait le fabriquer (selon ce qui a été dit ci-dessus).

Le principe pour fabriquer un tel horologium serait de faire un cercle bien équilibré en toutes ses parties, le mieux possible, puis de suspendre un poids à l'axe de cette roue, lequel poids ferait tourner la roue de sorte que le mouvement de celle-ci s'accomplirait d'un lever du Soleil au lever suivant, plus le temps qu'il faut pour que se lève environ un degré (de l'équinoctial) selon une estimation qui est proche de la vérité... Ainsi la susdite roue achèverait son mouvement en un jour, et, si on la divisait en 24 parties égales, la localisation de chacune de ces parties montrerait l'heure (égale) dans le ciel¹.

Il est clair en effet, que les horloges mécaniques qui se développent en grand nombre à partir du XIV^e siècle, peuvent posséder, grâce au dispositif à foliot et roue de rencontre, un cercle tournant comme le cercle équinoctial, permettant de lire l'heure sidérale, ou l'heure solaire par un système d'engrenages ... Nous présenterons d'abord des horloges du patrimoine européen représentatives de ces débuts de l'horlogerie astronomique puis détaillerons le fonctionnement du « nouveau dispositif ».

¹Et de primis horis loquendo dicitur quod dies habet tot horas et nox tot. Et de aliis horis, scilicet inequalibus, loquimur in acceptione horarum per astrolabia et alia instrumenta astronomica (et etiam horologica que sunt facta secundum formam astronomicam); nec est hoc possibile quod aliquod horologium sequatur omnino judicium astronomie secundum veritatem. Conantur tamen artifices horologiorum facere circulum unum qui omnino moveatur secundum motum circuli equinoctialis, sed non possunt omnino completere opus eorum; quod si possent facere, esset horologium verax valde et valerer plus quam astrolabium quantum ad horas capiendas vel aliud instrumentum astronomiae, si quis hoc sciret facere (secundum modum antedictum).

Modus autem faciendi tale horologium esset, quod homo faceret unum circulum equalis ponderis ex omni parte secundum quod melius possibile esset. Postea quod appendatur pondus plumbeum axi ipsius rote, quod quidem pondus taliter moveat rotam istam quod motus ille compleatur ab ortu solis usque ad ortum preter tantum tempus per quantum oritur unus gradus fere secundum estimationem propinquam veritati... Tunc rota predicta compleat motum suum in illo tempore et dividatur in 24 partes equeales, tunc situs cuiuslibet partis ostendet horam in celo.

Chapitre 1

Les premières horloges astronomiques mécaniques

1.1 L'horloge de Richard de Wallingford

De nombreux témoignages à partir des années 1320 montrent que des horloges mécaniques équipées du foliot étaient construites à travers toute l'Europe [182, 19, 18]. Lorsque les villes ou les monastères disposaient à la fois des ressources financières et des compétences intellectuelles, de magnifiques chefs-d'œuvre furent réalisés. Les deux plus célèbres de cette époque sont l'horloge de Richard de Wallingford et l'horloge de Giovanni Dondi.

C'est en 1327 que Richard de Wallingford, abbé de Saint-Albans, village situé au Nord de Londres, réalisait la plus ancienne horloge astronomique connue dont une étude complète a été publiée par John North en 1976 [137, 186].

Le texte sur l'échappement est difficilement compréhensible, mais North a pu reconstituer un type d'échappement que l'on retrouve beaucoup plus tard dans les manuscrits de Léonard de Vinci : une structure en demi-cercle, solidaire du foliot et mise en oscillation par les pinnules radiales de deux roues¹ (Figure 1.1).

Dans un article de la revue *Nature*, Annie Lautink-Ferguson suggère que si l'on rencontre autant d'arquebusier parmi les premiers horlogers, c'est parce qu'ils savaient faire la pièce principale de cet échappement qui ressemblait à la noix de blocage des arquebuses (Voir la figure 1.2 et la biographie de l'horloger Daniel Gom, fils d'un arquebusier, page 316).

1.2 L'horloge de Giovanni Dondi

Giovanni Dondi, mit une quinzaine d'année à réaliser à Padoue, l'horloge qui fit sa célébrité. Ses calculs commencèrent vers 1365 et son ouvrage fut achevé en 1380. Le manuscrit de la bibliothèque de Padoue a été traduit par Emmanuel Poulle qui a fait établir une reconstitution fidèle (Figure 1.3) se trouvant à l'Observatoire de Paris [147, 62].

¹Sur cet échappement, lire les commentaires de Dohrn-van-Rossum page 53, 54 [182].

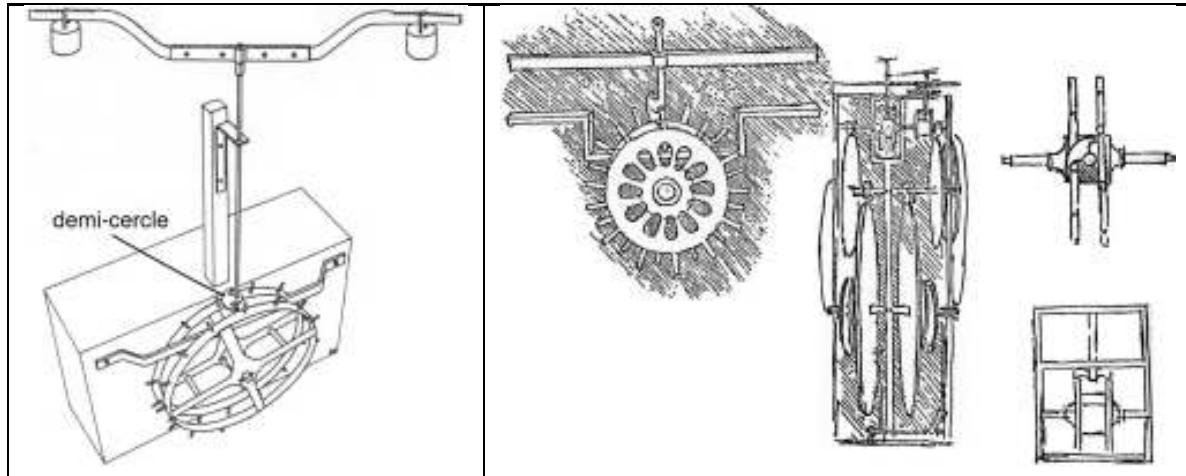


FIG. 1.1 – Échappement de l'horloge de Saint-Albans et manuscrit de L. de Vinci [182, 137].

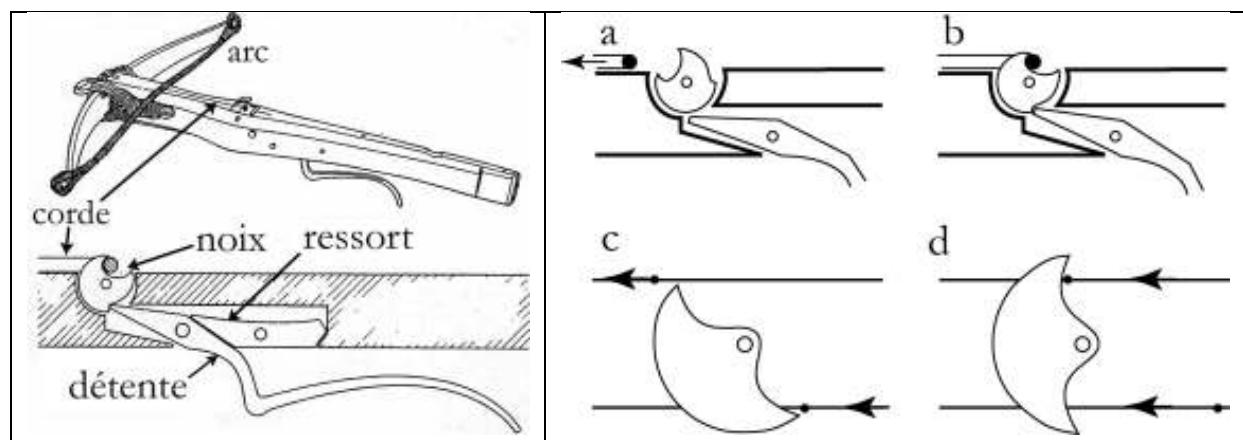


FIG. 1.2 – Noix de déclenchement de l'arquebuse et demi-cercle d'échappement d'horloge [115].

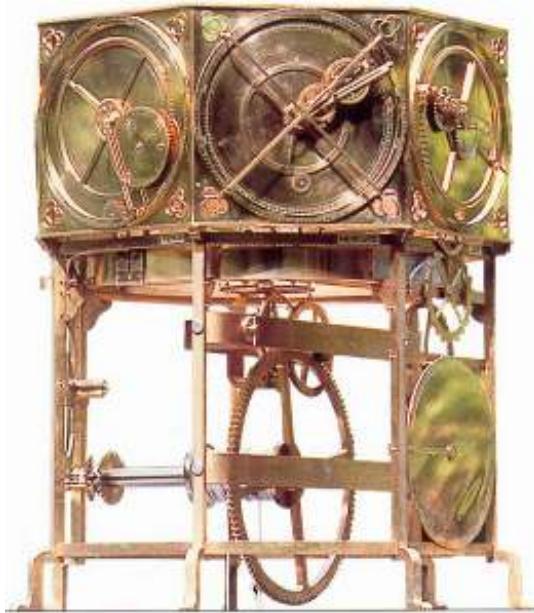


FIG. 1.3 – Reconstitution de l'horloge de Dondi, Observatoire de Paris.

L'horloge de Dondi était une horloge d'intérieur, mue par un poids et régulée par un mécanisme à foliot. Sept cadrants reproduisaient les mouvements des 7 astres mobiles dans le système de Ptolémée, et un cadran inférieur donnait l'heure.

1.3 L'horloge astronomique de Mantoue

1.3.1 La division du jour

1.3.1.1 Différents systèmes de division du jour [69, 70]

Les heures solaires vraies La division du jour a de tout temps été faite grâce à l'avancement du Soleil sur la sphère céleste. Le système de référence utilisé est celui des heures solaires vraies définies à partir de l'angle horaire AH du Soleil (Figure 1.4).

Les heures solaires vraies (ou équinoxiales) divisent le jour en 24 parties égales : la première débute lorsque le Soleil franchit le méridien local et finit lorsque l'angle horaire du Soleil a augmenté de 15° . Une heure solaire vraie correspond à une variation de 15° d'angle horaire du Soleil. Traditionnellement en gnomonique l'angle horaire a pour origine midi. Le jour civil commençant à minuit, on définit le temps civil local comme étant l'heure solaire locale augmentée de 12h modulo 24. Ces heures servent de compteur universel pour tous les autres types d'heures calculables pour un cadran solaire : obtenir l'heure X dans un autre système implique de savoir quelle est sa traduction ou sa correspondance dans le système des angles horaires vrais.

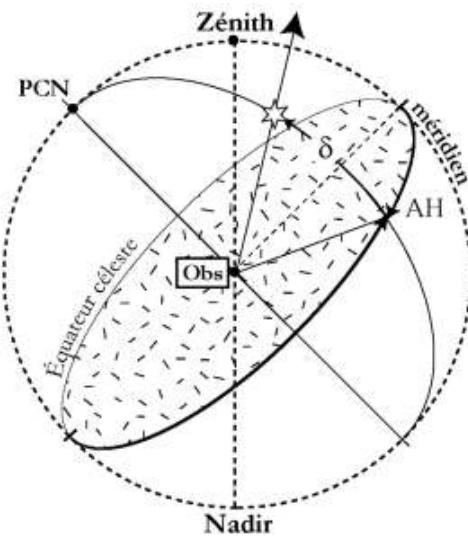


FIG. 1.4 – Les coordonnées horaires d'un astre [48].

Les heures temporaires La subdivision d'un jour clair en douze heures temporaires, appelées aussi heures antiques, bibliques, judaïques, inégales, consiste à considérer l'arc diurne du Soleil et à le diviser en douze portions, égales entre elles. Une heure temporaire de jour représente ainsi le douzième de la durée du jour, une heure temporaire de nuit le douzième de la durée de la nuit.

Les heures temporaires varient en fonction de la latitude du lieu et de la date. Ainsi, à nos latitudes moyennes, autour de 45° de latitude Nord, l'heure temporaire de jour vaut 40 minutes vers le solstice d'hiver, 1 heure 20 minutes près du solstice d'été et, évidemment, 60 minutes les jours d'équinoxes.

Les heures babyloniques Les heures babyloniques divisent le jour en 24 heures égales dont la première débute au lever du Soleil, la dernière finit au lever du lendemain.

Les heures italiennes Les heures italiennes divisent le jour en 24 heures égales dont la première débute au coucher du Soleil, la dernière finit au coucher du lendemain.

On les appelle parfois heures bohémianes parce qu'en 1360, l'empereur du Saint Empire, Charles IV (1316-1378), aurait introduit ce mode de décompte dans ses états de Bohème et de Hongrie (d'après [179] page 10, [174] page 25, [167] avec une confusion sur les heures bohémianes assimilées aux heures babyloniques).

Dohrn van Rossum ([182] page 234) citant les actes du Consistoire épiscopal de Prague, fait remonter à 1381 la première indication de l'heure sous forme italo-bohémienne : « hora quasi XX orlogii ».

On parle parfois d'heures italiennes, lorsque l'origine du décompte est retardé d'une demi-heure après le coucher du Soleil, avec la récitation de l'Ave Maria ou de l'Angélus².

²La prière de l'angélus tire son nom de son premier verset « Angelus Domini, nuntiavit Mariae, Et concepit de

1.3. L'HORLOGE ASTRONOMIQUE DE MANTOUE



FIG. 1.5 – Heures italiennes, babyloniques, temporaires dans le système d'heures solaires vraies.

Les heures de Nuremberg C'est un système d'heures égales distinguant les heures diurnes et les heures nocturnes, faisant commencer les premières au lever du Soleil, les secondes au coucher du Soleil (décompte italien la nuit, babylonique le jour). Un petit nombre de montres, munies de cadran réglables à la main, ont été conservées (d'après [13], page 28).

Autres systèmes horaires Il peut exister une quasi infinité de types d'heures : toute règle concevable pour diviser en tranches la durée d'un jour, peut engendrer un système horaire. C'est ainsi qu'un gnomoniste [80] a proposé de créer des heures « bretonnes », hommage au délicieux gâteau dénommé « quatre-quarts breton ». Ces heures découperaient en 4 tranches chaque demi-journée de temps vrai, aux instants où la hauteur du Soleil atteindrait les valeurs significatives suivantes :

- le quart de sa hauteur de culmination
- la moitié de cette hauteur
- les trois quarts de cette hauteur
- la hauteur de culmination elle-même.

A partir de midi le découpage se poursuit pour quatre nouveaux quarts décomptés en symétrie inversée par rapport aux quatre quarts du matin.

Nous expliciterons le système appelé « heures planétaires » dans le paragraphe 1.3.4.

Spiritu Sancto ... » ; elle est composée de trois versets intercalés avec des Ave Maria. Elle remonterait à Urbain II (vers 1042-1099) et fut codifiée par Jean XXII qui accorda des indulgences à ceux qui réciteraient trois Ave Maria par jour. Callixte III, pape de 1455 à 1458, effrayé des succès du sultan turc, Mahomet II, la recommanda tout particulièrement. L'angélus était sonné à Cologne à partir du concile de 1243, à Soissons en 1375 et une légende dit que Louis XI (1423-1461) introduisit la sonnerie des cloches dans le Royaume pour les trois angélus au Lever du Soleil, à Midi et au Couche du Soleil (d'après [113] et [182] page 212, [13] page 27).

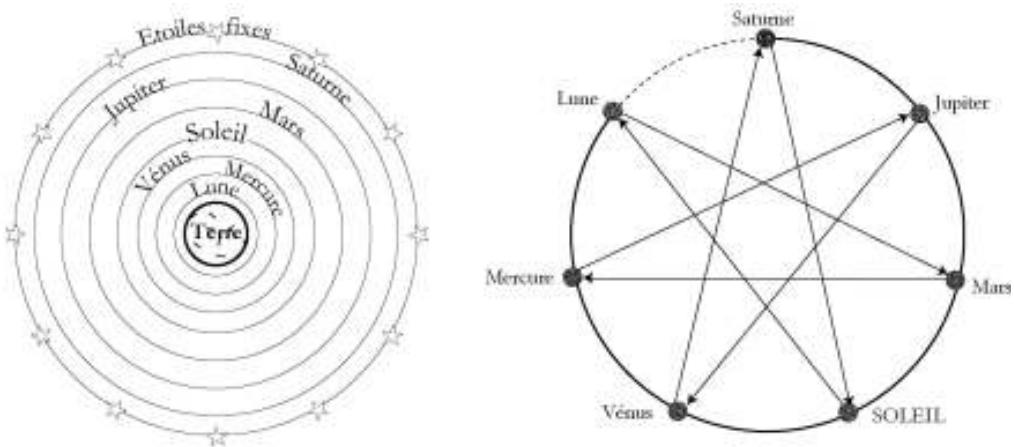


FIG. 1.6 – Le Monde (très simplifié) des Anciens et l’ordre des jours de la semaine.

1.3.2 Les planètes et les jours de la semaine

1.3.2.1 Les 7 vagabonds

Pythagore (Samos vers 580, Tarente vers 500 av J.C) est à l’origine du principe qui perdura pendant 2000 ans : celui de la perfection du mouvement circulaire uniforme. Le modèle transmis par son École était le suivant : La Terre sphérique, pesante, est au centre du monde, immobile. La sphère des étoiles fixes exécute autour de la Terre une révolution d’orient en occident suivant un axe invariable. Le grand cercle du ciel perpendiculaire à cet axe est appelé équateur. Le Soleil, la Lune et les 5 planètes, emportés par ce mouvement, décrivent chaque jour des cercles parallèles à l’équateur. Le Soleil accomplit en $365\frac{1}{4}$ un mouvement propre d’occident en orient dans un plan incliné par rapport à l’équateur. La Lune et les 5 autres planètes ont de même, sur des plans plus ou moins proches de celui du Soleil, un mouvement d’occident en orient sur des orbites d’autant plus lointaines que leur période est plus grande. Mercure et Vénus, suivent ou précèdent le Soleil, avec un faible écart angulaire (au plus 29° pour Mercure, 49° pour Vénus). L’égalité des périodes moyennes de Mercure, de Vénus et du Soleil fit hésiter sur l’ordre des orbites mais finalement le Soleil fut placé au milieu avec trois planètes au-dessous (Lune, Mercure, Vénus) et trois au-dessus (Mars, Jupiter, Saturne) comme l’indique la figure 1.6.

1.3.2.2 L’ordre des jours de la semaine

L’origine de la semaine de 7 jours est probablement astronomique et liée à la Lune : 7 jours représentent en effet un quart de lunaison environ. Les noms des jours sont, eux, liés aux planètes dans la plupart des langues indo-européennes.

Les symboles des planètes sont représentés figure 1.7 [24]. Les plus anciens sont ceux du Soleil et de la Lune que l’on retrouve dans différentes cultures. Vénus aurait une origine égyptienne : la croix ansée représente en effet la déesse de la fécondité et se retrouve souvent sur les inscriptions égyptiennes. Les symboles de Saturne, Jupiter, Mars et Mercure seraient d’origine



FIG. 1.7 – Les symboles astrologiques des 7 vagabonds.

grecque : une fauille pour le dieu du Temps Chronos (mais Saturne est aussi le dieu latin de l'agriculture), le Z pour le roi des dieux Zeus, le bouclier et la lance pour le dieu Mars (planète rougeâtre, dieu de la guerre), le caducée pour le dieu Mercure (planète rapide, dieu messager) ...

On trouve dans certains ouvrages astrologiques l'origine suivante des jours de la semaine³. Chaque heure de la journée était présidée (gouvernée) par une planète, la planète régente de la première heure du premier jour étant le Soleil, astre le plus important du ciel. C'est donc lui qui donne son nom au premier jour (Jour du Soleil, Sonntag, Sunday, ...). En suivant l'ordre décroissant de distance des planètes, Vénus est le Régent de la 2^e heure, Mercure de la 3^e heure, ..., Mercure de la 24^e heure de ce 1^{er} jour, et c'est alors la Lune la Régente de la 1^{re} heure du deuxième jour qui donne son nom à ce jour (Lundi)... Mars est le Régent de la 1^{re} heure du troisième jour, etc ... (Figure 1.6)

1.3.3 Un cadran de « pseudo heures planétaires »

1.3.3.1 Les Régents de l'heure

Il existe ainsi des tableaux des Maîtres de l'heure, nommés aussi Régents de l'heure ou Seigneurs de l'heure. En gnomonique on connaît aussi des cadrants solaires où les cases formées par les croisements des lignes horaires et des arcs de déclinaison contiennent les symboles des planètes régentes, pour autant qu'il existe assez de cases compatibles avec la déclinaison du cadran ; l'idéal est que le cadran porte au moins treize lignes horaires. Pour qu'un tel système donne sa pleine mesure, il faut aussi consentir à poser que les jours de la semaine seront représentés par les sept arcs de déclinaison usuels, aux 21 mensuels, et non par l'espace entre deux arcs. En effet, les sept arcs ne composent que six espaces et les symboles de la première ou de la dernière journée de la semaine ne pourront pas être dessinés autrement qu'en dehors des cases.

Chaque journée de jour clair, du lever au coucher du Soleil, est immuablement subdivisée en douze heures planétaires et l'on devrait pouvoir en dire autant de chaque nuit, du coucher au lever du Soleil. Mais il existe aussi une autre façon de faire, chez certains astrologues pour lesquels la nuit n'est régie que par deux Maîtres de l'heure, l'un n'exerçant son influence que du coucher du Soleil à minuit et l'autre de minuit au lever du Soleil.

Annexe : Les Régents de l'heure

	Heures de Jour												Heures de Nuit												Avant Minuit	Après Minuit	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Dim	○	♀	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	HP n°1	HP n°12	
Lun	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚
Mar	⌚	○	♀	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	
Mer	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	
Jeu	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	
Ven	♀	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	
Sam	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	○	♀	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	⌚	

FIG. 1.8 – Les Régents de l'heure.

Dans les cas où il n'y a que deux Régents de Nuit (les deux dernières colonnes), le premier Régent avant minuit correspond à celui de l'heure planétaire de nuit n°1, le second après minuit, correspond à celui de l'heure planétaire de nuit n°12 qui est aussi le Régent de l'heure planétaire de nuit n°5.

1.3.3.2 Le cadran de l'Église Sainte-Catherine d'Oppenheim, Allemagne (Figure 1.9)

Ce cadran doit dater du XV^e ou XVI^e siècle, époque de renouveau de l'astrologie en Europe (on peut noter que le style est droit et non polaire). On peut voir sur la figure 1.9, les 7 arcs de déclinaison habituels, avec en plus en haut une huitième ligne permettant d'obtenir 7 rangées, une pour chaque jour de la semaine. On peut lire dans la colonne de gauche, le jour de la semaine représenté par sa planète (de haut en bas) : Soleil, Lune, Mercure, Mars, Jupiter, Vénus, Saturne.

Les heures planétaires sont numérotées en chiffres arabes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Elles sont assimilées aux heures temporaires numérotées au-dessous en chiffres romains, VIII, IX, X, XI, XII, I, II, III.

Pour un jour de la semaine donnée, à une heure donnée, on lit le Régent de l'heure dans la rangée correspondant au jour et dans la colonne où se trouve l'ombre du style.

Exemple :

Supposons que l'on soit dimanche, dans la 10^e heure temporaire de jour.

Sur le cadran d'Oppenheim, la case correspondante est celle qui se trouve en haut à droite où figure le symbole de Mercure.

Or, le dimanche, le Soleil est Régent de la 1^{re} heure, Vénus Régent de la 2^e heure, Mercure Régent de la 3^e heure ...et c'est bien Mercure qui est Régent de la 10^e heure.

³L'historien Grec Dion Cassius (vers 155-235 après J.C) explique l'ordre des jours de la semaine par les rituels pratiqués dans les temples égyptiens

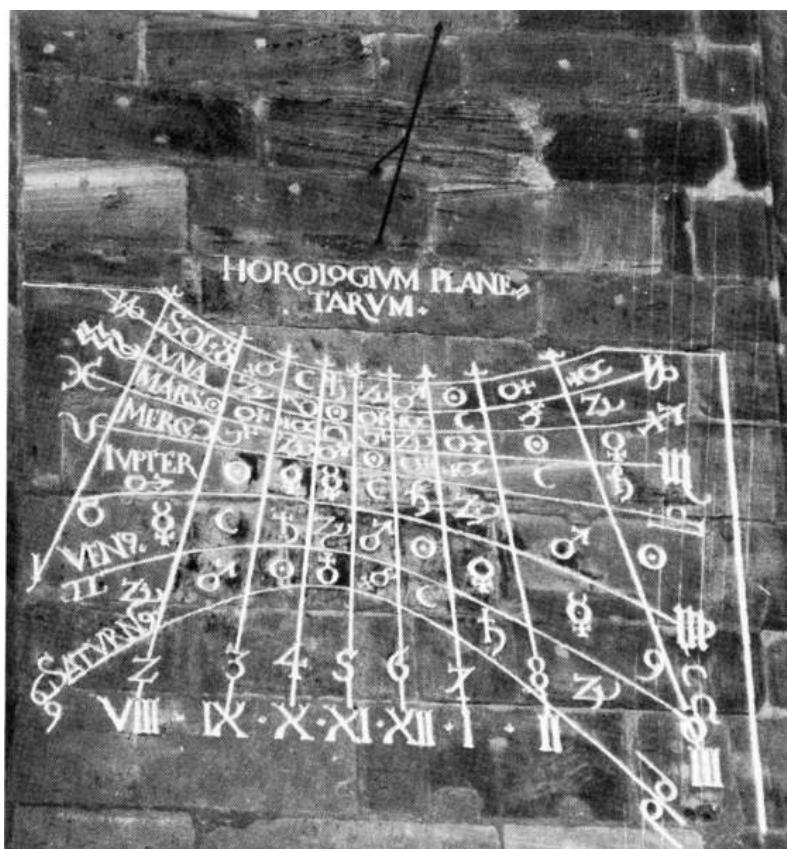


FIG. 1.9 – Cadran de l’Église Sainte Catherine d’Oppenheim (Allemagne).

1.3.4 Les véritables heures planétaires

1.3.4.1 Heures temporaires-Heures planétaires

La question intéressante en gnomonique est de savoir comment diviser un jour en douze heures planétaires, selon la bonne doctrine. La plupart des cadrans solaires qui portent les symboles des planètes s'accommodent, comme celui d'Oppenheim, des heures temporaires, ce qui est une facilité regrettable, car il existe une différence considérable entre les deux systèmes.

1.3.4.2 Retour aux sources

La conception des véritables heures planétaires se révèle plus subtile. Il semble qu'elle était complètement sortie des esprits des gnomonistes jusqu'à ce que Joseph Drecker [63] ne la remette en mémoire dans son ouvrage de 1925 dont la bibliographie fait référence à des astronomes-astrologues du XVI^e siècle. Un gnomoniste belge, Léon Thiran [170], a présenté il y a quelques années un commentaire de Joseph Drecker assez connu des gnomonistes mais qui n'a malheureusement pas été publié. Enfin, le gnomoniste hollandais, Fer J. de Vries, dans son logiciel ZONWLAK ZW2000 [54], procure les éléments nécessaires au calcul et au tracé des heures planétaires, ainsi que des autres composantes d'un cadran astrologique. C'est auprès de ces auteurs que nous avons puisé les informations utilisées dans cette étude.

1.3.4.3 Les heures planétaires

Les heures planétaires sont des durées, comme les heures temporaires ; elles aussi sont des fractions du jour solaire et elles sont mesurées en temps solaire vrai. Chaque jour (date), il existe douze heures planétaires de jour et douze heures planétaires de nuit. Sur un cadran solaire ces dernières ne peuvent figurer, mais il est possible de les tracer sur un tympan d'astrolabe où les positions d'étoiles renseignent sur les positions nocturnes du Soleil. A l'instar des heures temporaires, douze heures planétaires sont limitées par treize lignes frontières, dont la première est confondue avec l'horizon côté Est et la dernière avec l'horizon côté Ouest. Mais ces lignes ne sont pas numérotées de 1 à 13 ; en effet, tout comme pour les heures temporaires, chaque ligne indique que l'heure qui porte le même numéro vient de s'achever. La première ligne est donc, virtuellement, numérotée zéro ; elle pourrait, aussi bien, être numérotée 12 puisque son franchissement marque la fin de la douzième heure de nuit. Quant à la dernière heure, elle porte, logiquement, le chiffre 12, puisque son franchissement marque la fin de la douzième heure planétaire de jour et l'entrée dans la première heure planétaire de nuit.

Cette façon de numérotter 12 la frontière entre le jour et la nuit et de ne pas numérotter la frontière entre la nuit et le jour est traditionnelle : elle évite à la fois le zéro et la répétition du chiffre 12. Les heures planétaires se réfèrent à l'écliptique et non à l'équateur céleste. Elles sont inégales entre elles, non seulement au fil des jours et des mois, mais encore pour une seule et même journée. Une heure planétaire correspond au temps qui s'écoule entre les levers de deux points de l'écliptique distants l'un de l'autre de 15 degrés.

Soit un jour J, quelconque parmi les 365 jours d'une année. Le Soleil se lève en un instant T. En même temps que se lève le Soleil, se lève aussi un certain degré de l'écliptique qu'on appelle

l'ascendant, soit A. Cet instant est le début de l'heure planétaire N°1, exprimé en temps solaire. L'écliptique continue à tourner (mouvement apparent) et arrive un autre instant où se lève un de ses degrés qui vaut : $A+15^\circ$. La première heure planétaire est achevée et la deuxième planétaire vient de commencer et ainsi de suite. Les heures planétaires, n'ont donc rien à voir avec les mouvements ou les positions des 7 planètes anciennes ; si elles sont appelées ainsi, c'est parce qu'elles sont censées déterminer les durées pendant lesquelles telle ou telle planète exerce son influence sur les destinées des humains.

1.3.4.4 Méthode de calcul

Tracer les lignes des heures planétaires consiste donc à calculer les angles horaires vrais du Soleil lorsque se lèvent des successions régulières d'arcs de 15 degrés d'écliptique.

Voici la procédure exposée par Fer de Vries pour un jour donné. Calculer successivement :

1. DEC : la déclinaison du Soleil, à midi le jour concerné.
2. RA : l'ascension droite du Soleil $RA = \arcsin(\tan(DEC)/\tan(23,44))$
3. LS : la longitude écliptique du Soleil $LS = \arcsin(\sin(DEC)/\sin(23,44))$
4. LE : la longitude des 12 ascendants $LE = LS + (U * 15^\circ)$ avec $U = 1, 2, 3, \text{ etc.}$ (heures planétaires)
5. DE : la déclinaison des 12 ascendants $DE = \arcsin(\sin(LE) * \sin(23,44))$
6. RE : l'ascension droite des 12 ascendants $RE = \arcsin(\tan(DE)/\tan(23,44))$
7. T : le semi-arc diurne des 12 ascendants $T = \arccos(-\tan(phi) * \tan(DE))$ avec $\phi = \text{latitude}$
8. AH : l'angle horaire du Soleil pour les 12 ascendants $AH = -T - RA + RE$

Ensuite, positionner cet ascendant AH sur le cadran ou l'astrolabe par les procédés usuels, après avoir veillé, à chaque étape, à faire sortir les résultats dans les bons quadrants.

1.3.5 Tympan d'astrolabe, cadran horizontal et heures planétaires

A une heure solaire donnée, la position de l'écliptique est différente pour une même déclinaison du Soleil, croissante ou décroissante. Pour cette raison une ligne d'heure planétaire comprend deux portions : une en déclinaison du Soleil croissante du 21 décembre au 21 juin, l'autre en déclinaison décroissante du 21 juin au 21 décembre.

1.3.5.1 Un tympan d'astrolabe détaillé

Pour une meilleure compréhension nous avons d'abord reproduit sur deux tympans différents (Figure 1.10) les lignes d'heures planétaires : l'un pour une date comprise entre le solstice d'été et le solstice d'hiver, l'autre pour une date comprise entre solstice d'hiver et solstice d'été. Sur chaque tympan on peut observer l'allure sinuuse de la portion de ligne d'heure planétaire allant d'un tropique à l'autre.

Sur le tympan complet une ligne d'heure planétaire sera la ligne fermée formée des deux portions de courbes.

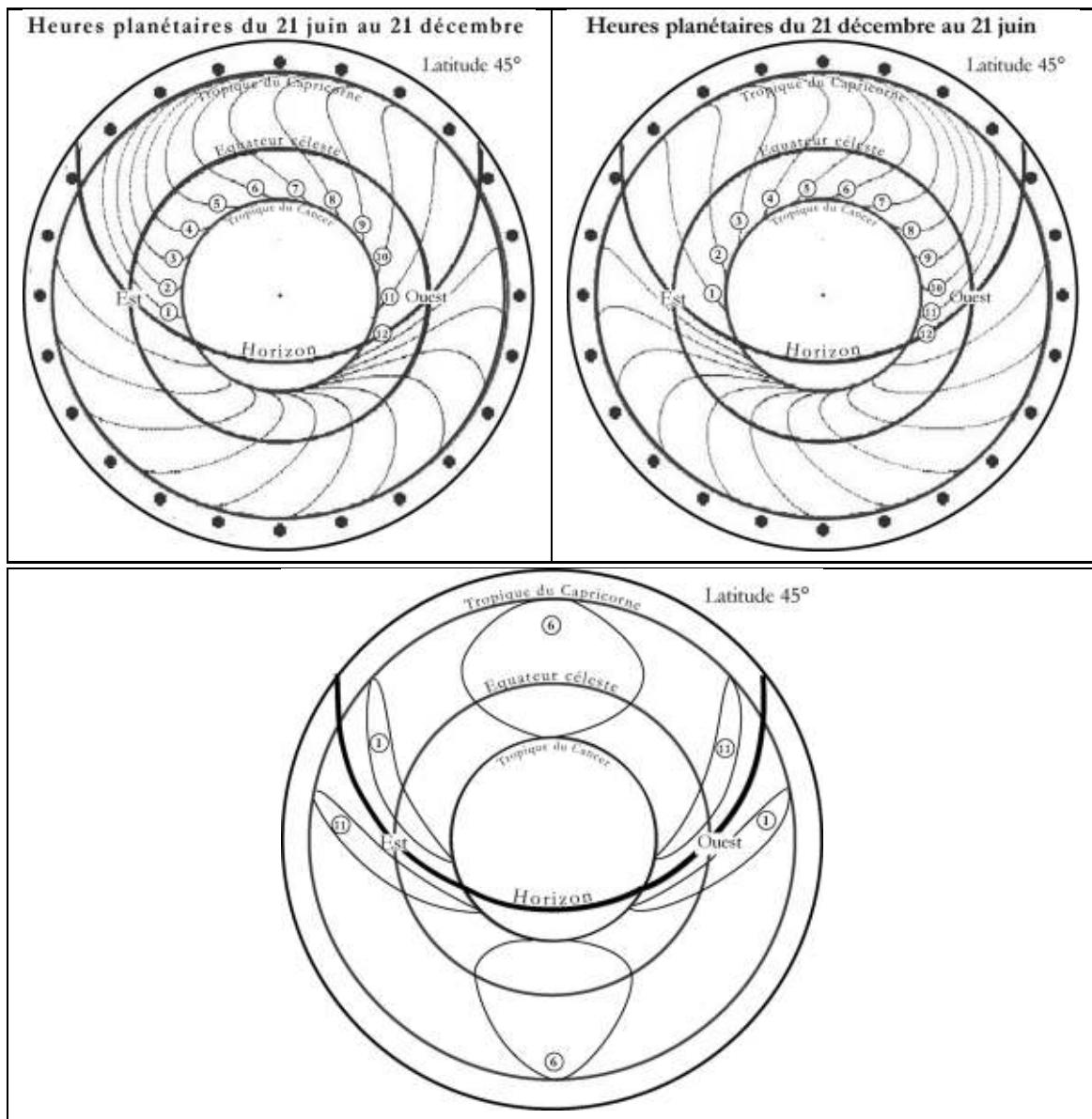


FIG. 1.10 – Tympan d’astrolabe avec les heures planétaires.

En haut l’astrolabe est dissocié en deux ; seules les heures de jour sont numérotées. En bas, l’astrolabe est complet ; seules les heures planétaires de jour et de nuit 1, 6, 11 sont représentées.

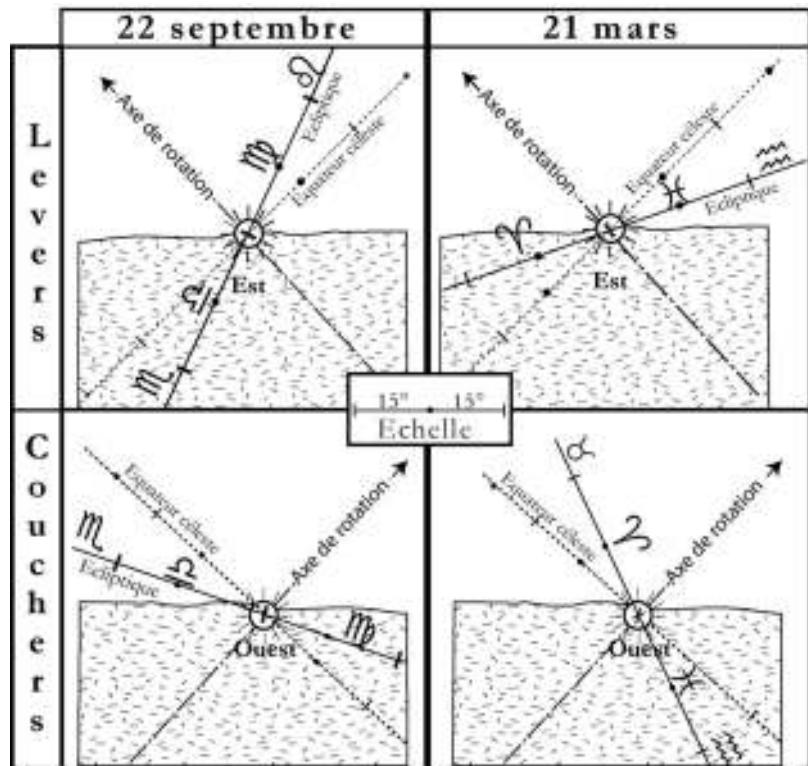


FIG. 1.11 – Levers et couchers de Soleil aux équinoxes

1.3.5.2 Interprétation physique

Aux solstices On observe évidemment que les heures planétaires sur le Tropique du Cancer et sur le Tropique du Capricorne (21 juin et 21 décembre) ont des valeurs égales sur les deux tympans.

Aux équinoxes Aux équinoxes les valeurs des heures planétaires sont lues à l'intersection des lignes 1, 2, 3, ... 12 et de l'équateur. Pour le 22 septembre nous les lirons donc sur le tympan « 21 juin-21 décembre », pour le 21 mars sur le tympan « 21 décembre-21 juin ». Nous nous intéresserons d'abord à l'équinoxe d'automne, le 22 septembre. Nous constatons que les premiers points 1, 2, 3 sont resserrés et les derniers 9, 10, 11, 12 distants, ce qui signifie qu'exprimées en heures solaires vraies les premières heures planétaires de jour (le matin) sont brèves, les dernières (le soir) sont longues. Ce résultat se comprend aisément à l'aide de la Figure 1.11 qui montre le lever et le coucher de Soleil le 22 septembre. Au lever du Soleil, l'écliptique forme un angle important avec l'horizon et les premières heures planétaires seront brèves, au coucher l'écliptique forme un angle faible avec l'horizon et les dernières heures planétaires seront longues. Pour l'équinoxe de printemps, le 21 mars, les mêmes observations montrent que les premières heures planétaires sont longues, les dernières sont brèves.

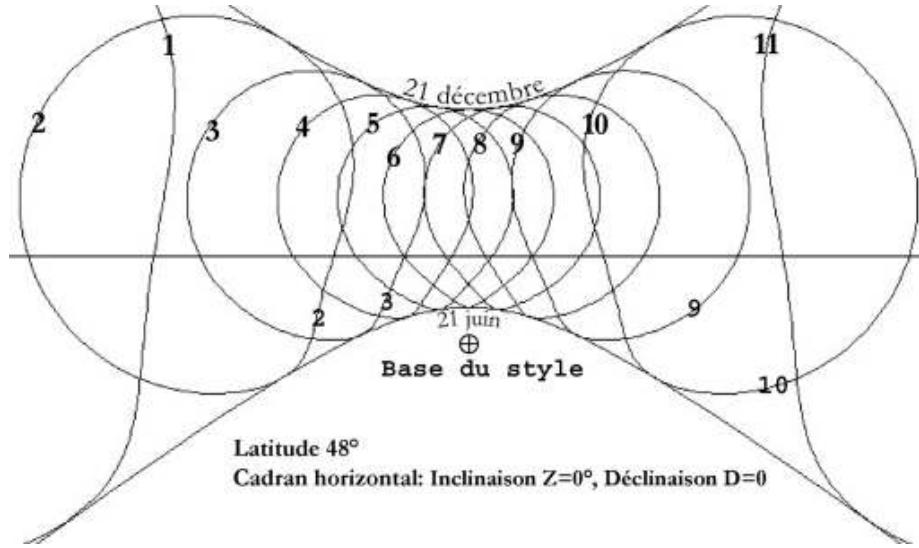


FIG. 1.12 – Cadran horizontal tracé avec Zonwlak de Fer de Vries.

1.3.5.3 Un cadran solaire horizontal tracé avec Zonwlak de Fer de Vries

Pour inciter nos lecteurs à se familiariser avec les heures planétaires et à utiliser le logiciel Zonwlak disponible sur internet [54], nous donnons sur la figure 1.12 un cadran horizontal avec ses heures planétaires.

Conclusion

Il n'est pas question de prôner l'astrologie, surtout sous son aspect prédictif et mercantile, mais cette division du jour, utilitaire et arbitraire comme toutes les divisions du jour, ne manque pas d'intérêt en ceci qu'elle considère le parcours « naturel » du Soleil le long de l'écliptique, alors que les autres systèmes se réfèrent à l'équateur ou même, simplement, à un arc journalier du Soleil. Pour un astrologue le « domicile » du Soleil est l'écliptique. L'astrologie si elle a provoqué et provoque encore bien des errances a participé à ses débuts aux progrès de l'astronomie et est, à ce titre, intéressante dans l'histoire des idées.

Voici ce qu'écrivait Guillaume Bigourdan, membre de l'Académie des Sciences, en 1911.

« Les pronostics concernant la durée de la vie étaient fondés sur la longueur des arcs du zodiaque en temps, autrement dit sur la vitesse dont ils sont animés par suite du mouvement diurne. Un problème fondamental était celui des ascensions des signes du zodiaque, et pour connaître les durées de ces ascensions, il fallait projeter les arcs d'écliptique sur l'équateur : les durées d'ascension étaient dans les mêmes rapports que ces projections. On le voit les astronomes babyloniens avaient à résoudre le même problème que les astronomes d'aujourd'hui quand ils transformaient les longitudes célestes (ou degrés d'ascension oblique) en arcs de l'équateur (ou



FIG. 1.13 – La place des Herbes et la tour de l'horloge de Mantoue (Vue vers le sud).

d'ascension droite) ; ... d'autres exemples pourraient montrer encore la profonde influence de l'astrologie sur le progrès de l'astronomie».

1.3.6 L'horloge de Mantoue

1.3.6.1 L'histoire

La « Piazza delle Erbe » (Place des Herbes), au centre de Mantoue est avec le « Palazzo della Ragione » et la « Torre dell'Orologio » un des lieux les plus pittoresques de Mantoue. La figure 1.13 montre la masse imposante du Palais de la Région qui fut construit vers 1250. A droite du Palais se trouve la Tour de l'Horloge achevée en 1473 par Luca Fancelli.

Giovanni Manfredi dit « Giovani dell'orologio », constructeur de la première horloge publique de Mantoue en 1396 eut 4 fils qui poursuivirent la tradition horlogère de leur père, en particulier son fils aîné Bartoloméo. En 1474, un an après la fin des travaux, il est nommé « moderatore dell'orologio » avec un salaire mensuel de 20 livres mantovannes et l'exemption d'impôts. A sa mort en 1478, il laisse à ses fils un important héritage et le titre héréditaire de « temporatore dell'orologio ».

Pendant plus d'un siècle l'horloge fut régulièrement entretenue. Mais en 1722, l'horloge était entièrement détériorée et le cadran de 4,80 m enlevé. Une photographie de Ungerer [176] des années 1930 la montre dans un piteux état : l'ancien cadran astrolabique a été remplacé par un simple cadran horaire avec l'aiguille des heures et l'aiguille des minutes. En 1992 Alberto Gorla la restaure et lui redonne tout l'éclat de ses premières années [92].

1.3.6.2 La création de l'horloge

Dans une lettre du 29 juin 1473 [92], Manfredi décrit ainsi son œuvre au marquis Ludovico II Gonzaga (1412-1478).

« A l'illustre Prince et Excellent Seigneur, à mon Maître exceptionnel.

Pour satisfaire la promesse et le désir de Votre Seigneurie, avec beaucoup de sollicitude, j'ai enfin achevé la façade de l'horloge qui marque les heures ordinaires, les heures des astrologues et celles des planètes, l'accroissement et la diminution des jours, la marche du Soleil à travers les signes du zodiaque. Elle indique aussi de jour en jour et d'heure en heure le mouvement de la Lune et ses phases telles qu'on les voit dans le ciel, et son âge, et si elle se trouve au-dessus ou au-dessous de la terre. De plus on voit dans quel signe elle naît en Orient ou bien se baisse en Occident et comment elle est à midi et à minuit avec ses conjonctions et ses oppositions et ses quadratures, avec les jours critiques qu'il est utile de connaître. On peut y voir les temps propices pour les saignées, pour administrer les remèdes, pour faire des opérations chirurgicales, pour couper les habits et pour les endosser, pour les travaux des champs et pour les voyages. »

Mantoue, l'avant dernier jour de juin 1473. Archivio di Stato di Mantova, Archivio Gonzaga, busta 2416, c. 16^r d'après [92].

1.3.6.3 L'horloge et l'astrologie

En 1547, Pietro Adamo de' Michelli publia une description d'une quarantaine de pages de cette horloge avec une reproduction du cadran « della dichiaratione de l'horlogio di Mantova, seconda & nuova Editione, Illustra & abbellita in chio che prima era meno bella & oscura ».

Pietro Adamo donne de nombreux exemples de l'intérêt de l'horloge pour diverses activités humaines allant de l'agriculture à l'artisanat, du commerce à la médecine. Il explique ainsi par exemple comment trouver le voleur et son butin en se fondant sur l'autorité de Haly Halbohazen, qui écrivit sur le sujet au chapitre 34 (In latrone et furto) dans le Liber in iudiciis stellarum :

« Haly dit que suivant que le Soleil est dans un signe oriental, occidental, méridional ou septentrional, ainsi la maison du voleur sera orientée vers l'orient, l'occident, le sud ou le nord ; et que suivant le signe dans lequel se trouve la Lune, ainsi la porte du voleur se trouvera orientée vers ce signe ; et que suivant si la Lune est petite ou grande (en croissant ou gibbeuse), de même la porte sera petite ou grande⁴. »

1.3.6.4 Description du cadran

On remarque sur la photographie de gauche de la figure 1.15, que le cercle extérieur du cadran est divisé en 24 heures, et que le chiffre 24 est placé à droite du centre. Ce cadran permet de lire les heures italiques, c'est-à-dire le nombre d'heures écoulées depuis le coucher du Soleil.

Le cadran de l'horloge astronomique de Prague a été mis à côté de celui de Mantoue pour montrer que les heures italiques furent utilisées aussi dans toute l'Europe Centrale. Sur le cadran

⁴« Dice Haly che secundo ch'el Sole è in signo orientale, occidentale, meridionale o setentrionale, così la casa del latro è verso oriente, occidente, mezodi o setentrione, guardando dal loco dove è fatto el furto. Et così, secondo el signo nel qual è la Luna, così a quella parte guarda la porta del latro, et secundo che la Luna è grande o picola, cioè piena o vata, così la porta è grande o piccola. »



FIG. 1.14 – Frontispice de la deuxième édition de l'ouvrage de Pietro Adamo de' Michelli, 1547.

Biblioteca comunale di Mantova (d'après [92])

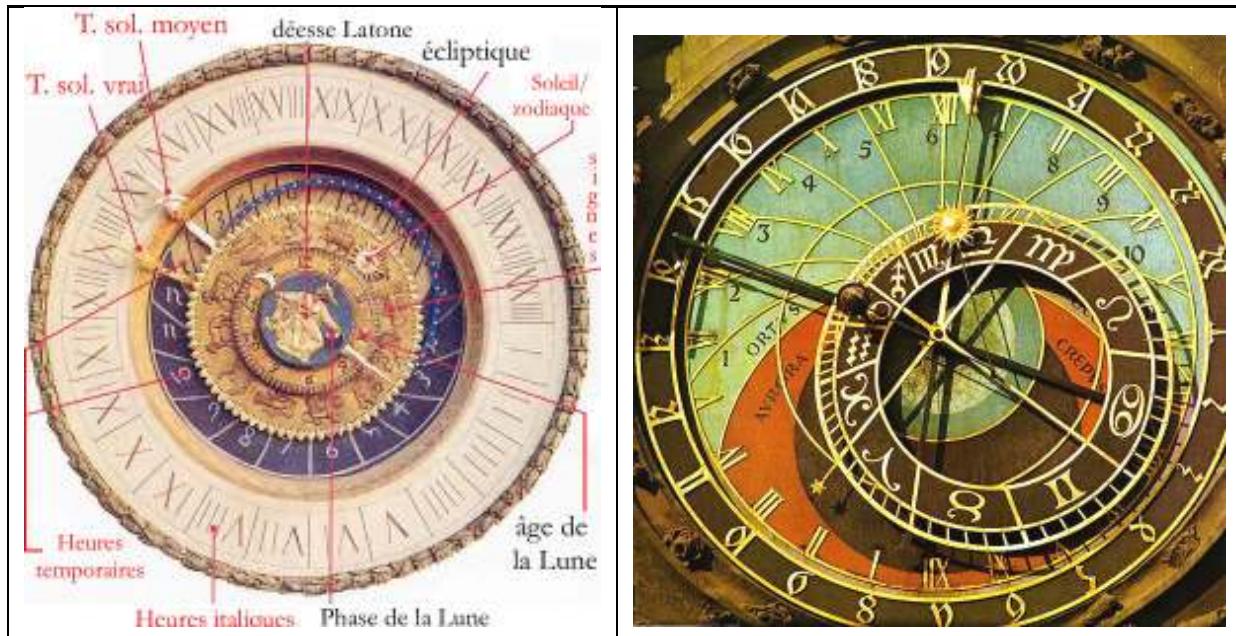


FIG. 1.15 – Les cadrans des horloges de Mantoue et de Prague (Clichés A. Gorla et J. Theubet).

de Prague [87], ce cercle pouvait accomplir (autrefois automatiquement, aujourd’hui manuellement) une rotation d’amplitude environ 60° permettant à la graduation 24 du cadran extérieur de correspondre avec les heures IV et VIII du cadran d’heure solaire. L’heure IV correspondant à l’heure du coucher du Soleil le 21 décembre, l’heure IX à l’heure du coucher du Soleil le 21 juin.

Sur les notices locales se rapportant à Mantoue on voit les heures temporaires appelées abusivement « Heures planétaires » [92].

1.4 L’horloge de Stralsund (Allemagne du Nord)

1.4.1 La Hanse

Au XIII^e siècle [74] un commerce très important (fourrures, bois, poissons, ambre, métaux en échange de sel, grains, draps, vins) se développe au nord de l’Europe le long de l’axe Novgorod-Riga-Lübeck-Bruges-Londres-La Rochelle. Au sud de la Mer Baltique se construisirent les horloges astronomiques de Stralsund (1394), Bad Doberan (1390), Gdansk (1470), Hamburg (1382), Lünd (1380), Lübeck (1405), Stendal (1580 environ), Rostock (1379), Münster (1408), Wismar (1435). En 1234, Stralsund reçut les mêmes droits et libertés que Rostock et en 1294, elle entre dans la Hanse avec Lübeck, Wismar, Rostock et Greifswald. La ville connut alors un développement rapide dont témoignent les trois églises gothiques Sainte-Marie, Saint-Nicolas et Saint-Jacob. L’église paroissiale Saint-Nicolas, la plus vieille de la ville, est dédiée au saint patron des marins et cache derrière l’autel une des plus vieilles horloges astronomiques d’Europe [61].

1.4. L'HORLOGE DE STRALSUND (ALLEMAGNE DU NORD)



FIG. 1.16 – Les villes de la Hanse au XIV^e siècle.

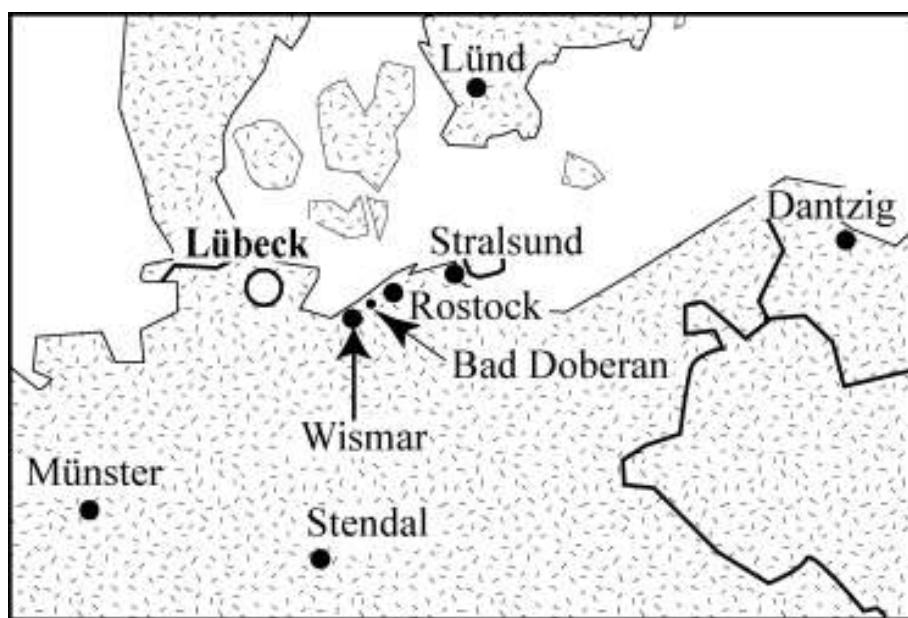


FIG. 1.17 – Les horloges astronomiques du pourtour de la mer Baltique.



FIG. 1.18 – Stralsund : la dédicace de l'horloge.

1.4.2 Le bahut de l'horloge

Encore en bon état le bahut de bois possède un cadran astrolabique à 3 mètres du sol, protégé sur sa partie basse par une grille derrière laquelle aurait dû se trouver la roue du calendrier, comme à Rostock, Münster et Lünd. A mi-hauteur, entre cette grille et le cadran astrolabique, l'horloge porte la date de son achèvement :

ANNO D(OMI)NI M CCC XC IIII IN DIE S(AN)CT(I) NICOLAI CO(M)PLETU(M)
EST OP(US) P(ER) NICOLAU(M) LILLIENVELT ORATE P(RO) F(AC)TORIB(US)
ET LARGITORIBUS Q(UI) C(UM) DILI(G)ENCIA CO(M)PLER(U)NT

En l'année 1394, le jour de la saint Nicolas, fut achevé l'ouvrage de Nicolaus
Lillienveld. Priez pour ses auteurs et ses généreux fondateurs qui l'ont fait avec zèle.

Ainsi à partir du 6 décembre 1394 elle put être admirée par les fidèles de l'Église, mais l'ensemble de son histoire reste mal connu. On pense seulement qu'elle subit de sévères dommages le 10 avril 1525, lors du saccage des Églises de Stralsund, et qu'elle ne fonctionne plus depuis cette date. Les peintures du cadran et du bahut furent refaites avec soin à l'occasion du sixième centenaire de l'horloge.

1.4.3 Le cadran astrolabique

Il comprend successivement en allant de l'extérieur vers l'intérieur (Figure 1.19)

- 24 chiffres romains gothiques à 2 fois 12 heures avec points repérant les demi-heures
- une couronne de 72 points repérant pour chaque heure, 10, 20, 30, 40, 50 minutes
- 24 divisions pour la rose des vents avec indications ; à gauche : oriens (est), en haut meridiennes (midi ou sud), à droite : occidens (ouest), en bas septentrio (nord)



FIG. 1.19 – Stralsund : l'ensemble de l'horloge astronomique et son astrolabe.

- le tympan central calculé pour la ville de Stralsund, en projection stéréographique de pôle Nord, avec vue du Nord.

Les quatre types de projections stéréographiques (Figure 1.20)

Les astrolabes manuels sont toujours du type de projection pôle Sud, l'observateur étant au pôle Nord. Telles sont aussi les horloges astrolabiques de Lyon, Oslo...

On rencontre les autres types de projection sur certaines horloges astronomiques.

Projection de pôle Nord, observateur étant au pôle Nord : horloges de Stralsund, Prague, Lund

Projection de pôle Sud, observateur étant au pôle Sud : horloge de Münster (ainsi l'aiguille du Soleil tourne en sens anti-horaire pour son mouvement diurne !). C'est aussi le type de projection utilisé dans les cartes du ciel comme le montre la figure 1.21.

L'araignée de l'astrolabe est réduite au cercle écliptique. Une aiguille solaire et une aiguille lunaire permettaient de connaître la position de ces astres sur l'écliptique. L'aiguille lunaire est composée d'un tube qui permettait de transmettre à son extrémité une rotation à une sphère moitié claire moitié sombre pour représenter les phases de la Lune.

CHAPITRE 1. LES PREMIÈRES HORLOGES ASTRONOMIQUES MÉCANIQUES

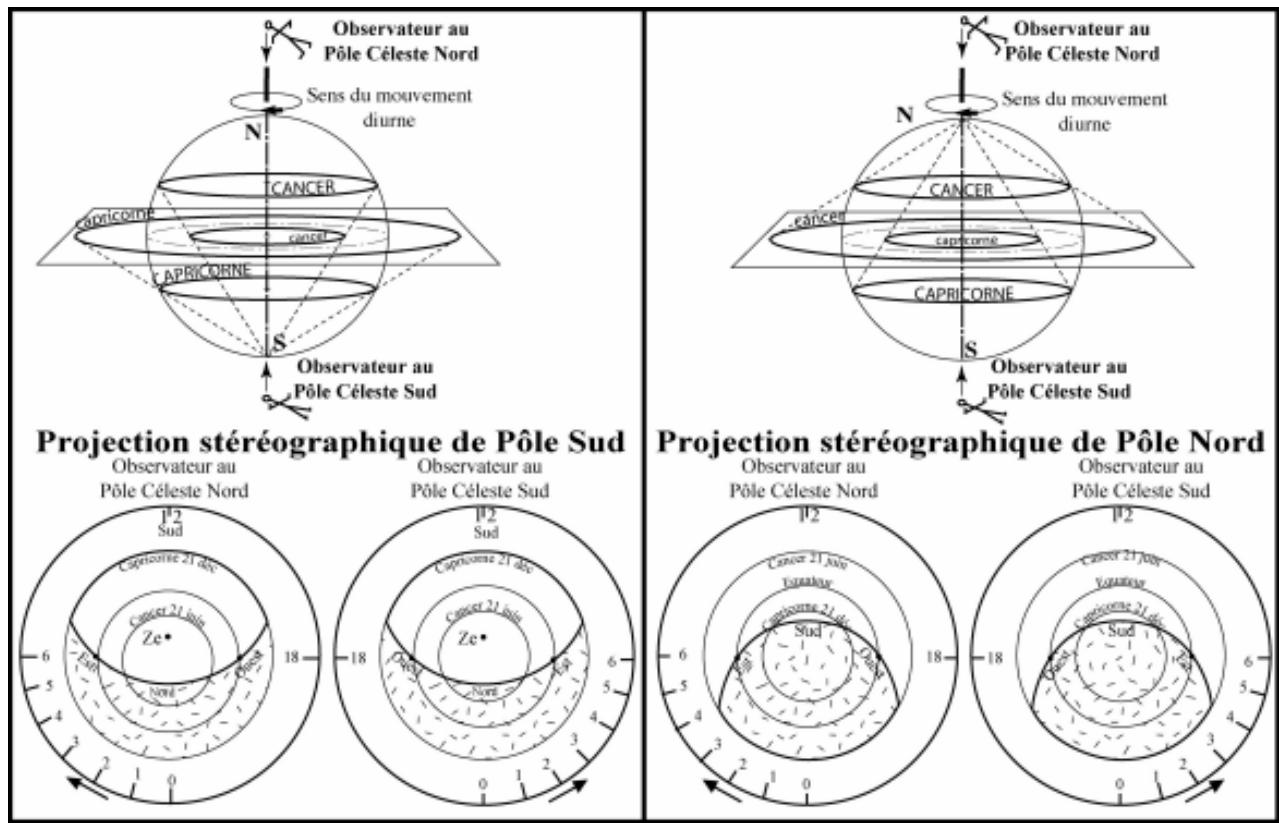


FIG. 1.20 – Les 4 types de projections astrolabiques.

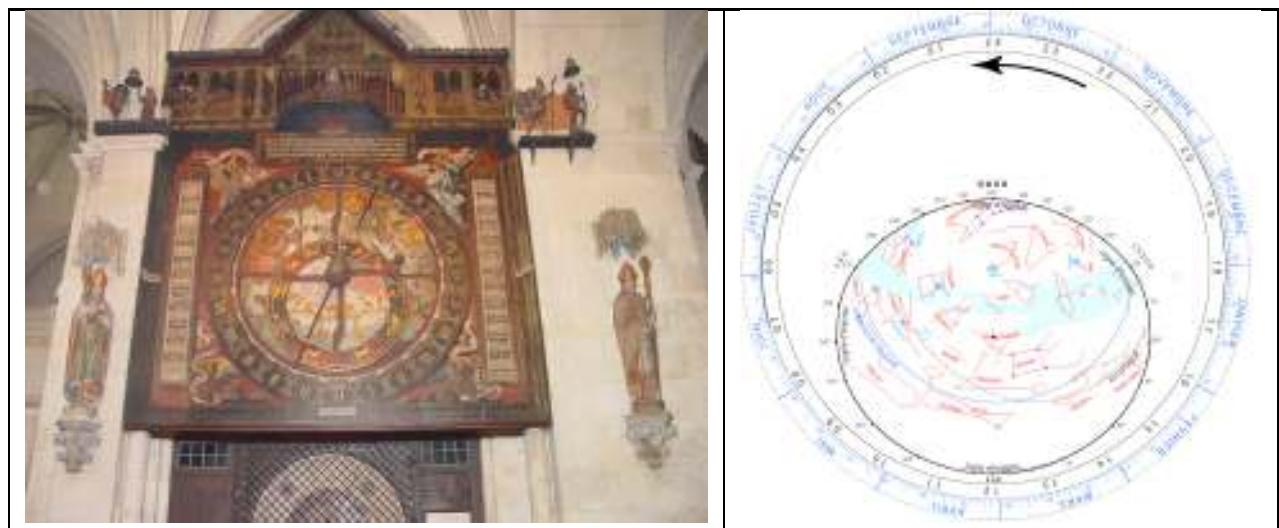


FIG. 1.21 – Astrolabe de l'horloge de Münster et carte du ciel.



FIG. 1.22 – Stralsund : les quatre astrologues du cadran astrolabique.

1.4.4 Les textes des phylactères

1.4.4.1 Les 4 astrologues

Les quatre « astrologues-astronomes » représentés dans les angles sont accompagnés de sentences. La présence de personnages est habituelle dans ces horloges astronomiques du Nord de l'Europe, comme le montre le tableau ci-dessous.

		État actuel	En haut à g.	En haut à d.	En bas à d.	En bas à g.
Rostock	1379	restaurée 1650	Ange / Mathieu	Aigle / Jean	Taureau / Marc	Lion / Luc
Bad Doberan	1390	reste le cadran	Ptolémée	Alphonse X	Albumasar	Hali
Stralsund	1394	reste le cadran	Ptolémée	Alphonse X	Albumasar	Hali
Lübeck	1405	détruite 1942	Ptolémée	Platon	Albumasar	Aristote
Münster	1408	restaurée 1550	Aigle	Ange	Lion	Taureau
Lünd	1410	refaite 1923	astronome couronné	astronome couronné	astronome chapeau pointu	astronome turban
Stendal	1410		astrologue	astrologue	astrologue	astrologue
Wismar	1435	détruite 1945	tête d'un vent	t. vent	t. vent	t. vent
Gdansk	1470	détruite 1945				

A Stralsund, on peut voir comme le montre la figure 1.22 : Ptolémée, Alphonse X de Castille, Hali, Albumasar.

Claude Ptolémée (83-161) : astronome et géographe grec qui vécut à Alexandrie. Son ouvrage principal « Syntaxe mathématique » (appelé par les Arabes « Almageste », la grande œuvre) contient une explication claire du système du monde dans un repère géocentrique (mouvement du Soleil, de la Lune et des 5 planètes visibles à l'œil nu avec la Terre fixe). Soit en raison de son importance, soit parce qu'il aurait été confondu avec les pharaons égyptiens, il est représenté fréquemment avec une couronne royale.

Alphonse X (1226-1284) : roi de Léon et de Castille protecteur des Arts et des Sciences. C'est sous son règne que furent écrites par une cinquantaine de savants juifs, chrétiens et musulmans les Tables Alphonsines (1248-1252), tables donnant les mouvements des planètes d'après le système de Ptolémée. Ces Tables furent diffusées sous forme de manuscrits dans toute l'Europe puis elles furent imprimées dès 1483 et rééditées de nombreuses fois avant la parution des Tables Rodolphines de Kepler en 1627.

Albumasar (« Abu-l-Ma'shar ») : il serait né à Balkh en Afghanistan vers 776 et mort à Wasith près de Bagdad en 886 !. Auteur de divers traités d'astrologie de peu de valeur, sa réputation fut pourtant très importante parmi ses contemporains. Il est connu pour sa théorie du monde dont la création aurait eu lieu lorsque les sept planètes étaient en conjonction à la longitude 0° du Bélier, et dont la fin aura lieu lorsque les planètes seront en conjonction à la longitude 30° des Poissons !

Abenrodano (Ali Ibn Ridwan « Abu-l-Hasan 'Ali ibn Ridwan ») : né en Égypte vers 988 mort en 1061 ou 1067. Il étudia la médecine et la philosophie puis dut pour gagner sa vie se consacrer à l'astrologie. Il est connu pour ses commentaires des œuvres de Galien, Hippocrate et des livres astrologiques de Ptolémée.

Les traductions des phylactères :

1. En haut à gauche avec Ptolémée

INFERIORA REGUNTUR A SUPERIORIBUS

Les choses inférieures sont régies par les choses supérieures⁵.

2. En bas à gauche avec Hali

DIES EST ELEVACIO SOLIS SUPER ORIZONTEM

Le jour est l'élévation du Soleil au-dessus de l'horizon.

3. En haut à droite avec Alphonse de Castille

MOTUS SOLIS ET PLANETARUM IN OBLIQUO CIRCULO

Le mouvement du Soleil et des planètes a lieu sur un cercle oblique

4. En bas à droite avec Albumasar

SAPIENS VIR DOMINABITUR ASTRIS

L'homme sage dominera les étoiles⁶

⁵C'est à dire : la Terre est régie par le Ciel.

⁶Remarque : le verbe dominor est déponent c'est-à-dire de forme passive et de sens actif



FIG. 1.23 – Stralsund : les deux personnages encadrant le bas de l'horloge.

1.4.4.2 Les deux personnages de part et d'autre de la grille

De part et d'autre de la grille, en bas, deux personnages représentant le matin et le soir de la vie actionnent une porte ; celui de gauche l'ouvre, celui de droite la referme.

1. Figure en bas à gauche

POST DEUM OMNIUM VIVENCIUM VITA SOL ET LUNA
Après Dieu, le Soleil et la Lune donnent la vie aux êtres vivants

2. Figure en bas à droite

MATUTINAE IMMENSA MUNERA SED SEPE MALE FINIUNT.
Les jours nous offrent d'immenses dons le matin, mais finissent souvent mal

1.4.4.3 Le clin d'œil des artisans

A la fin du Moyen Age, on ne manquait ni de science dans la découverte des astres et des mécanismes imitant leurs mouvements, ni d'esprit humoriste comme le montre la figure 1.24 du maître horloger observant les passants qui contemplent son œuvre.



FIG. 1.24 – Stralsund : l'horloger à sa fenêtre.

1.5 L'horloge astronomique de l'Hôtel de Ville de Prague

Des textes prouvent l'existence d'une horloge publique à Prague vers 1354, mais on ignore où celle-ci se trouvait ([182], page 138).

La tour que l'on voit sur la figure 1.25, haute de 70 m fut achevée en 1381 en même temps que l'Hôtel de Ville auquel elle est contigüe.

Pendant longtemps, on a cru que l'horloge qui est adossée au côté Sud, avait été construite en 1490 par le maître horloger Jan Hanus et son assistant Jakub Cech [179]. En fait, la première information relative à une horloge installée sur l'hôtel de ville remonte à 1381 ([176] page 234 et [87]), et l'horloge astronomique a été construite vers 1410 par le maître horloger Nikolaus von Kaadan en collaboration avec Jan Ondrejuv appelé Sindel, professeur de mathématiques et d'astronomie à l'université Charles de Prague. En 1490, Hanus ne fit que remanier le mécanisme. Le cadran astrolabique existait dès l'origine et le cadran du calendrier fut ajouté vraisemblablement en 1490. A cette même époque, la façade fut richement décorée de sculptures en pierre dans le style gothique de Vladislav (l'équivalent du gothique flamboyant) par des artisans maçons et sculpteurs dirigés par Peter Parler.

L'horloge fut restaurée de nombreuses fois (en 1552, 1659, 1787, 1864) et finalement reconstruite en 1948 après la destruction de l'hôtel de ville dans les derniers jours de la Seconde Guerre mondiale.

1.5. L'HORLOGE ASTRONOMIQUE DE L'HÔTEL DE VILLE DE PRAGUE

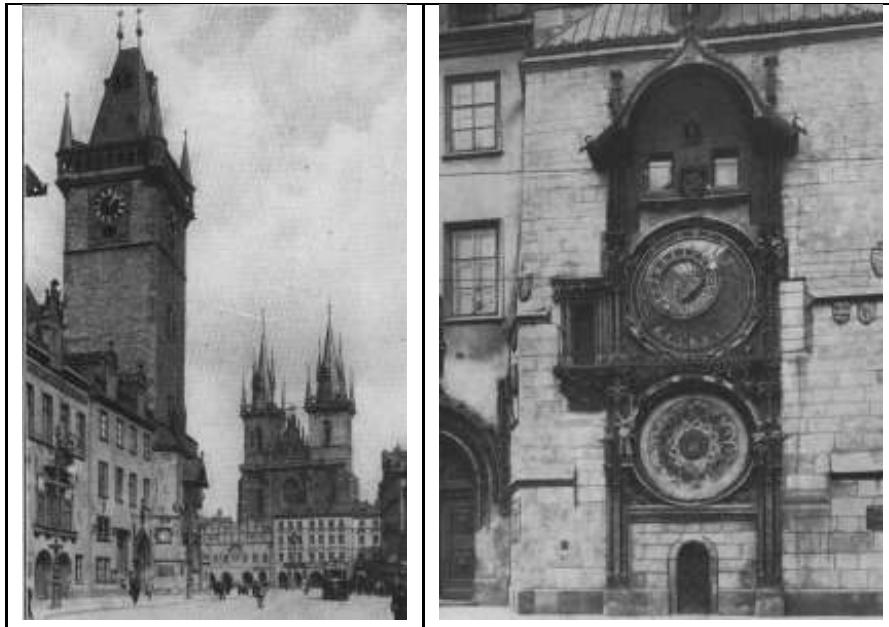


FIG. 1.25 – Prague : le beffroi de l'hôtel de ville et l'Horloge [174].

1.5.1 Le cadran astrolabique

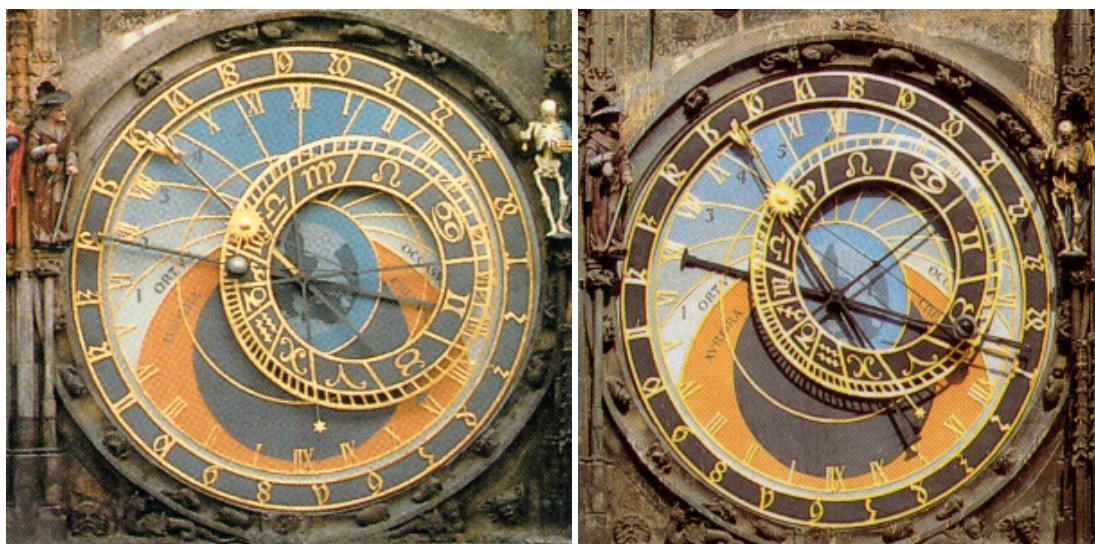


FIG. 1.26 – L'astrolabe de l'horloge astronomique de Prague.

L'aiguille portant le Soleil donne sur le cadran extérieur l'heure italique, sur le cadran intérieur, l'heure temporaire. L'aiguille portant l'étoile donne l'heure sidérale. L'aiguille portant la Lune donne sa phase (boule tournante), sa position sur le Zodiaque et son élévation par rapport au Soleil.

A gauche : 1^{er} nov., II h temporaire, 16h italique, 11h30 sidérale, dernier croissant de Lune.

A droite : 15 sept., IV h temporaire, 15h30 italique, 9h30 sidérale, 2 jours avant la Pleine Lune.

On peut d'abord remarquer que les heures reprennent les heures italiennes, laissant penser que la technique vient aussi d'Italie [78].

L'astrolabe est du type projection stéréographique équatoriale de pôle Nord. Comme l'a montré Horsky dans son article [102], les cadrants des horloges astronomiques les plus anciennes en Europe sont de ce type : sur le pourtour de la mer Baltique, Lünd (1380), Stralsund (1394) et Doberan (1390 d'après [66]), Wismar (1435), Lübeck (1405), dans le chœur de la cathédrale de Chartres (1407), à Berne (1405 au plus tard 1467 d'après [46] page 34), à Bourges (1440). Horsky cite également les cadrants disparus de Villingen (1401) et de Francfort (1379-1384), construits d'après celui de Strasbourg (1354), ainsi que le cadran primitif de Stendal.

1.5.2 Le cadran inférieur

Sous le cadran astrolabique, le cadran inférieur représente un calendrier annuel de 365 jours. Un index pointe le quantième du mois, la lettre du jour de la semaine (de la lettre a à la lettre g), le nom du saint ou de la fête. Lors des années bissextiles, le disque reste immobile deux jours sur le 28 février. Autour sont peints douze petits médaillons représentant les signes du zodiaque puis douze grands médaillons représentant de façon allégorique les douze mois par des scènes de travaux des champs.

Le centre du cadran inférieur : les armoiries de Prague Le milieu de ce cadran est orné des armes de la ville de Prague. Ces armes représentent une porte d'enceinte à deux vantaux, ouverte dans une muraille crénelée et surmontée de trois tours. Le dextrochère d'argent, armé d'une épée et sortant de la porte, ne fut concédé à Prague que par Ferdinand III, en récompense de la résistance opposée aux Suédois pendant la guerre de Trente ans. C'est pour cela que le blason de l'horloge antérieure à cette guerre (1618-1648) ne le comporte pas sous la herse à demi-levée.

Quelques remarques à propos de ce blason :

- Les armes d'origine étaient une muraille d'argent ouverte d'une porte ...
- Elle est devenue une muraille d'or par décision de l'empereur Frédéric III⁷
- L'empereur Ferdinand III⁸ y ajouta le dextrochère
- Le dextrochère a disparu sur certains blasons pour faire place au lion de Bohème dans l'ouverture de la porte. Sur ces blasons, la tour centrale est remplacée par un homme d'armes debout derrière les créneaux, portant au bras gauche un bouclier orné de l'aigle impériale et brandissant une bannière impériale.
- La devise d'origine était « PRAHA, CAPUT REGNI » et en 1926 lorsque furent redéfinies les armes de Prague, elle devient « PRAHA, MATKA MEST » c'est-à-dire « Prague, mère des cités ». Après la Seconde Guerre mondiale, elle est devenue « PRAHA, CAPUT REIPUBLICAE » (Figure 1.28 image 3).

⁷Frédéric III, né en 1415, empereur en 1440, mort en 1443.

⁸Ferdinand III : né en 1608, empereur en 1637, mort en 1657. C'est lui qui adopta la devise des Habsbourg : « Austriae est imperare orbi universo » dont les initiales sont parfois employées seules : A.E.I.O.U.

1.5. L'HORLOGE ASTRONOMIQUE DE L'HÔTEL DE VILLE DE PRAGUE

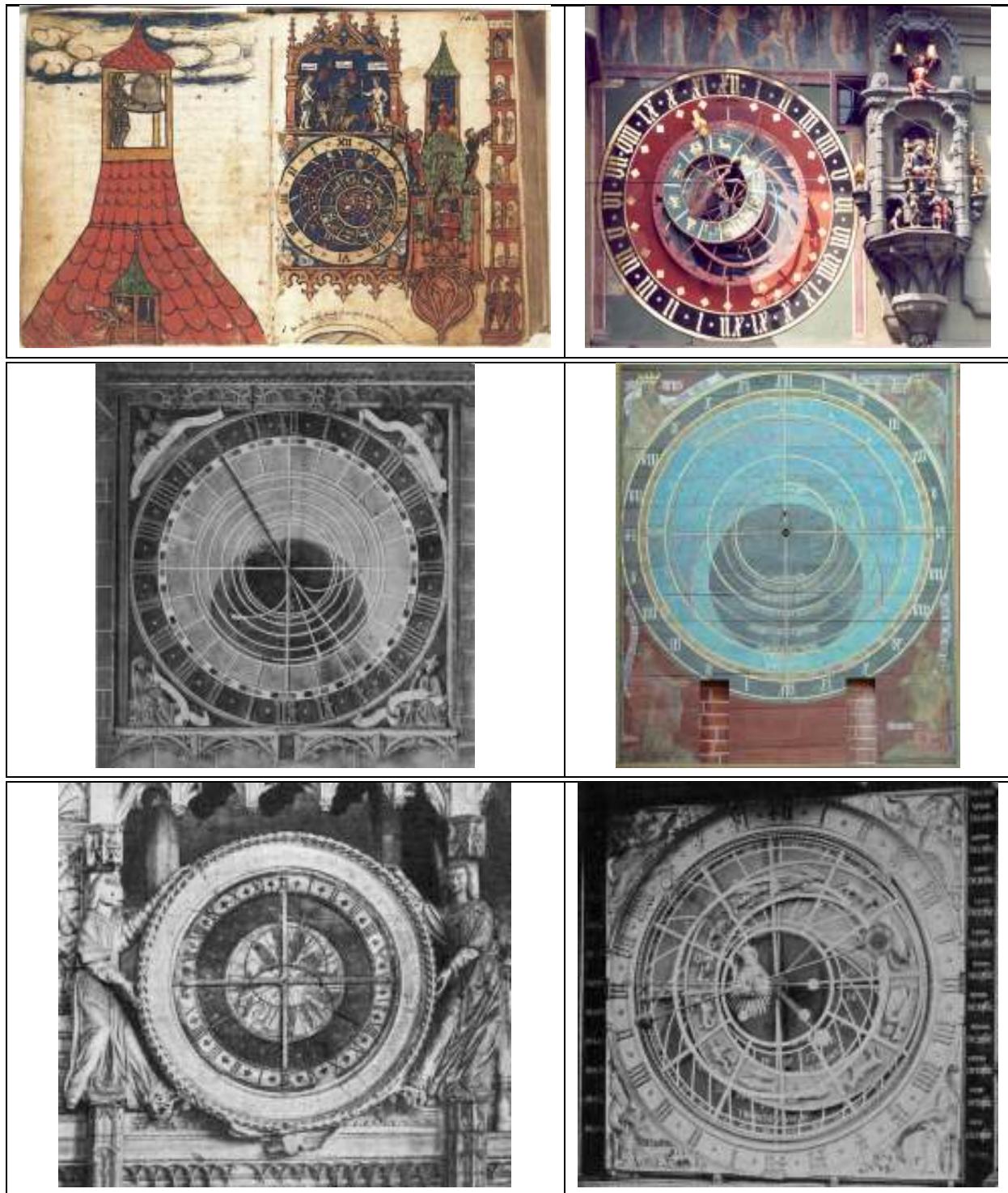


FIG. 1.27 – Cadrans en projection stéréographique de pôle Nord

De gauche à droite : Berne (dessin de 1537 et cliché 2003), Lund (ancien cadran), Doberan, Chartres, Lübeck (ancien cadran). Clichés anciens d'après [192]



FIG. 1.28 – Armoiries de Prague.

1 :Horloge astronomique. 2 :Période impériale. 3 :Grandes armes modernes.

1.5.3 Les automates

Au XVII^e siècle furent ajoutées les automates latéraux, la Mort, l’Avarice, le Turc et la Jalouzie qui bougent lorsque tinte la clochette du campanile. En 1865, on remplaça l’ancien échappement par un échappement Denison, du même type que celui installé dans Big-Ben en 1859. En 1882, on ajouta un coq qui sort et chante au-dessus des apôtres.

1.6 Horloges astronomiques médiévales en Europe

Nous avons classé suivant une typologie établie par Emmanuel Poulle [146] l’ensemble des horloges astronomiques que nous connaissons. (Figure 1.29 et légende figure 1.30).

1.6.1 Horloges astrolabiques

Nous avons précédemment évoqué les horloges astrolabiques dont nous avons donné de nombreux exemples. Sur ces astrolabes, le cercle écliptique (portant le zodiaque) est presque toujours tracé, et il est donc représenté excentriquement par rapport à l’axe des Pôles et au cercle de l’équateur.

La figure 1.31 met en parallèle l’astrolabe en projection Sud (Winterthur) et Nord (Augsbourg).

Certaines des horloges situées sur la carte ont disparu (Tours [114, 117], Francfort, Wismar, Osnabrück). D’autres ont été remplacées par de plus récentes (Strasbourg II, Lübeck Sainte-Marie, Stendal [71, 72]).

1.6.2 Horloge à zodiaque concentrique mobile

Nous donnons à la figure 1.32 les deux exemples de Padoue et de Hampton Court [97]

1.6.3 Horloge à zodiaque concentrique fixe

La figure 1.33 montre l'horloge de Mellingen dans le canton d'Argovie, en Suisse. Dans les anciens rouages de celle-ci figure l'année de réalisation, 1544, qui est aussi l'année de construction de la porte de la ville. Les horloges de Zoug, Schaffhouse, Sion ainsi que celle de Soleure lui ressemblent beaucoup.

1.6.4 Horloge avec seulement la Lune et le Soleil

C'est le cas des horloges astronomiques du Sud de l'Angleterre : Exeter, Ottery Saint-Mary et Wimborne. L'horloge d'Ottery, qui est montrée figure 1.34, est l'une des plus vieilles du royaume d'Angleterre (XIV^e siècle).

1.6.5 Horloges indiquant uniquement les phases de la Lune

1.6.5.1 Phases de la Lune indiquées grâce à un double demi-cercle.

Derrière le double demi-cercle, tourne un disque sur lequel sont peints deux cercles blancs ou jaunes. Ce disque accomplit un tour en deux lunaisons.

L'horloge à carillon de la cathédrale de Beauvais [45], datant du XIV^e siècle, illustre magnifiquement ce dispositif [26].

1.6.5.2 Phases de la Lune indiquées par une fenêtre circulaire

Derrière la fenêtre (Figure 1.37) tourne un disque sur lequel est peinte une tache noire en forme de cœur permettant de reproduire au mieux les différentes phases : croissants, quartiers et Lunes gibbeuses. Ce cercle accomplit un tour par lunaison. On peut aussi parfois lire le jour dans la lunaison. Ce type d'indication se trouvait sur l'horloge de l'église Saint-Pierre de Lübeck (Figure 1.36) et peut se voir aussi sur les horloges de Crémone [29, 118], Ochsenfurth, Rostock, Gdansk, Hampton Court [97], Wells [132] ...

1.6.5.3 Phases de la Lune indiquées par une boule tournante isolée

Cette boule à moitié dorée ou argentée sur un hémisphère, et noire sur l'autre. Le « Gros Horloge » de Rouen est pourvu d'un tel mécanisme (Figure 1.38).

Notre plan ne mentionne que pour mémoire cette horloge très célèbre de Rouen [140] mais l'Europe en compte bien d'autres (Fécamp, Hôtel de Ville de Lyon...). D'autre part de nombreuses horloges astrolabiques ou à zodiaque concentrique sont pourvues de cette Lune supplémentaire (Mellingen, Schaffhausen, Sion, Soleure, Zoug...)



Horloges astronomiques

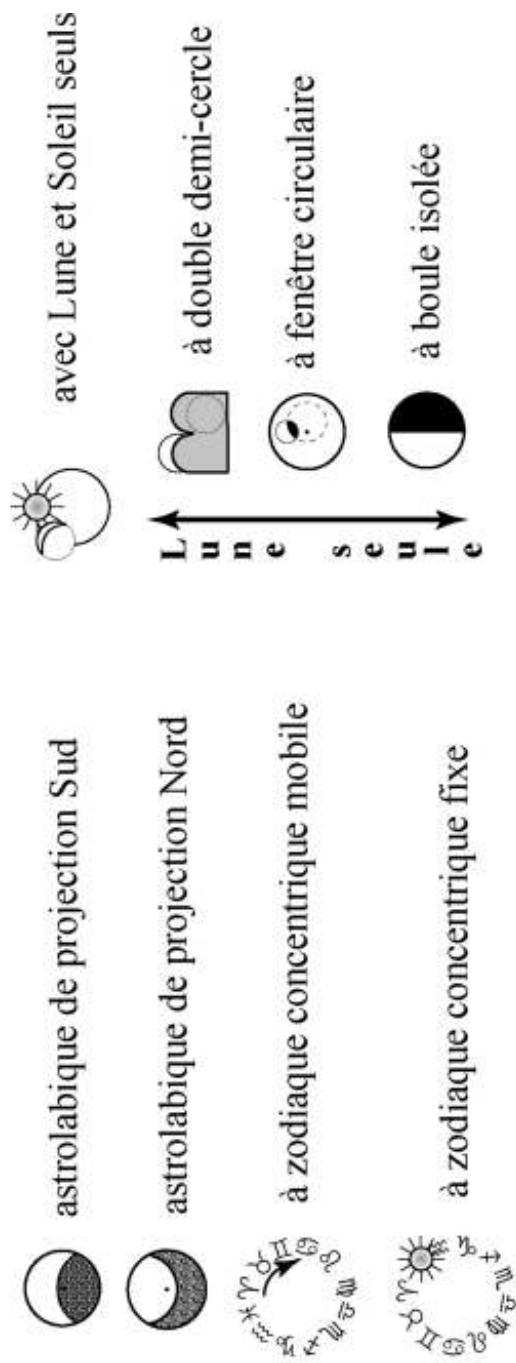


FIG. 1.30 – Légende de la carte des horloges astronomiques (Figure 1.29).

Les horloges des villes en caractères italiques ont disparu.



FIG. 1.31 – Astrolabe de l'horloge de Winterthur à gauche (Musée Lindengut de Winterthur [89]) et horloge d'Augsbourg à droite (gravure de la Bibliothèque de Munich [176]).

La figure de droite est extraite d'une description de l'horloger Tobie Klieber qui la réalisa en 1594. L'horloge présente une grande similitude avec celle de Strasbourg II et celle de Lyon. Elle fut enlevée de son emplacement dans la cathédrale et démolie en 1609 par l'évêque d'Augsbourg (d'après [176]).

1.6. HORLOGES ASTRONOMIQUES MÉDIÉVALES EN EUROPE



FIG. 1.32 – Horloge de Padoue et de Hampton Court : à zodiaque concentrique mobile.



FIG. 1.33 – Horloge de Mellingen (Suisse) : à zodiaque concentrique fixe.

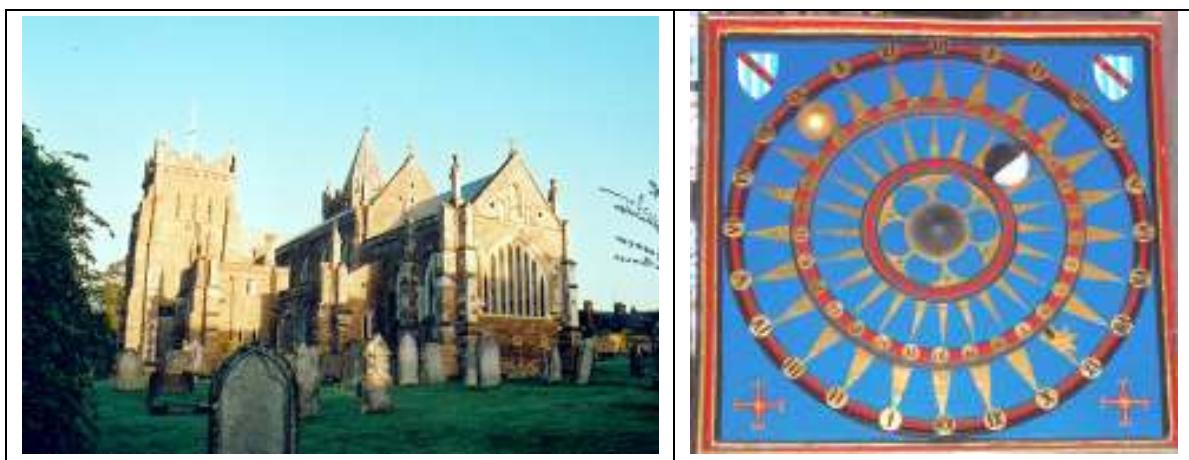


FIG. 1.34 – L'église d'Ottery Saint-Mary et son horloge

La boule jaune, représentant le Soleil, accomplit une révolution en un jour solaire et donne l'heure.

La boule mi-blanche mi-noire, représentant la Lune, accomplit une révolution en un jour lunaire et montre l'elongation de celle-ci par rapport au Soleil. Cette boule tourne aussi sur elle-même ce qui permet de reproduire les phases de la Lune [188].

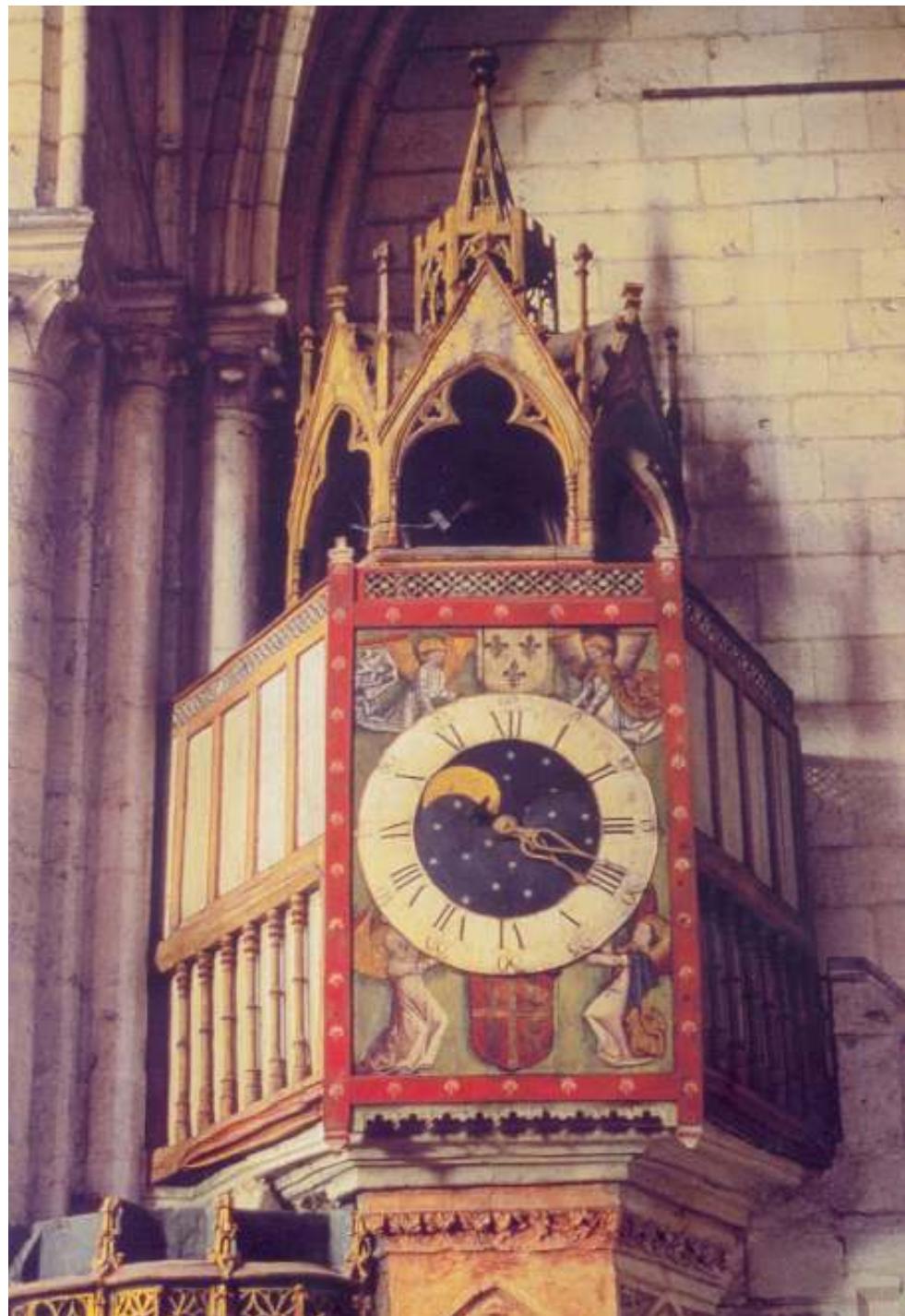


FIG. 1.35 – Horloge à carillon de la cathédrale de Beauvais.

Le double demi-cercle est placé devant un disque sur lequel sont peints deux cercles jaunes. Ce disque fait un demi-tour par lunaison ce qui permet de représenter les phases de la Lune [45, 26].



FIG. 1.36 – Horloge astronomique de l'église Saint-Pierre de Lübeck.

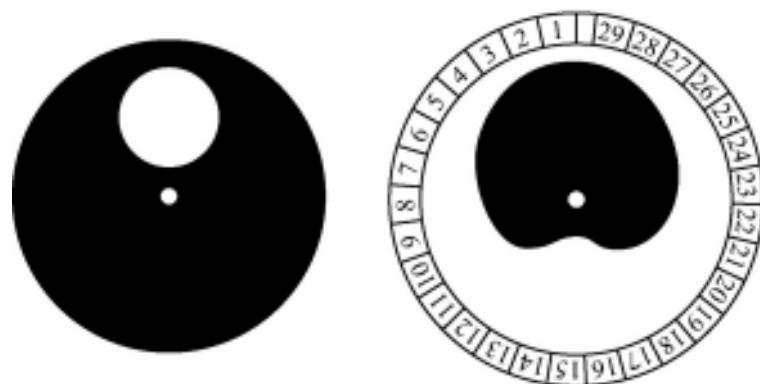


FIG. 1.37 – Phase de la Lune indiquée par une fenêtre ou « guichet » circulaire.



FIG. 1.38 – Le « gros horloge » à Rouen.

La boule à moitié dorée à moitié grise placée au-dessus du cadran, représente les phases de la Lune.

Chapitre 2

Échappements et oscillateurs

2.1 Les horloges à foliot, verge et roue de rencontre

2.1.1 Les trois composantes d'une horloge

Toutes les horloges à partir du début du XIV^e siècle et jusqu'à la fin du XVII^e seront équipées du dispositif à foliot, verge et roue de rencontre.

Le moteur

Le moteur sera exclusivement un poids jusqu'à l'utilisation du « ressort moteur » qui permettra la fabrication d'horloges de table et de montres à partir du XV^e siècle.

L'oscillateur Les inventions d'Huygens de 1657 (pendule régulateur) et de 1675 (spirale réglante) ne remplacèrent le foliot qu'à fin du XVII^e siècle. On ne peut d'ailleurs pas vraiment parler d'oscillateur à propos du foliot, puisque celui-ci n'a pas de période propre, comme on le verra au paragraphe 2.1.2.

L'échappement L'échappement à roue de rencontre (ou à « palettes » ou à « verge ») est très robuste. Il fut très apprécié des horlogers jusqu'au XIX^e siècle. Ni l'échappement à ancre à recul de Hooke en 1666, ni l'ancre à repos de Graham en 1715, ni les progrès du XVIII^e siècle n'entamèrent son prestige¹. Dans toutes les horloges mécaniques monumentales, on remplaça le foliot par un pendule assez rapidement après l'invention de Huygens, mais la roue de rencontre resta en place longtemps.

Pourtant les inconvénients sont importants :

- les frottements sont considérables.
- il y a un recul et un choc avec les palettes.

¹La quatrième horloge de Harrison H4 qui remporta le prix des Longitudes en 1760 était à roue de rencontre.

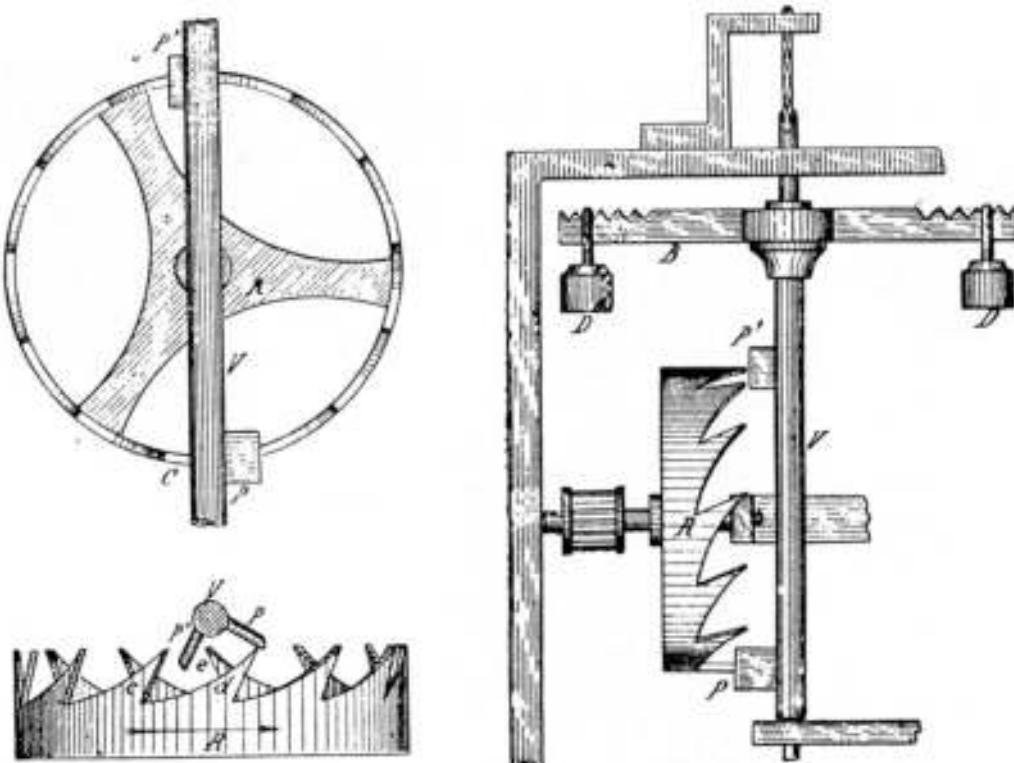


FIG. 2.1 – Horloge à foliot, verge et roue de rencontre.

- il faut une assez grande amplitude d’oscillation et le pendule n’est un bon oscillateur que pour les faibles amplitudes.

2.1.2 Principe de fonctionnement

2.1.2.1 Les différentes pièces

Il est un peu difficile pour qui n’a pas vu une horloge à foliot, d’en imaginer le fonctionnement. On peut en voir certaines en marche, sur le site internet de l’École Normale Supérieure de Lyon, dont une horloge du XIV^e siècle, remise en état par Monsieur Paul Réal, expert auprès du Musée du Temps de Besançon². Une horloge à foliot complète est représentée en annexe, page 298.

La description qui suit renvoie à la figure 2.1 extraite du livre de Charles Gros sur les échappements [94].

On voit très bien, sur la vue de droite, la roue de champ **R**, appelée « roue de rencontre ». Cette roue est entraînée par le poids (invisible sur la figure). L’engrènement de la palette supérieure **p'** fait tourner la verge **V** d’axe vertical. Celle-ci possède une inertie importante à cause des

²<http://www.ens-lyon.fr/RELIE/Cadrans/Musee/Pages/PagesGr/MuFoliotGr.htm>

2.1. LES HORLOGES À FOLIOT, VERGE ET ROUE DE RENCONTRE

régules **DD** placés sur la barre **B**, cet ensemble constituant le foliot. La rotation de la verge **V** autour de son axe va donc s'effectuer lentement en raison de son inertie, et, à un certain angle, l'engrènement de la roue **R** avec la palette **p'** va cesser ; la roue **R** pourra tourner librement, mais un bref instant seulement, car sa dent opposée va intercepter la palette inférieure **p** en la heurtant. La verge va alors tourner en sens rétrograde avec le foliot, d'abord poussée par la palette **p**, puis librement jusqu'à ce qu'intervienne à nouveau la palette **p'** et ainsi de suite...

En général les deux palettes **p** et **p'** sont à angle droit comme on le voit sur la figure en bas à gauche.

Lors de la rencontre palette / roue de rencontre, la roue est repoussée jusqu'à ce que l'élan du foliot soit amorti : la roue de rencontre a donc un mouvement alternatif qu'on décrit en disant « trois pas en avant, un pas en arrière » et nommé le « recul ». Les horloges à foliot restaurées à notre époque ont pu avoir jusqu'à la précision étonnante de 10 à 20 min par jour.

2.1.2.2 Les étapes du mouvement

Une description détaillée du fonctionnement de l'échappement à foliot, verge et roue de rencontre nous permettra de comprendre les différences fondamentales avec un pendule de torsion et l'intérêt du pendule régulateur de Huygens.

Supposons avec Henri Bouasse [28] que la roue de rencontre ait seulement 11 dents comme sur la figure 2.1.

Les deux schémas de la figure 2.2 montrent l'oscillateur **M** avec sa roue de rencontre.

Sur la vue du haut, la roue de rencontre est vue par dessus avec en pointillés sa partie inférieure.

Sur la vue du bas, la roue est remplacée par deux lames dentées **L** et **L'** se déplaçant à la même vitesse : les deux palettes **P** et **P'** peuvent être considérées comme les bords d'un secteur angulaire oscillant entre les deux lames.

Sur les deux vues la palette **P'** vient de quitter la dent **B'** (dans le sens de la flèche), et peu de temps après, la palette **P** rencontre la pointe de la dent **B**. En raison de l'inertie de l'oscillateur **MM** et de sa vitesse, la roue de rencontre recule dans un premier temps. L'oscillateur **MM** perd de sa vitesse puis revient en arrière, poussé par la dent **B** qui avance en agissant sur **P**, et la roue de rencontre **LL'** avance.

La lame **L'** avance donc vers la droite de sorte que lorsque la palette **P** échappe à la dent **B**, la palette **P'** rencontre la dent **B'** après une légère chute sans résistance ; lors de cette rencontre la roue **LL'** recule puis avance ...

L'oscillateur **MM**, n'est soumis à aucune autre force capable de le faire osciller : il est renvoyé successivement d'une lame **L** à l'autre lame **L'** comme une balle entre deux raquettes.

Soit θ l'écart de l'axe du foliot avec sa position moyenne.

Si le couple **C** exercé par les lames sur les palettes était constant, il y aurait entre l'angle parcouru θ , le moment d'inertie **I** et le temps **t** la relation : $\theta = \frac{1}{2} \frac{C}{I} t^2$ soit $t = \sqrt{\frac{2I\theta}{C}}$. Comme l'amplitude θ reste pratiquement constante, la « période » est proportionnelle à la racine carrée de l'inverse du couple (en réalité θ augmente si le couple augmente) et à la racine carrée du moment d'inertie.

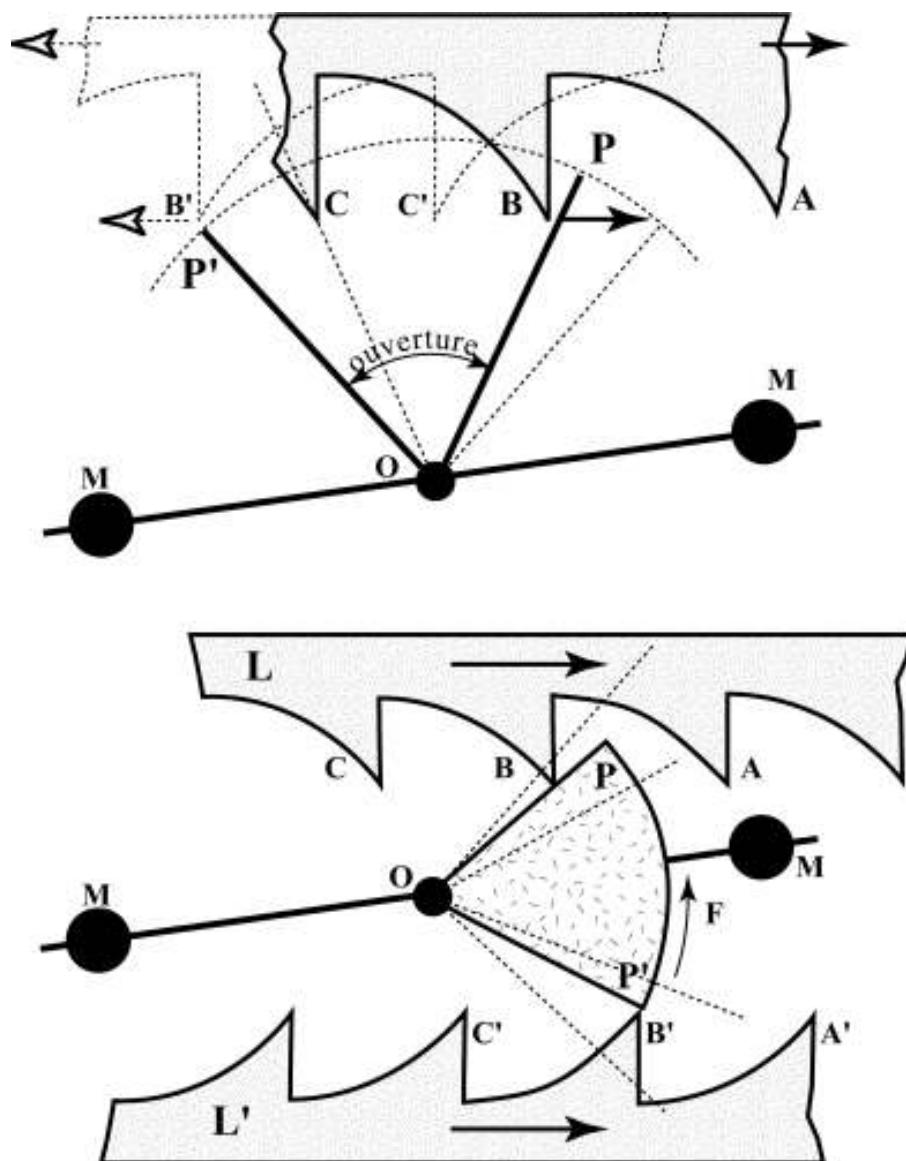


FIG. 2.2 – Foliot et roue de rencontre. Sur la vue du bas, la roue est remplacée par deux lames L et L'.

2.1. LES HORLOGES À FOLIOT, VERGE ET ROUE DE RENCONTRE

Or, le moment d'inertie est de la forme $I = mr^2$. Si les distances des masses à l'axe restent les mêmes, la période est proportionnelle à la racine carrée de la masse.

Les horlogers utilisaient autrefois la méthode empirique suivante pour régler leurs montres³ :

« on fait marcher la montre sans spiral de manière à ce qu'en une heure, l'aiguille des minutes tire 25 à 27 minutes, c'est à dire que la montre sans spiral retarde de 33 à 35 minutes »

Le tirage d'une horloge est donc inversement proportionnel à la période, et le produit du carré du tirage par la masse est constant. Ainsi, en 1848, Louis Moinet posait le problème suivant⁴ :

« Si un balancier tire 20 minutes par heure, combien faudra-t-il enlever de son poids pour qu'il tire 26 minutes.

Le calcul est le suivant avec un balancier de 200 mg : $200 \times 20^2 = x \times 26^2$ soit $x=118$ mg. Il faudra enlever 2 mg. »

2.1.2.3 Définitions

Voici quelques définitions liées à la verge et aux palettes **P** et **P'**.

l Angle de levée : la verge tourne et la palette pousse la roue ; l'angle de levée est l'angle minimum (parcouru dans un sens puis dans l'autre) pour que l'échappement fonctionne.

s Arc supplémentaire : c'est l'angle dont a tourné la verge dans le même sens après l'échappement jusqu'à l'elongation maximale.

A Amplitude : c'est l'amplitude des oscillations du foliot : on a **2A=l+2s**.

Pendant la levée **l** de la verge, la roue de rencontre en contact tourne d'un angle proportionnel **L**.

Au moment de l'échappement, elle tourne brusquement d'un angle appelé la chute **C**. Elle avance donc de **L+C** puis redevient solidaire des palettes.

Lorsque la verge décrit l'arc supplémentaire **s** dans un sens puis dans l'autre (de contact à contact), la roue recule de **R** puis avance de **R** : recul et avance se compensent.

En conclusion par demi-oscillation de la verge, la roue avance de **L+C**. Il faut noter que la chute, nécessaire au réglage, représente du travail perdu : en effet, pendant la chute, les rouages acquièrent une vitesse que le foliot devra annuler.

L'échappement à roue de rencontre fonctionne mieux si le balancier est lourd : son inertie prévaut devant celle de la roue lors du choc ce qui diminue l'intensité de celui-ci.

2.1.3 La chronométrie de précision avant Huygens

Il ne faut pas penser, à partir des remarques physiques précédentes sur les défauts inhérents au foliot, que toutes les horloges avant Huygens étaient très imprécises.

Il est vrai que la précision des premières horloges à foliot était de l'ordre d'une demi-heure par jour. Plus tard, certaines furent pourvues d'un cadran donnant le quart. Le plus ancien dessin

³Traité d'horlogerie de Claudius Saunier, page 54 à 93 [161].

⁴Traité d'horlogerie de Louis Moinet, Tome 1, page 385 [131].

CHAPITRE 2. ÉCHAPPÉMENTS ET OSCILLATEURS

d'un cadran des minutes a été fait vers 1478 par un horloger d'Augsburg Paulus Alemanus. Ce cadran servait en fait à vérifier l'exactitude de l'horloge avec l'heure du coucher du Soleil calculée d'une part, observée d'autre part. Ainsi, un écrit de 1465 explique comment régler la marche des horloges en disposant les poids de sorte qu'elle donne l'heure exacte du coucher du Soleil. Cela suppose qu'elle estime la minute ou qu'elle a un cadran qui la montre [194]...

Monsieur Paul Réal [158, 159], expert agréé auprès du musée du Temps de Besançon, a remis en état une horloge à foliot du XIV^e siècle dont la précision est d'environ 10 à 20 minutes par jour. D'autre part, les très célèbres horloges à double foliot de Jost Bürgi avait une précision de l'ordre de 1 minute par jour.

2.1.3.1 Jost Bürgi (1552-1632)

Jost Bürgi [121] est né à Lichtensteig en Suisse. Toute sa jeunesse reste obscure jusqu'à son engagement comme horloger à la cour du Landgraf Guillaume IV de Hesse à Kassel le 25 juillet 1579 ; il fut peut-être formé à Strasbourg par les frères Habrecht et Dasypodius ou bien à Kassel où d'éminents horlogers tels que Hans Buch ou Baldewein fabriquaient des horloges astronomiques. Il développa vers 1586 un mouvement d'une grande précision (ramène l'erreur journalière de ± 15 minutes à ± 30 secondes), à foliot croisé (Kreuzschlag) qu'il améliora ensuite à Prague. Guillaume IV était très fier des réalisations de son horloger. Tycho Brahé fit sa connaissance lors de son passage à Kassel en 1575. Sa renommée était telle, qu'il fut appelé par l'empereur Rodolf II (1528-1612) à Prague en 1592 puis en 1596. Bürgi, nommé Kaiserlicher Kammeruhrmacher, s'installa à Prague de 1604 à 1631 où il servit après Rodolf II, les empereurs Matthias et Ferdinand. Pour échapper à la guerre de Trente ans qui déchirait l'Europe Centrale, il rentra à Kassel et y mourut.

Ses horloges se trouvent dans les musées de Vienne, Dresde, Kassel, Darmstadt et une sphère tournante de 1580 se trouve au Musée des Arts et Métiers de Paris. Une de ses plus belles œuvres est conservée au Musée d'Histoire de l'Art de Vienne en Autriche. C'est une petite horloge astronomique, fabriquée à Prague entre 1622 et 1627. Cette horloge, munie de l'échappement à battement en croix, comporte une sphère céleste tournante, disposée sous une demi-sphère en cristal de roche. Elle possède trois cadans dont un cadran des secondes. Bien que quelques horloges du XVII^e siècle soient déjà munies d'aiguilles des secondes, les horloges de Bürgi connues sont les premières horloges fiables affichant des secondes⁵.

Le foliot croisé Le principe en est exposé sur la figure 2.5 et représente son modèle d'observation n°2 élaboré à Kassel vers 1600.

⁵Pour en savoir plus sur les horloges de table, se référer aux livres de Catherine Cardinal et, pour les horloges astronomiques de table, son article dans la revue de l'ANCAHA [38, 37].

2.1. LES HORLOGES À FOLIOT, VERGE ET ROUE DE RENCONTRE

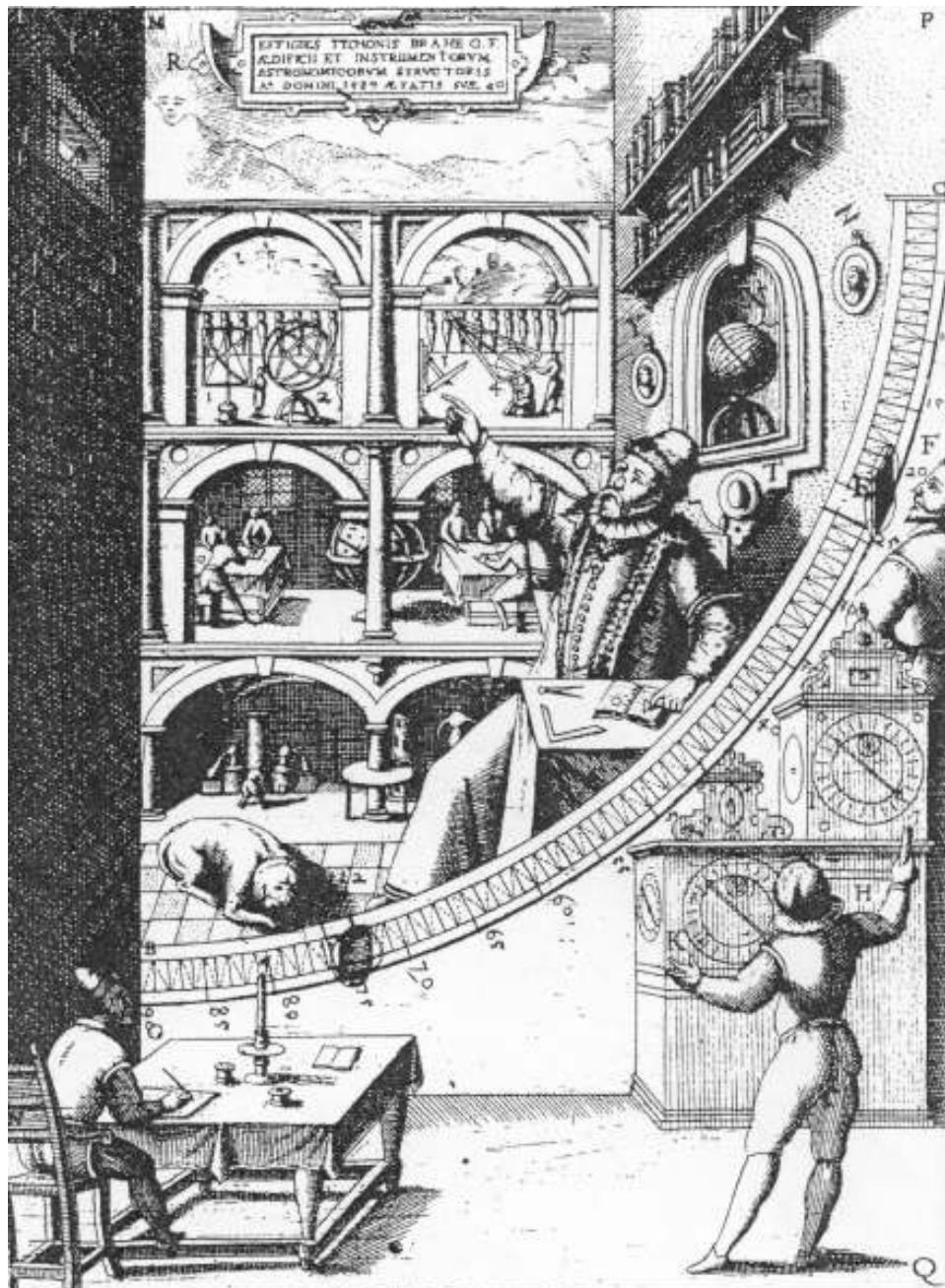


FIG. 2.3 – Tycho Brahe dans son observatoire de l'île d'Hveen.

Au premier plan on voit le grand cadran mural et, devant à droite, deux horloges sur lesquelles on peut distinguer un petit cadran auxiliaire à l'intérieur du grand. Trois assistants sont au travail : le premier fait la visée, le deuxième donne l'heure, le troisième note. Au fond, on voit les trois étages du bâtiment avec au sous-sol le laboratoire, la salle d'étude pour les assistants au premier étage, la terrasse avec les instruments (quadrant, sphère armillaire, triquetum, sextant) installés au deuxième étage.

Astronomiae instauratae mechanica (1598) d'après [119, 164].

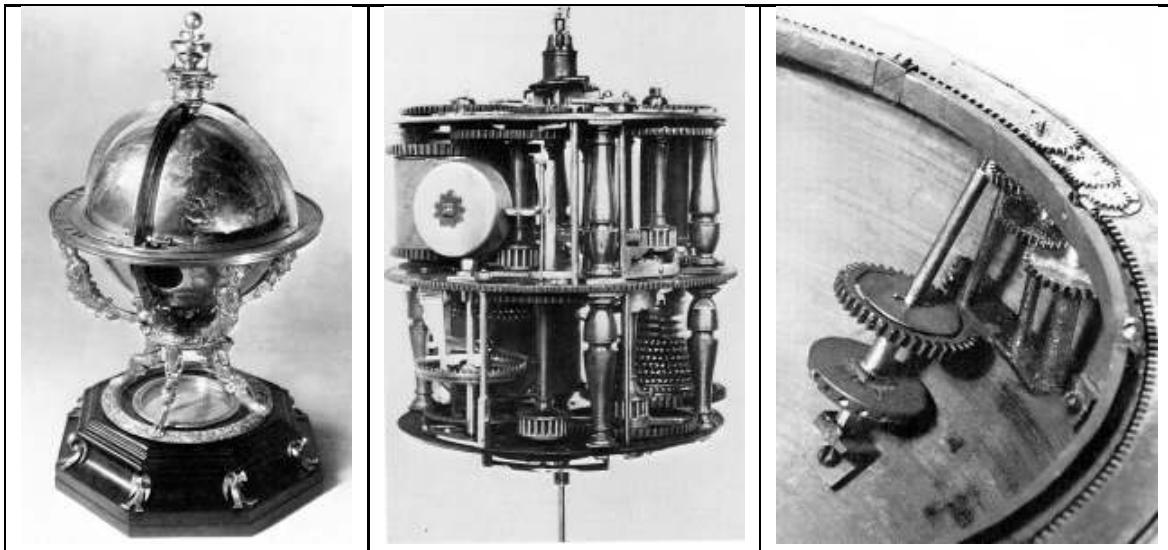


FIG. 2.4 – Sphère tournante de Jost Burgi vers 1580 (Conservatoire des Arts et Métiers).

A la verticale deux cadrants tournant, avec boule de remise à l'heure. Au pôle Nord cadran indiquant les heures et les minutes. Mécanisme horloger à 2 corps logé dans la sphère et axé sur les pôles. Échappement à roue de rencontre. Deux barillets. Foliot circulaire avec spiral ajouté à la fin du XVII^e siècle ainsi que chaîne et fusée (d'après [88] et [127]).

2.1. LES HORLOGES À FOLIOT, VERGE ET ROUE DE RENCONTRE

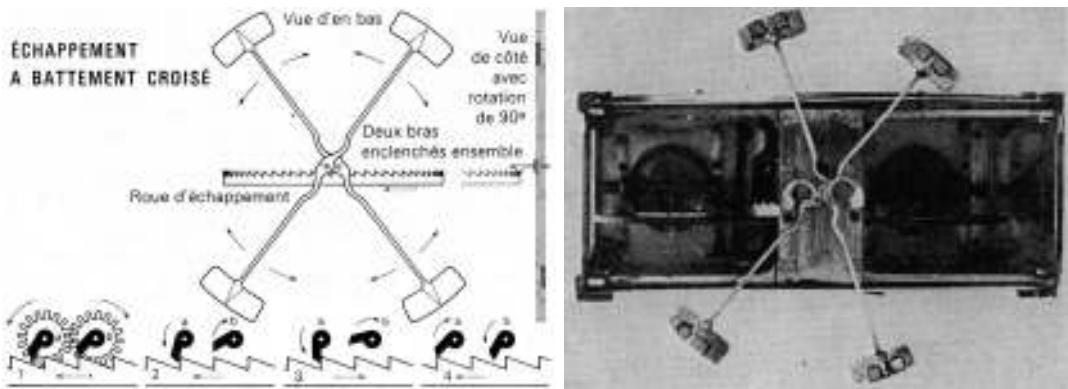


FIG. 2.5 – L'échappement à foliot croisé de Jost Bürgi. Landesmuseum Kassel [111, 20].

1. La palette **b** s'écarte et libère la roue d'échappement : le bras **B** tourne en sens horaire
2. La palette **a** s'enclenche sur la dent et arrête la roue
3. La roue recule d'un petit arc sous la pression de **a**
4. La roue reprend son mouvement d'avance et repousse la palette **a** qui se dégage et la palette **b** s'enclenche...

Témoignages sur Bürgi [20]

1. Lettre du Landgraf de Hesse Guillaume IV à Tycho Brahé, datée du 14 avril 1586⁶ : « Récemment nous sommes parvenus à observer la longitude exacte d'Orion, du Grand Chien et du Petit Chien grâce aux horloges de ce dernier (Bürgi) : elles indiquent les minutes et les secondes avec une telle exactitude qu'entre deux culminations elles ne dévient même pas d'une minute. » (Traduit de l'original, mélange d'allemand et de latin)
2. Billet adressé à Bürgi en date du 27 août 1586 et lui accordant « 25 écus pour une horloge à poids indiquant les heures, les minutes et les secondes ». (Traduit de l'original allemand)
3. Passage d'un manuscrit de l'astronome Rothmann⁷, rédigé vers 1585 :

« En ce qui concerne nos horloges, nous en avons trois pour nos observations. Mais la description en serait monotone et exigerait trop de place. Un point mérite cependant d'être relevé : la première de ces horloges possède trois

⁶« ist andem das damals unser instrumenta noch nicht so fleissig seind abgerichtet gewesen, gleichwie sie jetzo durch angeben des Wittichii et diligentia et industria unsers uhrmacher maister Just Burrii, qui quasi indagine alter Archimedes est, sind angerichtet ... Orionis, Canem minorem et majorem, die haben wir nicht allein per distanciam inter se et latitudinem meridianam lassen observieren, sondern durch unser minutens und sekunden uhrlein, welche gar gewisse Stunden geben und a meridie in meridiem oftmals nicht eine minutens variere, ihr tempus oder culminatio in meridiano, gar scharf zu etlich mahlen und daraus ihre longitudinel vel potius coeli meditationem genommen dass unsers bekündens wir dero gewiss seind »

⁷Christophe Rothman, astronome de Guillaume IV, partit à l'invitation de Tycho Brahé en 1590 sur l'île d'Hvenn et y resta.

aiguilles qui n'indiquent pas seulement les heures et les minutes mais aussi les secondes. La durée d'une seconde n'est pas très courte, égalant à peu près la durée de la note la plus brève d'une mélodie modérément lente. L'échappement ne fonctionne pas selon la manière ordinaire étant actionné par un système nouvellement inventé qui fait que chaque mouvement correspond exactement à une seconde⁸. »

2.2 Le pendule régulateur

2.2.1 Les premières mesure du temps avec un pendule

2.2.1.1 Ibn Yunus (950-1009)

On attribue parfois à Ibn-Yunus, astronome à la cour des Fatimides au Caire, l'utilisation d'un pendule pour mesurer le temps. David King montre [107] qu'il n'y a aucune preuve de cela et que ce mythe, repris par Laplace et Sébillot, a été créé par l'historien anglais Edward Bernard en 1684.

2.2.1.2 Léonard de Vinci (1452-1519)

Les centres d'intérêt de Léonard de Vinci furent très divers et, parmi ceux-ci, figure l'horlogerie. L'Italie du Nord était déjà à cette époque un centre d'horlogerie important (Dohrn van Rossum cite ainsi dans son ouvrage une chronique de 1336 décrivant une des premières horloges publiques sur l'église San Gottardo [182] de Milan⁹). Léonard décrit l'horloge de l'abbaye de Chiaravalle, près de Milan, qui « montrait la Lune, le Soleil, les heures et les minutes ». De nombreux dessins [43] du Codex Atlanticus et du Codex de Madrid montrent des mécanismes d'horlogerie, en particulier des systèmes pour moufler des poids, des fusées pour réguler la tension de ressorts, des pendules...

2.2.1.3 Santorio Santorii (1561-1636)

En 1602 Santorio Santorii (dit Sanctorius), ami de Galilée et futur professeur de médecine à l'université de Padoue, imagine de mesurer le pouls de ses patients en comptant les pulsations du pendule, dispositif qu'il nomme « pulsilogium ».

2.2.2 Galilée (1568-1642)

2.2.2.1 La découverte de l'isochronisme

La légende raconte (sans que l'on en connaisse la véracité) que l'intérêt de Galilée pour le pendule remonte à 1583 lorsqu'il observait les oscillations d'une lampe dans la cathédrale de

⁸Rien n'indique qu'il s'agisse d'une horloge à pendule, Rothmann insiste sur la durée des oscillations de 1 seconde et non sur la régularité des oscillations qui assure la supériorité du pendule.

⁹« ... il y a de nombreuses cloches au sommet de la tour ; là se trouve une horloge admirable... »

2.2. LE PENDULE RÉGULATEUR

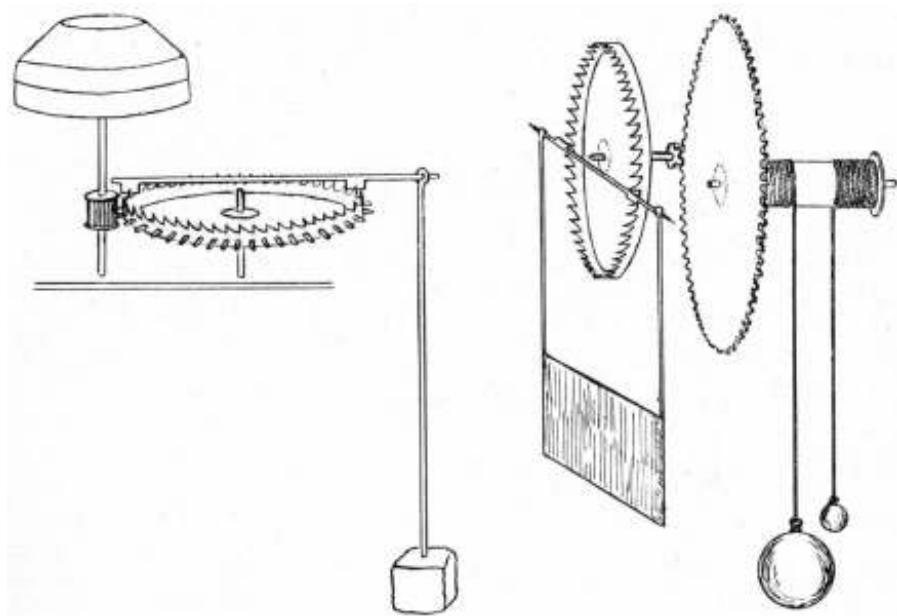


FIG. 2.6 – D'après des dessins de Léonard de Vinci, Codex Atlanticus 257 R.a. et 278 R.b., Bibl. Ambrosiana de Milan. A gauche, dispositif à poids oscillant pour faire tourner une meule. A droite, roue à poids qui déplace un ventilateur. Celui-ci se comporterait comme un pendule s'il n'était pas freiné par l'air [165]

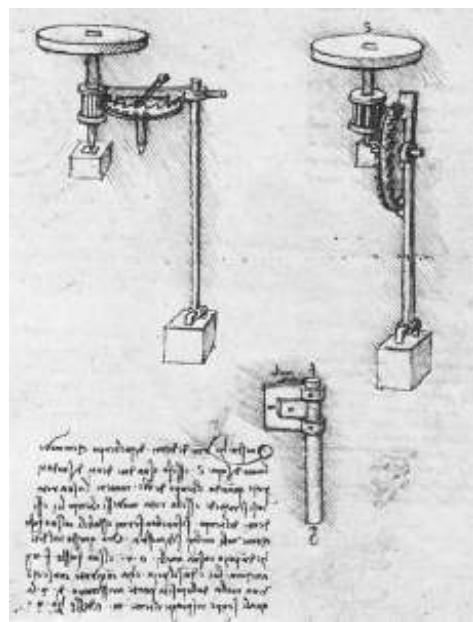


FIG. 2.7 – Croquis de Léonard de Vinci Codex Madrid [121]

CHAPITRE 2. ÉCHAPPÉMENTS ET OSCILLATEURS

Pise. L'isochronisme des oscillations pendulaires ainsi que la loi des cordes¹⁰ sont en tout cas déjà mentionnés dans une lettre du 29 novembre 1602 à Guido Ubaldo del Monte.

2.2.2.2 Les dialogues sur les deux systèmes du monde

Après une longue maturation, l'ouvrage achevé en 1629, paraît en 1632 à Florence sous le titre « Dialogo intorno ai due massimi sistemi del mondo, Tolemaico e Copernicano »[84]. C'est la première fois que les lois du pendule sont énoncées clairement (dans la deuxième et la quatrième journée). Son récit montre aussi qu'il n'était pas encore conscient que l'isochronisme n'était vrai que pour les petites amplitudes et le Père Marin Mersenne (1588-1648) relèvera l'erreur dans ses « Nouvelles pensées de Galilée », Paris 1639.

Ces lois du pendule seront exposées en détail dans les « Discours concernant deux sciences nouvelles ».

2.2.2.3 Les discours concernant deux sciences nouvelles

C'est dans cet ouvrage que Galilée reprendra longuement l'isochronisme des oscillations pendulaires ([85] Première journée, Paragraphe 128 à 131, page 70, Paragraphes 139 à 141, page 80) ainsi que la loi des cordes (Théorème VI de la Troisième journée, page 153)

Galilée entreprend la rédaction de cet ouvrage à l'automne 1633 à 69 ans. Le 22 juin à Rome, revêtu de la robe blanche des pénitents, il avait écouté la sentence qui lui interdisait de parler du mouvement de la Terre puis s'était retiré à Sienne sous la garde de l'archevêque Ascanio Piccolomini, par ailleurs son ami. L'ouvrage est achevé en juin 1637 et paraît à Leyde en Hollande en juillet 1638. Galilée, devenu aveugle, reçoit un exemplaire en juin 1639 à Arcetri.

2.2.2.4 « L'horloge » de Galilée

Le 15 août 1636 Galilée écrit aux États Généraux de Hollande une lettre qui donna lieu à des polémiques sur la priorité de l'invention de l'horloge à pendule. Il y propose une nouvelle méthode pour déterminer les longitudes. Sa méthode utilise les éclipses des satellites de Jupiter et une horloge suffisamment précise :

« Elle doit être telle que si 4 à 6 horloges étaient faites en même temps, elles devraient prouver leur précision, en montrant une différence d'une seconde seulement, non pas en une heure, non pas en un jour mais même en un mois. Ces horloges sont réellement admirables pour l'observateur des mouvements et des phénomènes de la sphère céleste et en plus leur construction est très simple et bien moins sujette aux influences extérieures que les autres instruments inventés dans le même but. »

Dans une lettre du 6 juin 1637 adressée à Lorenzo Reael, amiral de la Compagnie hollandaise des Indes Orientales, Galilée explique qu'il a inventé un compteur de vibrations « misuratore di tempo » basé sur l'isochronisme des oscillations d'un pendule que l'on relance régulièrement.

¹⁰Mouvement d'une bille isochrone, sur une corde du cercle.

2.2. LE PENDULE RÉGULATEUR

A chaque oscillation, le pendule, formé d'une lentille donne un impact à une dent d'une roue horizontale qui tourne.

« Ce serait une perte de temps de retenir l'attention de votre Seigneurie avec les détails. Vous pouvez commander aux artisans de manufactures d'horloges et d'autres mécanismes. Ils doivent seulement savoir que le pendule donne des vibrations d'égales durées, que l'arc soit grand ou petit, pour imaginer des méthodes de construction d'une bien plus grande précision que toutes les autres. »

Galilée reprit à partir de 1641, un an avant sa mort, le 9 janvier 1642, les essais que Santorio Santorio (1561-1636) avait faits avec son « pulsilogium » permettant de mesurer le pouls des patients. Son souhait était de réaliser un échappement entretenant les mouvements du pendule. Il imagine une combinaison où le pendule est aussi peu influencé que possible par l'échappement.

Vincenzio Viviani (1622-1703) qui publia la première édition des œuvres complètes de Galilée en 1655-1656 fut chargé par le Prince Léopold de Toscane (1617-1675) d'un rapport sur l'invention de Galilée. L'astronome français Ismaël Boulliau, ami de Huygens, avait en effet envoyé au Prince un exemplaire de l'ouvrage « Horologium » en octobre 1658 puis lui annonça en février 1659 l'envoi d'une horloge équipée d'un pendule.

Le 31 mars 1659, le Prince le remercie courtoisement en ajoutant qu'il ne faut pas priver Galilée de sa gloire et qu'un modèle de l'horloge galiléenne a été découvert en 1656, d'après lequel une horloge a été construite par un expert et que Le Prince espère fonctionnelle après restauration et nettoyage. Il lui écrit même que l'horloge de Galilée a été proposée aux États Généraux de Hollande (comme on l'a vu, l'affirmation est inexacte, Galilée a seulement proposé une méthode de mesure des longitudes au moyen des satellites de Jupiter et d'une horloge décrite de façon très imprécise...).

La correspondance continue et le 21 août 1659 Léopold envoie à Boulliau un dessin de l'horloge de Galilée fait de la même manière que l'horloge qui est maintenant dans sa chambre et le prie de montrer ce dessin à Huygens. Ismaël Boulliau, en correspondance avec Huygens, lui adresse le 30 janvier 1660 une lettre avec ce dessin Figure 2.8 sur lequel est écrit de sa main :

« Figure de l'horloge à pendule qui est à Florence dans le vieil palais de Medicis, horloge que Monsieur le Grand Duc de Florence a fait adjuster ».

Sur ce dessin le pendule attaque directement la verge (comme sur les dessins de Léonard de Vinci).

Une partie de la correspondance et le rapport de Viviani, daté du 9 octobre 1659, furent retrouvés en 1774, à la Bibliothèque Nationale de Paris, dans les papiers de Boulliau.

Dans son rapport accompagné du dessin, Viviani raconte qu'en 1641 il était auprès de Galilée à Arcetri, et que celui-ci lui fit part de l'idée d'appliquer le pendule aux horloges.

« Nous examinâmes ensemble les opérations du mécanisme. Nous remarquâmes plusieurs difficultés que le Signor Vincenzio promit de surmonter toutes : il croyait en effet qu'il pourrait adapter le pendule à l'horloge de différentes façons et à d'autres inventions. Mais attendu qu'il l'avait dans cet état, il souhaitait le laisser en accord avec le dessin, avec l'adjonction d'un cadran montrant les heures et les minutes ; il commença à couper les dents de l'autre roue. Mais en raison de ce travail inhabituel

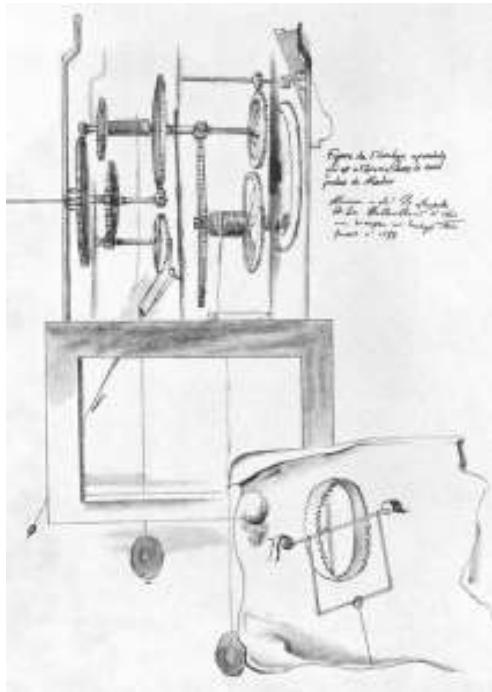


FIG. 2.8 – Dessin annoté par Boulliau et transmis à Huygens. Université de Leyde.

il fut emporté par une fièvre maligne et il dut l'abandonner au point inachevé que nous voyons sur le dessin. Et le 22^e jour de sa maladie, le 16 mai 1649, toutes les horloges les plus précises, ensemble avec ce grand mesureur du temps, s'arrêtèrent pour toujours lorsqu'il mourût, pour mesurer (comme je le crois), dans la joie de la Divine Essence, l'incompréhensible moment de l'éternité¹¹... »

Vicenzo commença à construire l'horloge conçue par son père mais il n'eut pas le temps de l'achever avant sa mort le 16 mai 1649. Sa veuve mourut en 1669 et Viviani, nommé exécuteur testamentaire, mentionne dans l'inventaire « un orioulo non finito di ferro con pendulo, prima invenzione del Galileo ».

Les sources de l'histoire de Galilée et de son invention sont relatées dans les ouvrages de Giuseppe Brusa ([34] pages 115-118) et Antonio Simoni ([165] page 45 à 51), et dans l'article et l'ouvrage de Silvio Bedini [14, 15].

¹¹ « Esaminiamo insieme l'operazione intorno alla quale varie difficoltà ci sovverennero, che tutte il Signor Vicenzo si prometteva di superare ; anzi stimava di potere in diversa forma et con altre invenzioni adattare il pendolo all'oriuolo ; ma da che laveva ridotto a quel grado voleva pur finirlo su l'istesso concetto che n'addita il disegno, con aggiunta delle mostre per le ore et per le minuti ancora. Per cio si pose ad intagliar l'altre ruota dentata. Ma in questa insolita fatica sopraggiunto da febbre acutissima, li convenne lasciarla imperfetta al segno qui si vede ; et nel giono XXII del suo male, alli 16 di Maggio del 1649, tutti gli oriuvoli piu giusti insieme con questo esattissimo, misurator del tempo, per lui si guastarono et si fermarono per sempre, trapassando egli (come creder mi giova) a misurar, godendo nell'Essenza Divina, i momenti incomprensibili dell'eternità... »

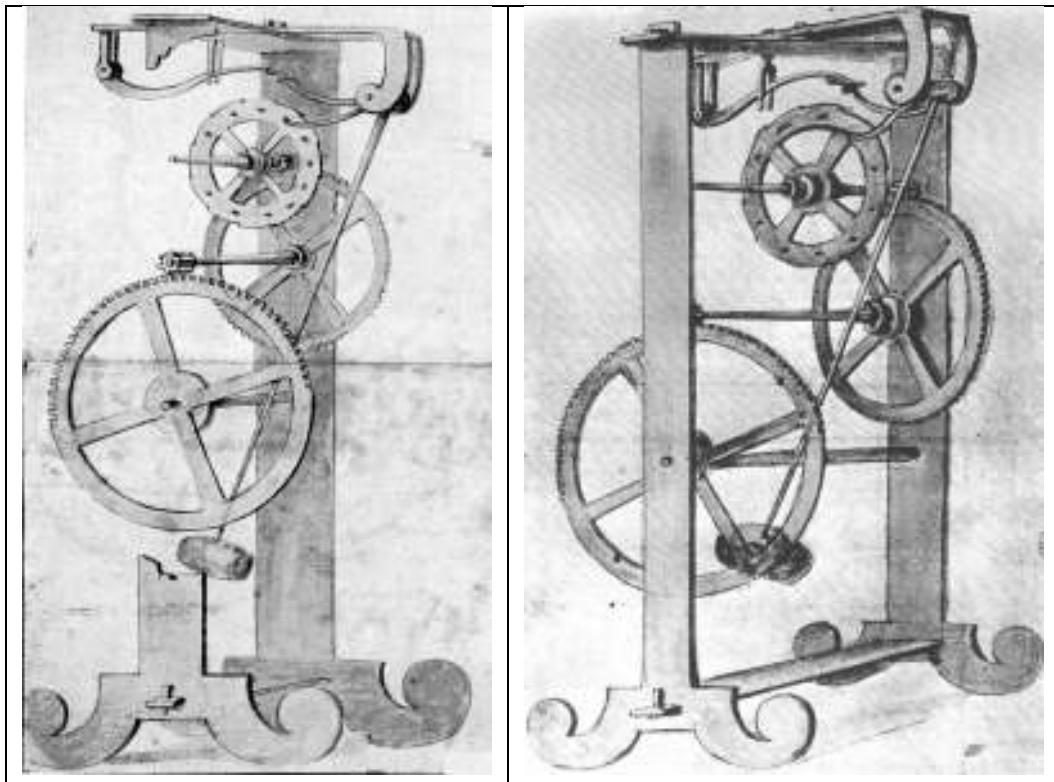


FIG. 2.9 – Les dessins de Viviani de l'horloge de Galilée (1659)

Firenze, Biblioteca Nazionale et Paris, Bibliothèque Nationale (dessin envoyé à Boulliau)

L'« horloge de Galilée » a été reproduite plusieurs fois d'après les dessins de Viviani pour certains musées. Celle réalisée en 1877 par Eustachio Porcellotti, horloger florentin, se trouve à l'« Istituto e Museo di storia della scienza » à Florence. Une autre, exécutée en 1883, se trouve au « Science Museum » de Londres, une autre encore à la « Smithsonian Institution » de Washington. Ungerer [176] mentionne aussi une horloge de Larible, fonctionnant d'après ce principe, datée 1871 et se trouvant au Musée des Arts et Métiers de Paris.

Ces horloges fonctionnent mais on reproduit parfois un mécanisme de Galilée qui ne fonctionne pas comme sur la figure 2.10 :

Le pendule est en haut de sa course et commence à descendre vers la droite : la goupille **a** pousse le bras **q**

Quand la goupille **a** sera en **b**, le cliquet **d** sera devant la dent de rochet **f** et arrête la roue.

Le pendule oscille de droite à gauche puis revient de gauche à droite ; presque arrivé à sa position haute à gauche, le bras **q** rencontre la goupille **a** (se trouvant alors en **b**) et fait reculer la roue d'échappement qui a été libérée, car, en même temps, **r** a soulevé le cliquet **d**.

Le pendule est arrêté par la pression de la roue exercée par la goupille **a** qui donne ensuite une impulsion vers la droite.

CHAPITRE 2. ÉCHAPPÉMENTS ET OSCILLATEURS

La roue d'échappement exécute ainsi un mouvement alternatif de rotation ; le pendule reçoit de l'énergie lorsque la roue avance et la restitue en repoussant la roue qui oscille autour d'une position fixe.

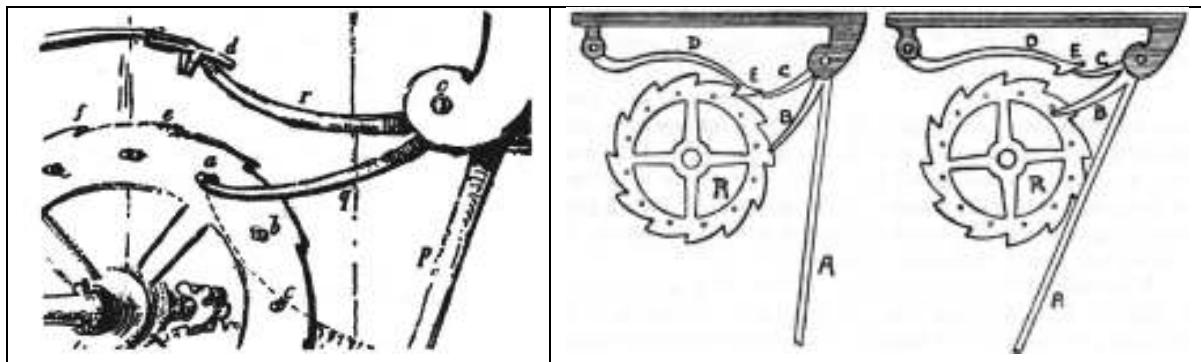


FIG. 2.10 – Échappements d'après les dessins de Viviani

L'échappement de Galilée est particulièrement intéressant du point de vue historique et du point de vue technologique.

1. Le principe est tout nouveau : la verge à palette est supprimée (Voir figure 2.1).
2. C'est un mécanisme précurseur de l'échappement à ancre, de l'échappement à chevilles, et de l'échappement libre : dès que la roue est arrêtée par le crochet, l'oscillation complémentaire du pendule se fait librement. On en devine le fonctionnement sur la figure 2.10 à droite :

En bout d'oscillation à gauche le levier **C**, solidaire du pendule, soulève le cliquet **D** et libère la roue **R** dont une des goupilles vient appuyer sur l'autre levier **B**

La pression de la goupille **B** arrête le mouvement du pendule et le relance vers la droite ; après avoir parcouru un petit arc le pendule, que la goupille abandonne, oscille librement ; en même temps le levier **C** abandonne le cliquet **D** qui en tombant arrête la roue **R**.

3. Le pendule est fixé à un axe tournant sur pivot (les frottements sont importants).
4. L'impulsion sur le pendule se fait au point haut. C'est une mauvaise solution au problème de l'entretien du pendule : une irrégularité d'intensité de l'impulsion entraîne une variation de la période, même pour de petites oscillations...
5. L'axe du pendule est pourvu de deux bras : l'un reçoit l'impulsion à l'aide des chevilles de la roue d'échappement, l'autre arrête cette roue en laissant tomber au bon moment le crochet dans l'une des dents à roches.

Pour conclure sur la priorité de cette invention, voici la lettre d'Huygens à Boulliau du 14 mai 1659 :

« Il peut bien être toutefois que Galilée a eu cette même pensée que moi comme vous dites, et pour la subtilité de l'invention, c'est peu de chose auprès de ce que

ce grand homme en d'autres matières a fait paraître. Monsieur Roberval, comme vous savez, a encore eu le même dessein dont Monsieur Chapelain m'a envoyé la description, mais il n'y avait rien pour faire continuer le mouvement du pendule par la force de l'horloge, ce qui toutefois est le principal. De même Monsieur Hevelius m'a promis de produire quelque jour ce qu'il a machiné sur ce sujet et Monsieur Wallis m'a aussi écrit qu'en Angleterre, il y en avait qui avaient trouvé le moyen de faire compter les vibrations du pendule par quelque instrument, de sorte que la pensée semble avoir été assez commune, mais on ne peut nier que mon modèle n'ait succédé le premier, car enfin, si celui de Galilée n'avait point eu d'inconvénient, il n'est aucunement croyable qu'il n'aurait pas mis en effet une chose si utile ou même après lui, le Sérénissime Prince Léopold lorsqu'il trouva ce modèle. » [56]

2.2.3 Huygens (1629-1695)

2.2.3.1 Le Père Marin Mersenne (1588-1648)

Marin Mersenne né dans le Maine, fit ses études au collège de jésuites de La Flèche avec Descartes dont il resta l'ami toute sa vie. Il entra ensuite chez les religieux du collège de Meaux et fut en contact avec de nombreux savants européens : Descartes, Galilée, Constantin et Christiaan Huygens, Pascal, mais aussi Peiresc, Fermat, Roberval.

Il s'intéressa de près aux œuvres de Galilée, les traduisit en français et les fit ainsi connaître. Il publia en 1639 les « Nouvelles pensées de Galilée ». Il s'agit d'une traduction incomplète des œuvres de Galilée dont il disait « si ces livres ne contiennent pas tous les discours du mot à mot, ils en donnent pour le moins la substance ». Il y conteste l'affirmation de Galilée selon laquelle les oscillations du pendule sont isochrones quelle que soit l'amplitude.

C'est lui qui, le premier, détermina la longueur du pendule à seconde en 1644 et comprit qu'un corps matériel suspendu oscille comme un seul point : il propose en 1646 aux géomètres le problème¹² de déterminer *le centre d'agitation ou de balancement*, c'est-à-dire la longueur du pendule simple synchrone du pendule composé (problème du funependule). Les efforts de Roberval et de Descartes furent infructueux et c'est Huygens qui donna la solution théorique dans « Horologium oscillatorium » :

Prop XX : Centrum oscillationis et punctum suspensionis inter se convertuntur

2.2.3.2 L'horloge de 1657

Depuis 1646 Huygens s'intéressait donc au pendule grâce au problème posé par Mersenne, problème qu'il n'avait pas encore résolu. En 1656, il a l'idée d'appliquer le pendule librement suspendu aux horloges à roues dentées, en réglant le mouvement du mécanisme par l'intermédiaire de la fourchette. Il fait réaliser son idée par Salomon Coster, horloger à La Haye. Cette

¹²Pascal écrivit de Mersenne : « Il avait un talent tout particulier pour former les belles questions, en quoi il n'avait peut-être pas de semblable ; mais encore qu'il n'eût pas pareil bonheur à les résoudre et que ce soit proprement en ceci que consiste tout l'honneur, il est vrai néanmoins qu'il a donné l'occasion de plusieurs belles découvertes qui, n'auraient peut-être jamais été faites, s'il n'y eût excité les savants. »

première horloge à pendule se trouve maintenant au Musée Boerhaave à Leiden (Figure 2.11). Elle comporte deux aiguilles : celle des heures et celle des minutes. On remarque les joues qui encadrent le pendule. En 1657, Huygens n'avait pas encore établi qu'elles devaient avoir une forme cycloïdale pour réaliser l'isochronisme quelle que soit l'amplitude des oscillations : les joues de cette horloge ont donc été tracées empiriquement.

2.2.3.3 Horologium (La Haye 1658)

En 1658 Huygens fait paraître son opuscule en latin « Horologium ». La suppression des arcs latéraux et le redressement de la verge à palette proviennent, comme l'explique Huygens, d'une double cause.

1. Avec les arcs, l'horloge devait être parfaitement verticale (et ne pouvait donc servir pour la mesure des longitudes en mer) ; de plus la détermination de la forme des arcs se faisait de façon empirique en créant des oscillations d'amplitudes différentes et en comparant les durées. C'était une opération que Huygens savait faire mais complexe et longue pour tous les horlogers qu'il voulait toucher.
2. Les arcs supprimés, les oscillations du pendule devaient rester petites pour conserver l'isochronisme : d'où l'adjonction du pignon O et de la roue de champ partiellement dentée P pour les amplifier sur le mouvement de la verge à palette dont le fonctionnement nécessite de grandes amplitudes. Cette nouvelle disposition de verge verticale correspondait aussi à la disposition de toutes les grandes horloges publiques de l'époque et permettait donc en plus de remplacer très facilement tous les anciens foliots par des pendules.

En 1659 Huygens a trouvé la forme théorique des joues [25] : elles doivent être cycloïdales pour donner des oscillations isochrones quelle que soit l'amplitude (pour un pendule de longueur $4a$, la joue cycloïdale doit être produite par un cercle de rayon a). Le pignon O et la roue P qui devaient aussi présenter des inconvénients ont été supprimés.

2.2.3.4 « Horologium oscillatorium », L'horloge oscillante (1673)

Le titre complet de l'ouvrage, publié en latin est « Horologium oscillatorium. Sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae » c'est-à-dire « Démonstrations géométriques au sujet du mouvement des corps suspendus appliqués aux horloges ». Huygens y expose ses recherches et décrit toutes les innovations qu'il a apportées depuis 1656.

Depuis 1661 Huygens était en contact avec l'horloger parisien Isaac Thuret¹³ qui construisit en 1675 une horloge avec un pendule battant la demi-seconde pour l'Observatoire de Leiden suivant les indications de Huygens (Figure 2.14).

Les perfectionnements ultérieurs des échappements s'appliquèrent à agir sur le pendule le moins possible.

¹³Les rapports de Richer en Guyanne (1672-1673) mentionnent que les horloges emportées battant la seconde et la demi-seconde sont de Thuret.

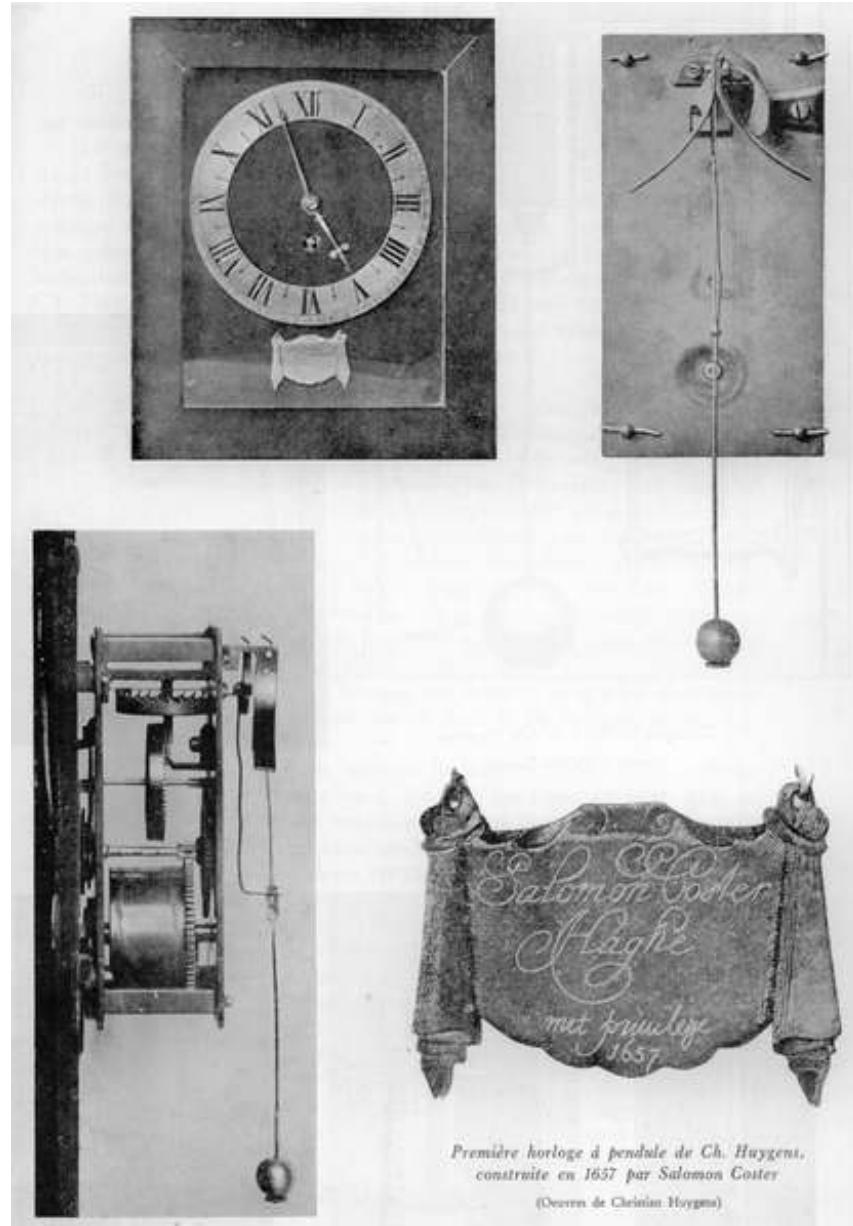


FIG. 2.11 – L'horloge de Huygens de 1657, fabriquée par Salomon Coster

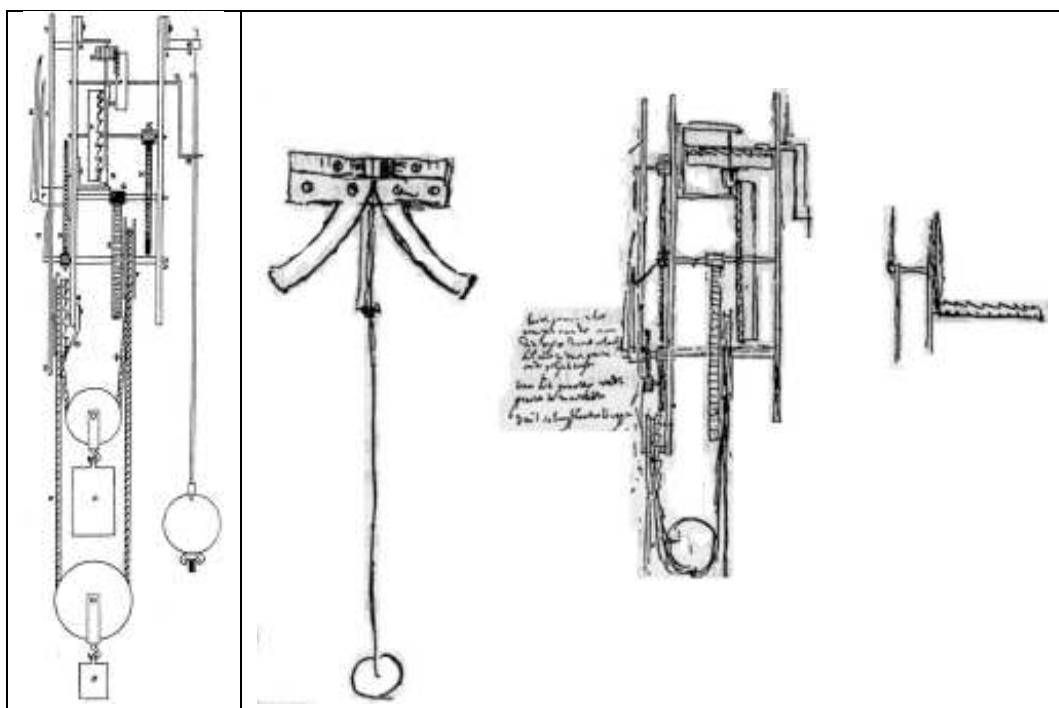


FIG. 2.12 – Dessins de Huygens.

A g., *Horologium*, 1658. Lames correctives absentes, verge verticale.

A d., *L'horloge à pendule à arcs cycloïdaux*, 1659. Joues cycloïdales présentes, verge horizontale.

2.2. LE PENDULE RÉGULATEUR

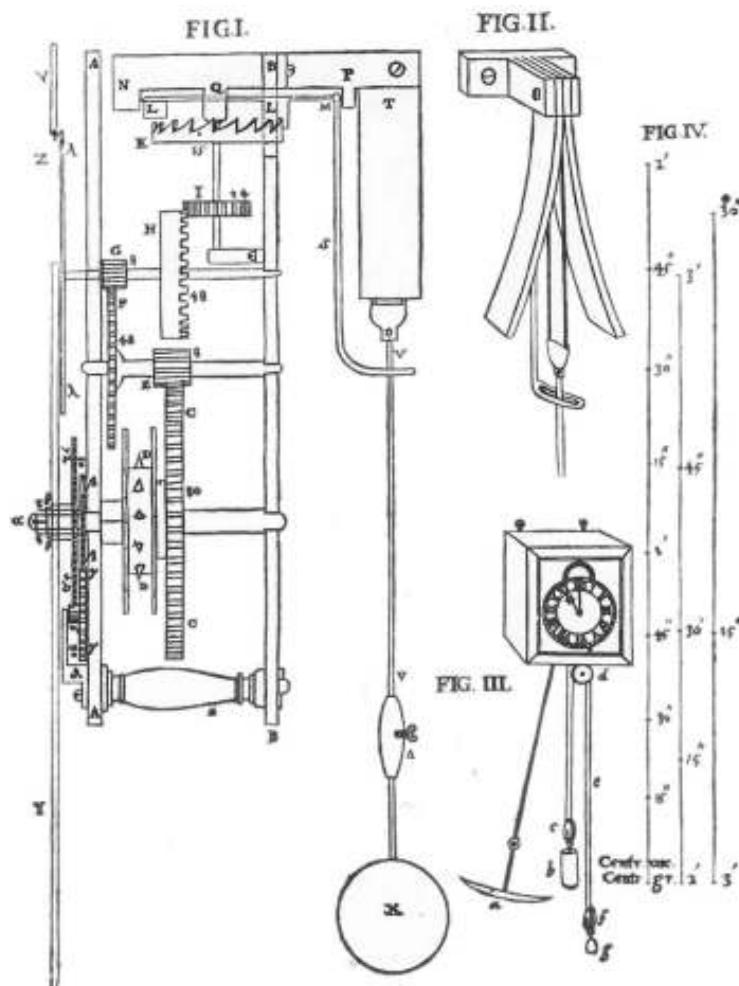


FIG. 2.13 – L'horloge de 1673, dessin de *Horologium oscillatorium*.

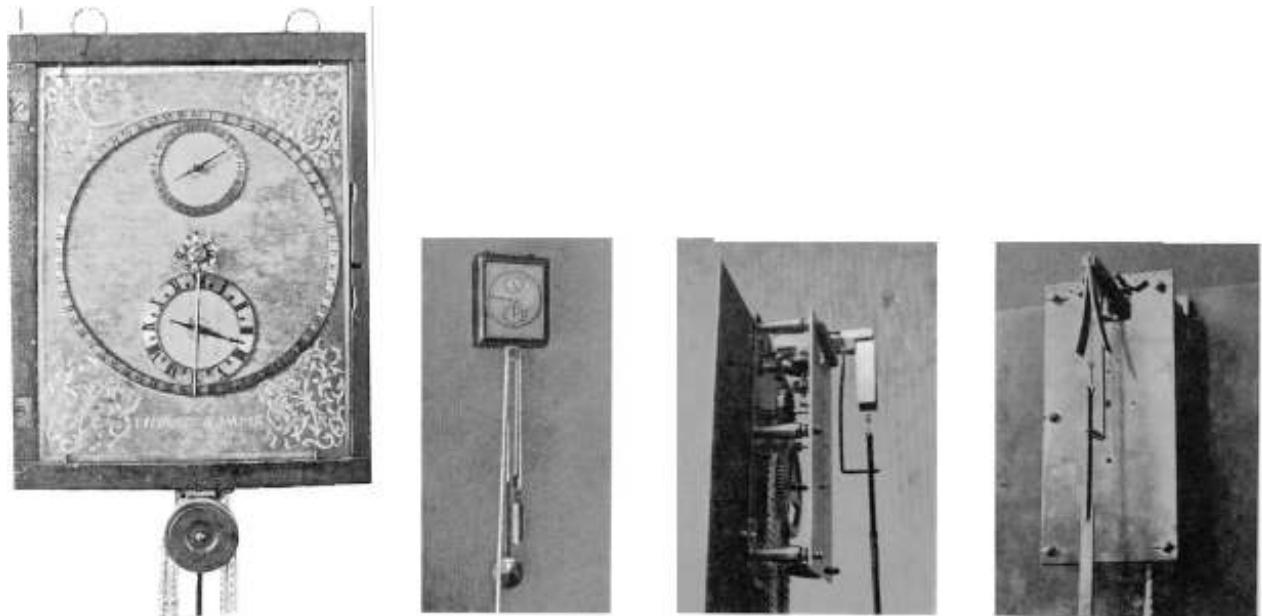


FIG. 2.14 – L'horloge à pendule d'Isaac Thuret (Musée Boerhaven de Leyden). Le grand cadran est associé à l'aiguille des secondes. La vue arrière montre les joues cycloïdales.

2.2.4 L'échappement à ancre

Une controverse eut lieu à propos du premier échappement à ancre entre Hooke et l'horloger William Clément vers 1680. Georges Graham (1673-1751) invente vers 1715 une ancre dite « à repos » ou sans recul car la roue tourne toujours dans le même sens. Les palettes de l'ancre sont positionnées pour tomber « pile » sur les dents de la roue d'échappement.

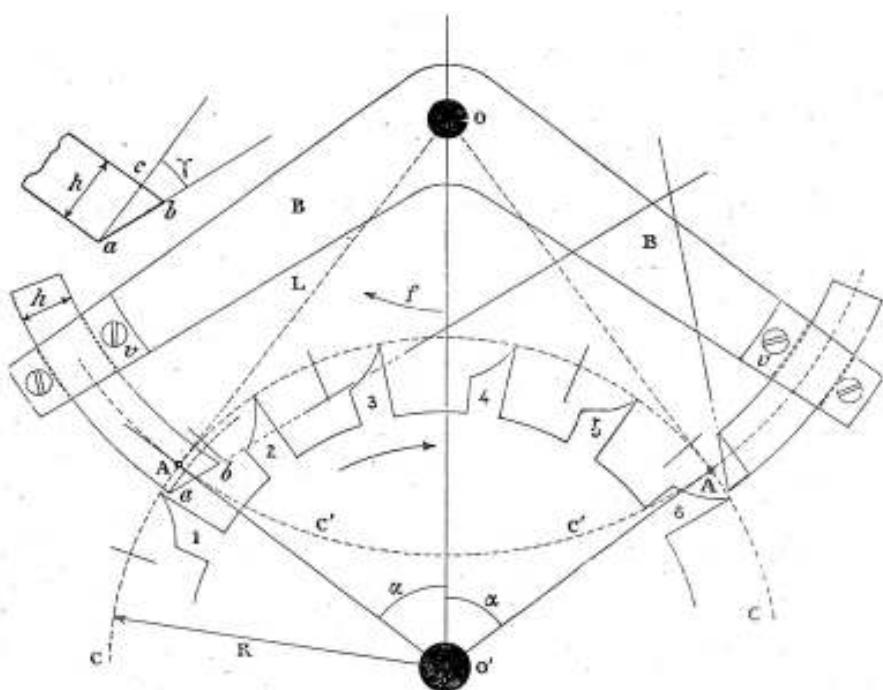


FIG. 2.15 – L'échappement inventé par Graham vers 1715