

FIG. 1 – Echappement à foliot, verge et roue de rencontre (inventé vers 1300)

## Références

- [1] Galileo Galilei. *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*. Seuil, 1992.
- [2] Galileo Galilei. *Discours concernant deux sciences nouvelles*. Presses Universitaires de France, 1994.
- [3] Charles-Henri Eyraud. *Horloges astronomiques au tournant du XVIIIe siècle : de l'à-peu-près à la précision*. <http://isheyvo.ens-lyon.fr/eaae/groupspace/richer-cayenne>, dec 2004.
- [4] Silvio Bedini. *Pulse of time. Galileo Galilei, the determination of the longitude and the pendulum clock*. Firenze, Olschki, 1991.
- [5] R.D. Dobson. G. Galilei and C. Huygens. *Antiquarian Horology*, 15 :261–270, 1985.
- [6] Antonio Simoni. *Orologio italiani del cinquecento all ottocento*. Italy, 1965.

## Galilée (1564-1642) et le pendule...

Viviani raconte que c'est dès 1583, en regardant les oscillations dans la cathédrale de Pise, que Galilée réalisa l'isochronisme des oscillations pendulaires, mais c'est dans sa lettre à Guidoaldo del Monte du 29 novembre 1602 qu'il en parle pour la première fois.

Le « dialogue sur les deux grands systèmes du monde » achevé en 1629 paraît en 1632 à Florence après une longue maturation [1]. C'est dans cet ouvrage que les lois du pendule sont énoncées clairement dans la deuxième et la quatrième journée ([1] page 242 et 434) ; elles seront exposées encore plus en détail dans les « Discours concernant deux sciences nouvelles ».

## **Discours concernant deux sciences nouvelles**

Galilée entreprend ce Discours à l'automne 1633 ; il est alors âgé de 69 ans. Le 22 juin de cette même année, 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 il s'était retiré à Sienne sous la garde de l'archevêque Ascvanio Piccolomine, son ami. L'ouvrage est achevé en juin 1637 et paraît, à Leyde en Hollande chez Elzévir, en juillet 1638, sous le titre : « Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove Scienze attenenti alla Meccanica ed ai movimenti locali. Altrimenti, Dialoghi delle nuove Scienze. »

### **Première Journée, Chute des corps (page 70 et page 78 [2]).**

« J'ai pris deux balles, l'une de plomb, l'autre de liège, celle-là bien plus de cent fois plus lourde que celle-ci, toutes deux attachées à des fils fins et égaux, long de 4 à 5 coudées<sup>1</sup>, fixés par le haut. Puis, les ayant éloignées l'une et l'autre de la verticale, je les ai laissées aller en même temps ; et toutes deux descendant le long des circonférences, des cercles décrits par les fils et de rayons égaux, dépassèrent la verticale ; puis elles revinrent en arrière par le même chemin et répétant bien cent fois les mêmes allées et venues, elles ont montré d'une manière évidente que la boule lourde marche tellement dans le même temps que la légère, qu'elle ne dépasse pas ce temps ni en cent oscillations, ni en mille, du plus petit intervalle, mais elle marche d'un pas tout à fait égal... »

« Éloignant le pendule de plomb de 50° de la verticale, et le laissant en liberté, il court, et dépassant la verticale presque de 50 autres degrés, il décrit un arc de près de 100°. Retournant alors en arrière sur lui-même, il décrit un autre arc plus petit ; et continuant ses oscillations, après un grand nombre de celles-ci, il revient enfin au repos. Chacune de ces oscillations se fait dans des temps égaux, tant celle de 90°, que celle de 50°, ou de 20°, de 10°, de 4°. Il s'ensuit que la rapidité du mobile diminue toujours, puisque dans des temps égaux il décrit successivement des arcs de plus en plus petits... »

« Ensuite, quant à la proportion des temps des oscillations des mobiles suspendus à des fils de différentes longueurs, des expériences répétées, que chacun peut faire, m'ont démontré que ces temps sont en proportion sous-doublée<sup>2</sup> des longueurs des fils ; en d'autres termes, les longueurs des fils sont en proportion doublée des temps, c'est-à-dire qu'elles sont comme les carrés des temps des oscillations isolées ou d'un égal nombre d'oscillations de sorte que, si l'on veut que le temps des oscillations d'un pendule soit double du temps des oscillations d'un autre, il faut que la longueur de la corde de celui-là soit quadruple de la longueur de la corde de celui-ci. Et alors

---

<sup>1</sup>Coudée : unité de mesure, équivalente à la distance entre le coude et l'extrémité du médium soit environ 50 cm

<sup>2</sup>Les périodes du pendule sont proportionnelles à la racine carrée des longueurs.

dans les temps d'une vibration d'un pendule, un autre en fera trois si sa corde est neuf fois moins longue que celle de l'autre. Il suit de là que les longueurs des cordes ont entre elles la proportion réciproque qu'ont les carrés des nombres des oscillations qui se font dans le même temps<sup>3</sup>. . . »

Galilée n'avait pas vu que la période dépend de l'amplitude pour de grandes oscillations. Marin Mersenne (1588-1648) relève l'erreur dans sa traduction, adaptation-compilation (Nouvelles pensées de Galilée, Liv. I, Art. XVII, Paris 1639) :

« Si l'auteur eût été plus exact en ses essais, il eût remarqué que la corde est sensiblement plus longtemps à descendre depuis le haut de son quart de cercle jusqu'à la perpendiculaire (verticale), que lorsqu'on la tire seulement dix ou quinze degrés, comme témoignent les deux bruits que font deux cordes égales, frappant contre un ais (planche) mis au point de la perpendiculaire. Et s'il eût seulement nommé jusqu'à trente ou quarante retours de l'une tirée vingt degrés ou moins, et de l'autre quatre-vingts ou nonante degrés, il est connu que la moins tirée fait un retour davantage sur trente ou quarante retours ; et si l'on pouvait toujours en faire aller une à quatre-vingts degrés, tandis que celle de dix ou vingt degrés irait se diminuant, celle-ci pourrait gagner un retour sur dix ou douze retours.»

### « L'horloge » de Galilée

Galilée [3, 4, 5] 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. Son fils, Vincenzo Galileo commença à construire l'horloge conçue par son père mais il n'eut pas le temps de l'achever avant sa propre mort le 16 mai 1649.

Lorsque le Prince Léopold de Médicis (1617-1675) reçut un exemplaire de l'ouvrage de Huygens « Horologium » en octobre 1658 puis une horloge équipée d'un pendule, c'est Vincenzo Viviani (1622-1703) disciple de Galilée qui fut chargé par le prince d'un rapport sur la priorité de l'invention de Galilée.

L'« horloge de Galilée » a été réalisée plusieurs fois d'après les dessins de Viviani pour certains musées : Istituto e Museo di storia della scienza » à Florence, « Science Museum » à Londres, « Smithsonian Institution » à Washington. L'échappement de Galilée est particulièrement intéressant du point de vue historique et du point de vue technologique.

---

<sup>3</sup>Les longueurs du pendule sont proportionnelles au carré des périodes.

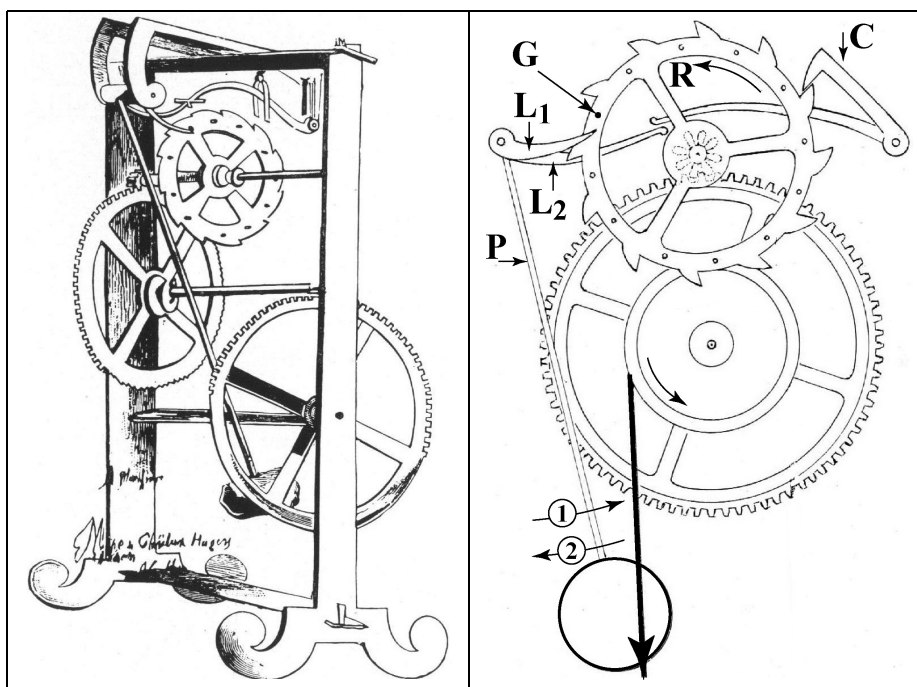


FIG. 2 – « Horloge de Galilée ». Copie du croquis de Viviani. Reconstitution de l'échappement [6].  
Le train d'engrenages ne comprend que deux roues pour simplifier

- Le principe est tout nouveau : la verge à palette de la figure 1 est supprimée.
- 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. La figure 2 en montre le fonctionnement :
  1. En bout d'oscillation à droite le levier  $L_2$ , solidaire du pendule, soulève le cliquet **C** et libère la roue **R** dont une des goupilles vient appuyer sur l'autre levier  $L_1$
  2. La pression de la goupille **B** arrête le mouvement du pendule et le relance vers la gauche ; après avoir parcouru un petit arc, le pendule abandonné par la goupille oscille librement ; en même temps le levier  $L_2$  abandonne le cliquet **C** qui en tombant arrête la roue **R**.
- Le pendule est fixé à un axe tournant sur pivot (les frottements sont importants).
- 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. . .
- L'axe du pendule est pourvu de deux bras :  $L_1$  reçoit l'impulsion à l'aide des chevilles de la roue d'échappement,  $L_2$  arrête cette roue en laissant tomber au bon moment le crochet dans l'une des dents à rochets.

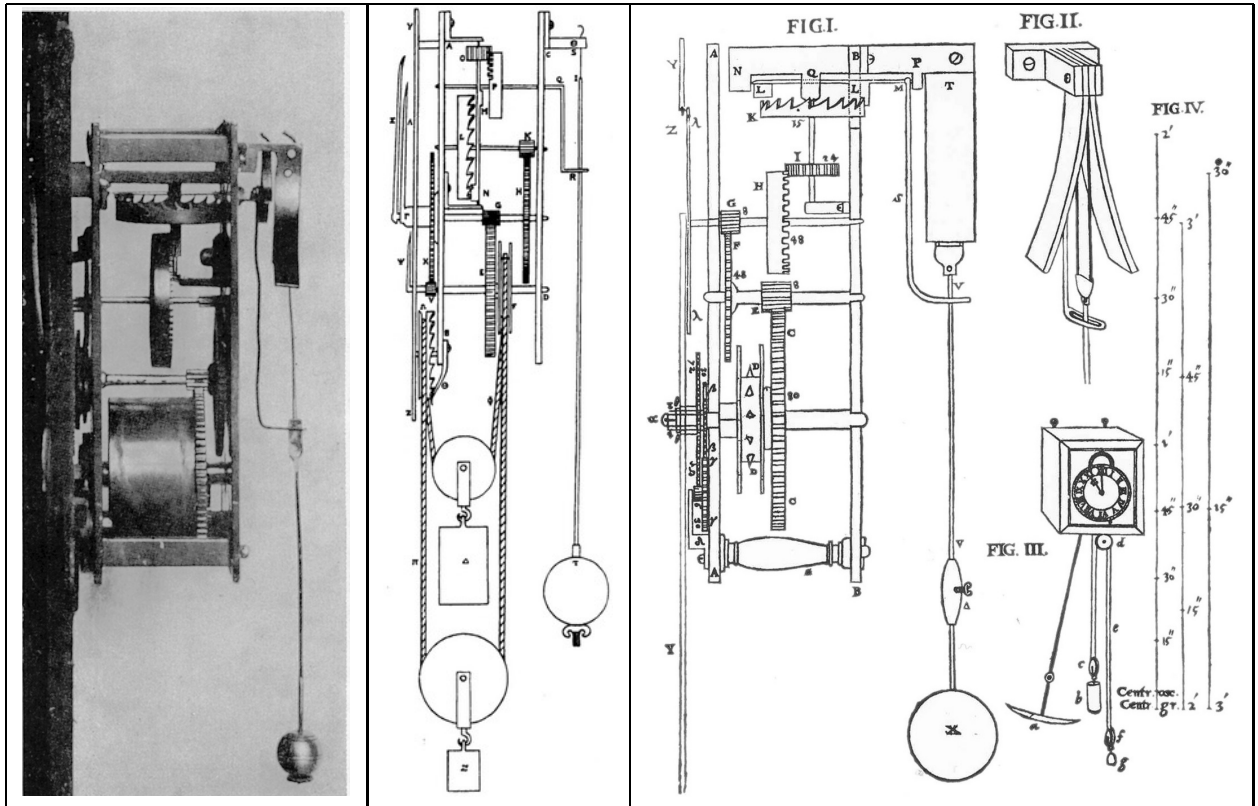


FIG. 3 – Huygens : Horloge de 1657, Horologium (1658) et Horologium oscillatorium (1673)

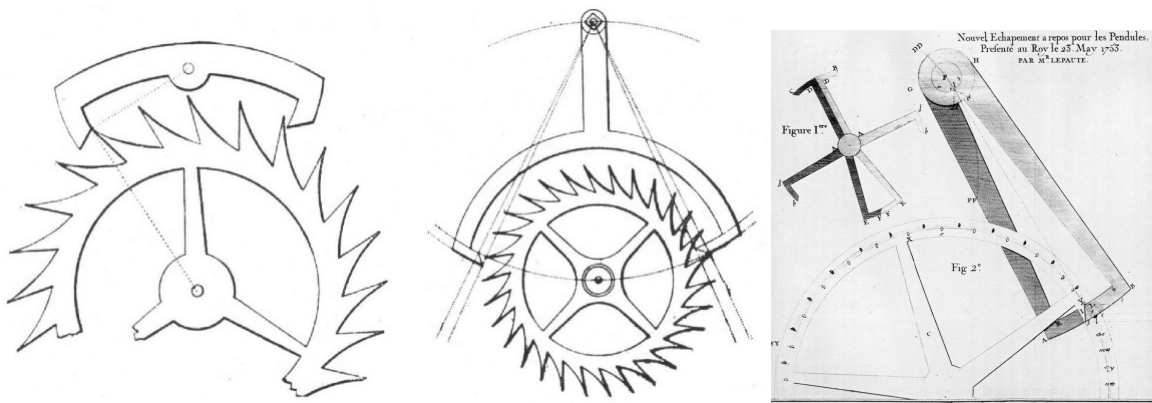


FIG. 4 – Echappements : William Clement (1670), Graham (1715), Lepaute (1753)