

M. Delaunay, directeur de l'Observatoire de Paris. Son corps a été retrouvé à l'île Pelée, à 5 kilomètres de Cherbourg. » Les dépêches successives firent connaître que les trois autres victimes étaient M. Millot, cousin de M. Delaunay, et les matelots qui conduisaient la barque.

Le corps de M. Delaunay, entouré de soins pieux par l'administration maritime de Cherbourg, fut ramené à l'Observatoire de Paris et transporté de là au cimetière de Ramerupt (Aube).

Le corps de M. Delaunay ayant quitté Paris, aucun discours officiel ne put être prononcé sur sa tombe; l'Académie, le Bureau des longitudes, l'Observatoire, l'École des mines, firent imprimer les paroles qui devaient être dites en leur nom.

« Adieu, cher confrère, disait M. Faye, au nom de l'Institut, nous garderons tous le souvenir de votre grand esprit, si noblement uni à tant de loyauté et d'amour du bien. »

Et M. Elie de Beaumont, s'interrompant au milieu d'un discours qu'il prononçait à l'Académie sur les travaux du géomètre Plana, le comparait à Delaunay et disait de tous deux : « Modèles de toutes les vertus qui sont l'honneur du savant, ils mériteraient que leurs images fussent placées, voisines l'une de l'autre à l'École polytechnique, où tous deux avaient puisé, à vingt-quatre ans de distance, leur instruction première. »

ALBERT LÉVY.

COURS ÉLÉMENTAIRE

D'ASTRONOMIE

Ernesto Carria.

§ 1. On donne, en général, le nom d'*astres* au soleil, à la lune, et à cette multitude de points étincelants, ou étoiles, dont le ciel est parsemé pendant la nuit. L'astronomie a pour objet l'étude des astres; elle comprend l'ensemble des connaissances qu'on a pu acquérir sur leurs mouvements, leurs dimensions et leur constitution physique.

Nous nous proposons d'exposer les éléments de cette science, en insistant d'une manière toute spéciale sur ceux des phénomènes astronomiques qui jouent un rôle important dans notre existence. Mais, avant d'entrer dans cette étude, nous commencerons par faire connaître les instruments divers qui ont servi et qui servent encore aux observations astronomiques. Ces instruments, grossiers dans l'origine, se sont perfectionnés peu à peu, à mesure que la science faisait des progrès, et sont arrivés, dans ces derniers temps, à un degré de perfection extrêmement remarquable. La connaissance des moyens d'observation fera mieux saisir les différents résultats auxquels on est arrivé, permettra de juger du degré d'exactitude qu'ils comportent, et fera concevoir comment on pourrait vérifier après coup la réalité des faits dont se compose la science astronomique.

CHAPITRE PREMIER

DES INSTRUMENTS QUI SERVENT AUX OBSERVATIONS ASTRONOMIQUES.

§ 2. Les instruments nécessaires aux observations astronomiques sont de trois sortes :

1° Les uns sont destinés à augmenter la puissance de la vue, à nous faire voir les astres dans des conditions beaucoup plus favorables que celles qui se présentent naturellement à nous, pour étudier leurs formes, leurs apparences, les phénomènes qui se passent à leur surface, et entrer, autant que possible, dans la connaissance de leur constitution physique : ce sont les *lunettes* et les *télescopes*.

2° D'autres sont destinés à la mesure des angles, dont la connaissance est nécessaire pour déterminer complètement la position de chaque astre dans le ciel.

3° Enfin, les astres étant constamment en mouvement, réel ou apparent, on peut bien déterminer à chaque instant la position de chacun d'eux au moyen des instruments dont on vient de parler ; mais cela ne suffit pas pour qu'on ait une connaissance complète de leurs mouvements. Il faut encore qu'on sache combien de temps chacun de ces astres met pour aller d'une première position à une seconde, puis de cette seconde position à une troisième, etc. ; on a donc besoin d'instruments qui servent à mesurer le temps. Ce sont les *horloges* et les *chronomètres*.

Nous commencerons par faire connaître ces derniers instruments ; ensuite nous décrirons les *lunettes*, les *télescopes*, et enfin les instruments destinés à la mesure des angles.

INSTRUMENTS QUI SERVENT A MESURER LE TEMPS.

§ 3. **Principe de la mesure du temps.** — Tout le monde a l'idée de ce que c'est que le *temps*. Lorsque deux faits s'accomplissent l'un après l'autre, on dit qu'entre les deux il s'est écoulé un certain intervalle de temps. Cet intervalle de temps est plus ou moins long, et l'on conçoit que sa durée puisse être exprimée par un nombre tout aussi bien que la longueur d'une ligne, le

poinds d'un corps, etc. Voyons par quels moyens on peut y arriver.

Supposons qu'un même phénomène se reproduise plusieurs fois de la même manière, et dans des circonstances identiquement les mêmes ; on sera en droit de regarder comme égaux les intervalles de temps qu'il aura employés successivement à se produire. C'est ainsi que, si l'on prend différents corps exactement pareils, et qu'on les laisse tomber, les uns après les autres, de la même hauteur et dans un air tranquille, se trouvant toujours dans les mêmes conditions de température et d'élasticité, le temps qu'un de ces corps mettra à tomber sera égal à celui que mettra pour tomber chacun des autres corps. Si deux de ces intervalles de temps égaux se succèdent sans interruption, c'est-à-dire si l'instant où le second commence coïncide avec celui où le premier finit, il en résultera un intervalle de temps total qui sera double de chacun d'eux. De même la succession non interrompue de trois, quatre, cinq, ... intervalles de temps égaux entre eux formera un intervalle de temps unique qui sera triple, quadruple, quintuple, ... de l'un d'eux.

On conçoit, d'après cela, que, pour évaluer un intervalle de temps quelconque en nombre, il suffira d'observer un phénomène qui se reproduise successivement, indéfiniment, sans interruption, et dans des circonstances exactement les mêmes. Si la durée de ce phénomène est prise pour unité de temps, le nombre de fois qu'il se produira pendant l'intervalle de temps que l'on veut mesurer sera la valeur numérique de cet intervalle de temps. Tel est le principe de la mesure du temps.

Pour réaliser ce qui vient d'être dit, on a imaginé divers appareils que nous allons faire connaître, et dans lesquels on a cherché à se rapprocher autant que possible des conditions rigoureuses que nous avons indiquées comme devant servir de base à la mesure du temps. Mais, quel que soit le soin que l'on apporte à la construction de ces appareils, ils conservent toujours quelque chose de l'imperfection des œuvres de l'homme. Nous verrons plus tard que c'est dans les phénomènes astronomiques que l'on trouve la mesure du temps la plus exacte. Jusque-là cependant nous regarderons les instruments que nous allons décrire comme nous fournissant les seuls moyens que nous puissions employer pour mesurer le temps, et c'est sur leurs indications que nous nous fonderons pour arriver à la connaissance des lois du mouvement des astres.

§ 4. **Clepsydes.** — Les premiers instruments dont on se soit servi pour mesurer le temps sont les *clepsydes*, ou horloges à eau, qui ont été en usage dans l'antiquité et ont été employées

en différents lieux aux recherches astronomiques. Voici en quoi ils consistent.

Imaginons qu'un réservoir contienne de l'eau, et qu'un orifice pratiqué vers sa partie inférieure permette au liquide de s'écouler. Si, par un moyen quelconque, on parvient à rendre l'écoulement régulier, il sortira du réservoir des quantités égales de liquide en temps égaux. Le volume de l'eau écoulée dans un temps quelconque pourra donc servir de mesure à ce temps.

Pour obtenir un écoulement régulier de l'eau contenue dans le réservoir, il suffit d'y entretenir un niveau constant; on y arrive très-facilement au moyen de la disposition suivante. Le réservoir A (*fig. 1*) est constamment alimenté par un robinet B. La quantité

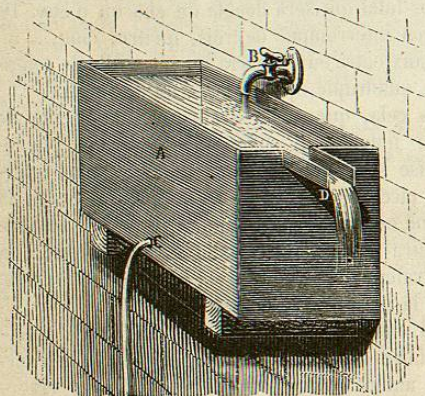


FIG. 1.

d'eau fournie par ce robinet est plus grande que celle qui doit traverser l'orifice C, lorsque l'écoulement est régulièrement établi. Par suite de cet excès du liquide qui arrive dans le réservoir A, le niveau tend à s'y élever de plus en plus; mais une décharge latérale D s'y oppose en laissant constamment sortir le liquide excédant. Le

niveau de l'eau conserve donc ainsi une position invariable dans le réservoir A, et l'écoulement s'effectue par l'orifice C avec une vitesse qui reste toujours la même. Pour mesurer un intervalle de temps quelconque, au moyen de l'écoulement ainsi obtenu, il n'y a plus qu'à recueillir l'eau qui sort du réservoir pendant cet intervalle de temps et à en déterminer le volume. Mais, au lieu de cela, on dispose l'appareil de manière à lui faire donner des indications continues. Il suffit, en effet, que l'eau sortant du réservoir tombe dans un vase de forme cylindrique ou prismatique et s'y accumule de plus en plus. Le niveau de l'eau montera dans ce vase avec une vitesse uniforme, et marquera le temps par la position qu'il

occupera, position qui pourra d'ailleurs être aisément déterminée au moyen d'une échelle graduée fixée au vase.

Souvent, afin de rendre les indications plus visibles, et aussi pour donner plus d'élégance à l'appareil, on place un flotteur dans le vase où se rend l'eau écoulée; ce flotteur, formé d'un morceau de liège, porte un index qui se trouve à côté d'une échelle graduée, et vient correspondre successivement aux diverses divisions de cette échelle, à mesure que le liquide le soulève en s'accumulant de plus en plus dans le vase. C'est ce que montre la figure 2, qui représente une clepsydre de cette espèce. L'eau, dont l'écoulement sert à mesurer le temps, se rend dans une capacité que l'on n'aperçoit pas, et qui est située vers le bas de l'appareil; elle y fait monter progressivement un flotteur, qui supporte les deux petites figures placées de chaque côté de la colonne supérieure; une de ces figures porte une baguette dont l'extrémité aboutit à une échelle tracée sur la colonne, et indique le temps par la division de l'échelle à laquelle cette baguette correspond.

Une autre disposition, qui a été également adoptée, avait pour objet de faire marquer le temps par une aiguille mobile sur un cadran, comme cela a lieu dans nos horloges actuelles. A cet effet, le flotteur A (*fig. 3*), auquel l'eau de la clepsydre communique un mouvement ascendant, est attaché à l'extrémité d'une chaîne qui s'enroule autour d'un cylindre horizontal B, et qui supporte à son autre extrémité un contre-poids C, un peu plus léger que le flotteur A. Le cylindre B peut librement tourner sur lui-même; il porte à l'une de ses extrémités une aiguille qui le suit dans ce mouvement, et qui parcourt ainsi toute la circonférence d'un cadran adapté à la face extérieure de

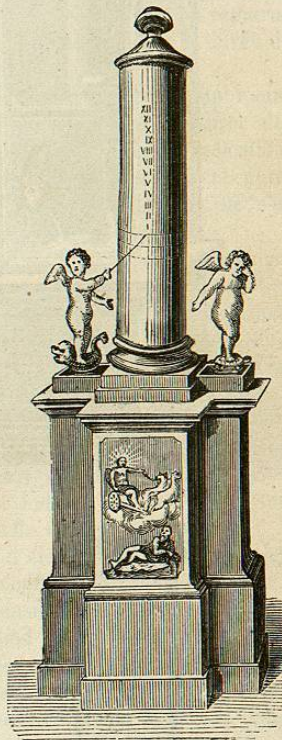


FIG. 2.

l'appareil. Lorsque le flotteur A monte, le contre-poids C descend, et la chaîne fait tourner le cylindre B, ainsi que l'aiguille qui y est fixée; cette aiguille marque le temps par la position qu'elle occupe sur le cadran.

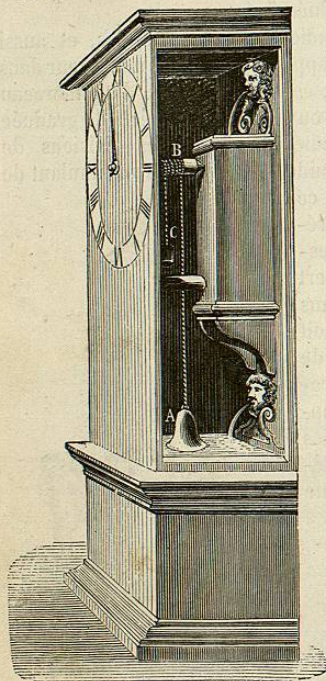


FIG. 3.

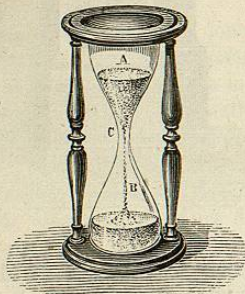


FIG. 4.

disposé symétriquement de part et d'autre de l'ouverture C, on peut

Les clepsydres sont les seuls instruments dont les anciens se soient servis pour mesurer le temps, dans leurs recherches astronomiques, indépendamment de l'observation des astres eux-mêmes. Ces instruments, dont les indications n'étaient pas susceptibles d'acquiescer une grande précision, sont complètement abandonnés de nos jours.

§ 5. **Sabliers.** — Le sablier diffère de la clepsydre en ce que l'eau y est remplacée par du sable fin. C'est l'écoulement du sable par un orifice qui sert à mesurer le temps.

Le sablier se compose de deux vases de verre A, B (fig. 4), de même forme, fixés l'un à l'autre de manière que leurs ouvertures se correspondent en C. Du sable fin et aussi régulier que possible a été introduit dans l'un des deux vases avant leur réunion. Ce sable peut passer dans l'autre vase, lorsqu'on donne à l'appareil la position qu'indique la figure; mais, pour que ce passage s'effectue lentement, on rétrécit l'ouverture C par laquelle les deux vases communiquent l'un avec l'autre. Le sable étant fin et régulier et l'instrument étant

admettre que le temps employé par le sable à passer d'un vase dans l'autre est toujours le même, soit qu'il sorte de A pour aller en B, soit qu'au contraire il sorte de B pour aller en A.

Pour se servir d'un sablier, on le pose sur une table, en ayant soin de mettre en haut le vase qui contient le sable. Aussitôt le sable commence à couler dans le vase inférieur, et l'écoulement continue ainsi d'une manière très-régulière, jusqu'à ce que le vase supérieur soit complètement vidé. Alors on retourne l'instrument, et le sable recommence à couler dans le vase qu'il vient de quitter. Lorsque ce second écoulement est terminé, on retourne de nouveau le sablier, et ainsi de suite, pendant toute la durée de l'intervalle de temps dont on veut avoir la mesure.

On voit par là que l'emploi du sablier est beaucoup moins commode que celui de la clepsydre, surtout pour mesurer des intervalles de temps un peu longs. D'un autre côté, les indications qu'il fournit sont encore moins précises que celles de cet autre instrument. Aussi, quoiqu'il ait été connu des anciens, ne s'en sont-ils pas servis pour leurs observations astronomiques.

§ 6. **Premières horloges à poids.** — L'invention des horloges à poids, qui remonte à une époque déjà ancienne, mais peu connue, a été un grand pas fait pour arriver à une mesure exacte du temps. Ces horloges, formées uniquement de pièces solides dont les mouvements sont solidaires, sont susceptibles de présenter beaucoup plus de constance et de régularité dans leur marche que les clepsydres et les sabliers. Elles se trouvent dans des conditions beaucoup plus favorables, pour que les mouvements successifs que prennent leurs différentes pièces aient entre eux ce caractère d'identité que nous avons indiqué comme devant former la base de toute mesure artificielle du temps (§ 3).

Les premières horloges à poids qui aient été construites étaient cependant loin de satisfaire à ces conditions de régularité dans le mouvement. Voici en quoi elles consistent. Un poids A (fig. 5), attaché à l'extrémité d'une corde, tend à faire tourner un cylindre B sur lequel la corde est enroulée. Ce cylindre, mobile autour de son axe de figure, porte une roue dentée C, qui tourne nécessairement avec lui. La roue C, engrenant avec un pignon D, oblige l'axe E de ce pignon à tourner en même temps que le cylindre B. De même le mouvement de l'axe E se transmet, par la roue F et le pignon G à un autre axe H; et ainsi, de proche en proche, un dernier axe I reçoit un mouvement de rotation, par suite de l'action du poids A sur le cylindre B. Cet axe I porte à son extrémité une roue dentée K, d'une forme particulière, à laquelle on donne

le nom de roue de rencontre. A côté de cette roue K, se trouve un axe vertical L, muni de deux petites palettes planes M, N,

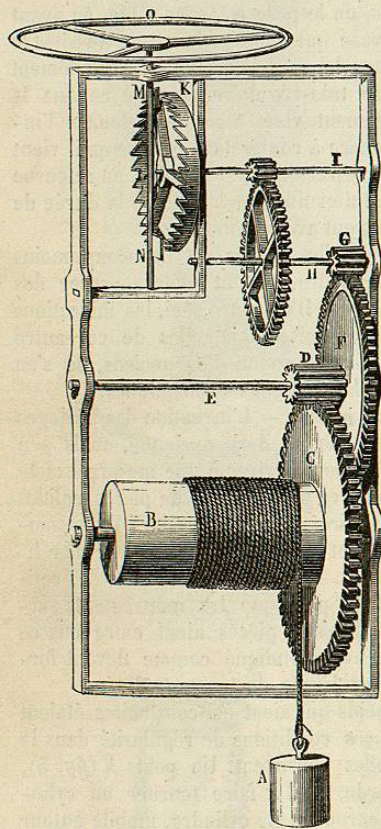


FIG. 5.

dirigées à angle droit l'une sur l'autre, et tellement disposées que la première puisse être rencontrée par les dents inférieures de la roue K, et la seconde par les dents supérieures de la même roue. Enfin l'axe L porte à sa partie supérieure une roue sans dents O, nommée *balancier*, sorte de volant analogue à ceux qu'on voit dans certaines machines et qui servent à en régulariser le mouvement. La présence de l'axe L, avec ses palettes M, N, s'oppose à ce que la roue de rencontre K prenne un mouvement continu, par suite de l'action du poids moteur A. A peine cette roue a-t-elle commencé à tourner, que ses dents rencontrent l'une des palettes M, N, et transmettent ainsi brusquement à l'axe L un mouvement de rotation; bientôt les dents de la même roue rencontrent l'autre palette, arrêtent

l'arbre L dans son mouvement, et le font tourner en sens contraire; puis la première palette est rencontrée de nouveau par les dents de la roue K, et ainsi de suite. L'arbre L prend ainsi un mouvement alternatif, et en même temps tout le reste du mécanisme, depuis le cylindre B jusqu'à la roue de rencontre K, est arrêté périodiquement dans son mouvement. La partie de l'appareil dont le mouvement

alternatif détermine ces arrêts successifs se nomme le *régulateur*.

Cette disposition des premières horloges à poids donne bien lieu en apparence à la reproduction successive et indéfinie d'un même phénomène, qui semble s'accomplir toujours dans des conditions identiquement les mêmes. Mais, si l'on y fait attention, on verra que ce phénomène, c'est-à-dire le mouvement que prend l'axe L, soit dans un sens, soit dans l'autre, par suite de l'action de la roue K sur une des palettes M, N, est loin de s'effectuer avec ce caractère apparent de régularité. Le mouvement du régulateur est produit par la pression que l'une des palettes M, N, éprouve de la part d'une des dents de la roue K; cette pression est le résultat de l'action du poids A sur le cylindre B, action qui conserve bien constamment la même intensité; mais la transmission de cette action à la roue K, par l'intermédiaire des rouages dont l'horloge se compose, fait que la pression exercée par les dents de la roue K sur les palettes M, N, ne reste pas toujours la même. Il se produit, en effet, entre les dents des diverses roues qui engrènent les unes avec les autres, des frottements qui absorbent une portion de l'action du poids moteur A; et il est impossible que les diverses dents de chaque roue soient taillées avec une telle similitude de forme entre elles, qu'il n'en résulte pas des changements dans la grandeur des frottements, suivant que c'est telle ou telle dent qui sert à transmettre le mouvement. Il s'ensuit que les mouvements partiels et alternatifs de l'axe L et du balancier O ne s'effectuent pas tous avec la même rapidité, et qu'en conséquence les intervalles de temps compris entre les moments d'arrêt successifs des rouages ne sont pas égaux.

L'imperfection que nous venons de signaler dans les horloges à poids telles qu'on les construisait d'abord, fait que pendant longtemps on leur a préféré les clepsydres comme étant plus exactes.

Mais, par l'application du pendule à ces horloges, on est parvenu à leur donner une telle supériorité de marche, que les clepsydres sont dès lors complètement tombées en désuétude.

§ 7. *Pendule*. — Le pendule, dans sa plus grande simplicité, consiste en un corps pesant A (*fig. 6*), de petites dimensions, tel qu'une balle de plomb, suspendu à l'extrémité inférieure d'un fil très-délié, dont l'extrémité supérieure B est fixe. Par suite de l'action de la pesanteur, le corps A tend naturellement à se placer dans une position d'équilibre telle que le fil AB soit vertical. Si l'on vient à déranger le pendule pour le placer dans la position qu'indique la figure 7, et qu'ensuite on l'abandonne à lui-même,

la pesanteur le mettra aussitôt en mouvement. Il se rapprochera ainsi de la position d'équilibre CB dont nous avons parlé d'abord; mais lorsqu'il l'aura atteinte, il la dépassera en vertu de sa vitesse acquise, et s'en éloignera de l'autre côté, jusqu'à ce qu'il ait pris une position A'B symétrique de la première AB, par rapport à la verticale CB. Alors le pendule, ayant perdu toute sa vitesse, reviendra en sens contraire, par suite de l'action incessante de la pesanteur; il repassera par la position verticale CB, et s'en éloignera ensuite de l'autre côté pour revenir dans sa position initiale

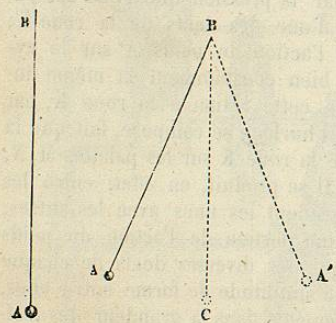


FIG. 6.

AB. A partir de là, un nouveau mouvement recommencera comme précédemment, et ainsi de suite. Si ce mouvement oscillatoire du pendule s'effectuait dans un espace vide d'air, et s'il était possible d'éviter les résistances qui se produisent toujours à son point de suspension B, l'amplitude des oscillations successives resterait toujours la même, et le pendule marcherait indéfiniment. Mais, en

FIG. 7.

réalité, les résistances dues à l'air dans lequel se meut le pendule et à son mode de suspension, diminuent peu à peu ses oscillations, et, au bout de quelque temps, elles finissent par disparaître complètement.

En étudiant le mouvement du pendule, Galilée a trouvé (en 1639) les deux lois suivantes : 1° La durée des oscillations d'un pendule est sensiblement la même, quelle que soit leur amplitude, pourvu que cette amplitude soit petite; 2° les durées des petites oscillations de divers pendules sont entre elles dans le même rapport que les racines carrées des longueurs de ces pendules. La connaissance de ces lois lui suggéra l'idée de se servir des oscillations du pendule pour la mesure du temps. Il suffit, en effet, pour cela, de mettre un pendule en mouvement et de compter les oscillations qu'il effectue dans l'intervalle de temps que l'on veut évaluer. La diminution progressive de l'amplitude de ses oscillations n'empêche pas que leur durée ne reste la même, comme cela résulte de la première des lois qui viennent d'être énoncées; et, par conséquent, le mouvement du pendule réalise la succession non interrompue de phénomènes ayant tous la même durée, ce qui

rentre complètement dans l'idée générale que nous nous sommes faite de la mesure artificielle du temps (§ 3). D'un autre côté, la seconde des lois trouvées par Galilée montre que l'on peut donner au pendule une longueur telle, que la durée de chacune de ses petites oscillations soit précisément égale à l'unité de temps que l'on veut adopter.

Galilée et quelques astronomes après lui employèrent en effet le pendule comme moyen de mesurer le temps dans leurs observations astronomiques. Mais l'emploi de cet instrument, si simple en lui-même, présentait des difficultés, à cause de la nécessité de suivre tous ses mouvements pour compter les oscillations, et aussi à cause du peu de temps au bout duquel un pendule abandonné à lui-même cesse d'effectuer des oscillations appréciables.

Peu de temps après, en 1657, Huyghens eut l'heureuse idée de construire une horloge en adaptant le pendule de Galilée aux anciennes horloges à poids. A partir de là, les indications fournies par les horloges sont devenues incomparablement plus exactes qu'elles ne l'étaient auparavant, et cela a fait faire un pas immense à l'astronomie d'observation.

§ 8. Horloges à pendule et à poids. — Dans les horloges à poids dont nous avons parlé précédemment (§ 6), le poids moteur donnait un mouvement de rotation à une série d'arbres horizontaux communiquant entre eux au moyen de roues dentées; et ce mouvement d'ensemble était arrêté, à chaque instant, par l'action des palettes fixées à l'axe du balancier sur les dents de la roue de rencontre. Les intervalles de temps compris entre les moments d'arrêt successifs ainsi produits n'étaient pas parfaitement de même durée, ainsi que nous l'avons expliqué. Pour obvier à cet inconvénient, Huyghens remplaça le régulateur à balancier, dont les mouvements alternatifs étaient uniquement le résultat de l'action du poids moteur, par un pendule dont les oscillations devaient s'effectuer indépendamment de cette action; et il disposa la machine de manière que le mouvement des rouages fût arrêté à chacune de ses oscillations.

Diverses dispositions ont été successivement imaginées pour établir la liaison entre les rouages et le pendule. La partie du mécanisme qui a pour objet d'établir cette liaison, par l'intermédiaire de laquelle le pendule arrête périodiquement le mouvement produit par le poids du moteur, se nomme *échappement*. Nous nous contenterons de décrire l'échappement à ancre, un de ceux que l'on emploie le plus maintenant et qui remplissent le mieux l'objet auquel ils sont destinés.

Cet échappement est représenté ici (fig. 8). Une pièce ABC, en forme d'ancre, est suspendue à un axe horizontal D, et peut librement tourner autour de cet axe. L'ancre reçoit du pendule un mouvement oscillatoire autour de son axe de suspension. Entre ses deux extrémités A et C, se trouve une roue E, qui est fixée au dernier arbre du mécanisme de l'horloge. Cette roue E, à laquelle

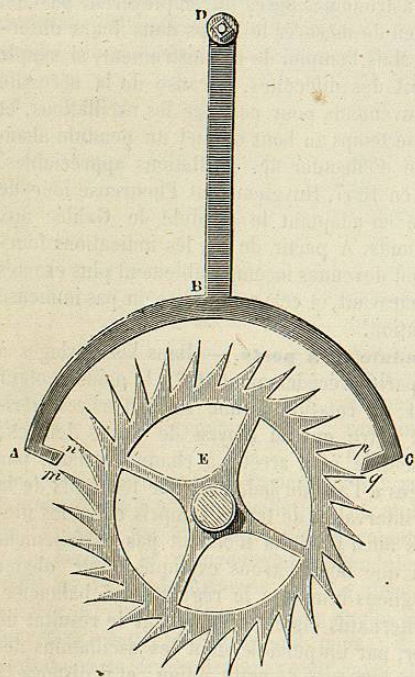


FIG. 8.

le moteur tend constamment à donner un mouvement de rotation, remplace la roue de rencontre K de la figure 5 (p. 8). Pendant le mouvement d'oscillation de l'ancre, les dents de cette roue viennent alternativement s'appuyer sur la face inférieure de la partie A, et sur la face supérieure de la partie C. Ces deux faces sont d'ailleurs taillées suivant des arcs de cercle concentriques à l'axe D : en sorte que, pendant tout le temps qu'une dent de la roue E est arrêtée par une des extrémités de l'ancre, cette dent, et par suite la roue, restent complètement immobiles.

Les deux extrémités A et C de l'ancre présentent, du côté de la roue, deux parties *mn*, *pq*, inclinées en sens contraire, sur lesquelles les dents de la roue doivent glisser avant d'échapper. Au moment où ce glissement se produit, la dent exerce sur l'ancre une pression qui tend à augmenter sa vitesse, et l'ancre réagit de son côté sur le pendule, pour entretenir son mouvement. Sans la présence de ces deux petits plans inclinés, l'amplitude des oscillations du pendule décroîtrait progressivement, en raison des

résistances occasionnées par l'air et le mode de suspension du pendule, et aussi en raison de celles qui proviennent du frottement de la roue d'échappement sur les faces de l'ancre : ces résistances rendraient, au bout de peu de temps, les oscillations du pendule assez petites pour que les dents de la roue E n'échappassent plus, et l'horloge s'arrêterait.

La figure 9 montre de quelle manière l'ancre est mise en communication avec le pendule. L'axe horizontal D, auquel elle est fixée, porte à un bout une tige F, qui se termine inférieurement par une fourchette horizontale G. Le pendule, dans lequel le fil de suspension est remplacé par une tige rigide, est disposé de manière que cette tige passe entre les branches de la fourchette; en sorte que le pendule ne peut pas osciller sans que l'ancre oscille en même temps.

On comprend aisément le grand avantage qui résulte de la substitution du pendule au balancier des premières horloges à poids. Ici l'action du poids moteur, modifiée irrégulièrement par les frottements qui se produisent dans les rouages, n'a plus qu'une faible influence sur le mouvement oscillatoire qui détermine les arrêts successifs du mécanisme; cette influence ne se fait sentir que dans le frottement des dents de la roue d'échappement sur les faces de l'ancre, frottement qu'on peut rendre presque nul, et dans les impulsions que l'ancre reçoit des dents, au moment où elles échappent. Il en résulte bien de légères variations dans l'amplitude des oscillations du pendule; mais la durée de ces oscillations n'en est pas sensiblement altérée, en raison de la précieuse propriété du pendule découverte par Galilée.

§ 9. On cherche naturellement à disposer le pendule de manière à diminuer autant que possible la résistance occasionnée par l'air dans lequel il se meut, ainsi que celle qui résulte de son mode de suspension.

Pour diminuer celle qui provient de l'air atmosphérique, on donne habituellement au corps massif qui termine inférieurement le pendule, la forme d'une lentille dont les plus grandes dimensions sont dirigées dans le plan du mouvement oscillatoire du pendule. Par cette disposition, le pendule ne présente qu'une faible surface

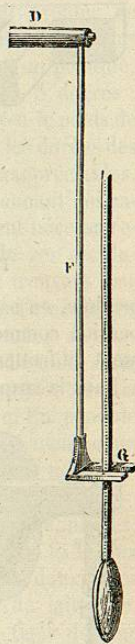


FIG. 9.

à l'air, et la lentille, le rencontrant par sa tranche, en écarte les molécules sans grande difficulté.

Quand au mode de suspension du pendule, il doit être tel que le mouvement oscillatoire puisse s'effectuer sans qu'il se produise de frottement entre les parties mobiles et les parties fixes de l'appareil. On adopte pour cela deux dispositions différentes.

Dans la suspension à couteau (*fig. 10*), la tige du pendule porte à sa partie supérieure une pièce d'acier, faisant saillie de part et d'autre, et se terminant, vers le bas, par une arête fine, mais non tranchante; cette espèce de couteau repose, par son arête, au fond d'un sillon que l'on a pratiqué sur la face supérieure d'un support fixe, formé d'une matière très-dure, telle que de l'acier ou de l'agate. Le

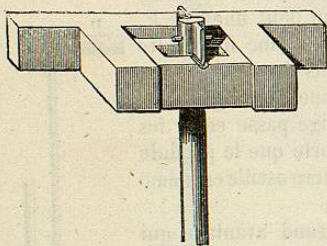


FIG. 10.

pendule, en oscillant, tourne autour de l'arête du couteau de suspension comme autour d'un axe, et il n'en résulte pas sensiblement de frottement.

Dans la suspension à ressort (*fig. 11*), la tige A du pendule est accrochée à la partie inférieure d'une pièce BB, formée essentiellement de deux lames minces d'acier dont les extrémités supérieures sont fortement serrées entre les mâchoires d'une pince fixe. Le pendule ne peut osciller qu'en faisant fléchir ces lames d'acier, qui se courbent ainsi tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. Il est évident qu'ici il ne peut pas y avoir de frottements résultant des oscillations du pendule; mais on peut se demander si la roideur des ressorts de suspension ne produit pas le même effet que des frottements, en faisant obstacle au mouvement du pendule. En y réfléchissant on re-

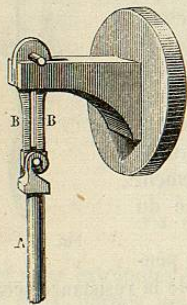


FIG. 11.

connait qu'il n'en est rien, c'est-à-dire que la roideur des ressorts n'est pas de nature à diminuer progressivement l'amplitude des oscillations, de manière à les faire disparaître complètement au bout de quelque temps. On voit en effet que, si d'une part la roideur des ressorts tend à diminuer la vitesse du pendule

pendant qu'il s'éloigne de la verticale, d'une autre part leur élasticité tend à accélérer son mouvement lorsqu'il s'en rapproche; en sorte qu'il en résulte une telle compensation, que, lorsque le pendule revient passer par la position verticale, il a exactement la même vitesse que si les ressorts de suspension n'avaient eu aucune influence sur sa marche, depuis son dernier passage par cette position. Il est bon d'observer cependant que l'action des ressorts de suspension modifie un peu la durée des oscillations. MM. Laugier et Winnerl ont même reconnu qu'on pouvait profiter de cette circonstance pour faire disparaître les très-petites différences qui existent encore entre les durées des oscillations d'un pendule, lorsque l'amplitude de ces oscillations varie de zéro à 5 degrés: en combinant convenablement la force des ressorts avec le poids de la lentille, on peut faire que, dans toute cette étendue, les durées des oscillations n'aient entre elles que des différences inappréciables.

§ 10. Les changements de température, en occasionnant des variations dans les dimensions d'un pendule, déterminent nécessairement des variations correspondantes dans la durée de ses oscillations, ainsi que cela résulte de la seconde des lois trouvées par Galilée. On parvient cependant à mettre le pendule à l'abri de ces variations, en le composant de plusieurs parties formées de matières différentes dont les dilatations se contrarient; de telle sorte que, malgré l'élévation ou l'abaissement de la température, la durée de ses oscillations reste constamment la même. Un pendule construit de manière à satisfaire à cette condition se nomme un *pendule compensateur*. On en a imaginé plusieurs; nous nous contenterons de faire connaître les deux principaux.

Le pendule compensateur à grille est représenté par la figure 12. La lentille L est suspendue à une traverse de laiton *aa*, fixée aux extrémités inférieures de deux tiges de fer *b, b*; ces deux tiges sont elles-mêmes suspendues à une seconde traverse de laiton *cc*, qui s'appuie sur les extrémités supérieures de deux tiges de zinc *d, d*; ces tiges de zinc sont supportées, vers le bas, par une troisième traverse *ee*, fixée à la partie inférieure de la tige centrale *fg*; enfin cette tige centrale, qui se prolonge vers le haut jusqu'au point de suspension du pendule, se compose d'une douille de laiton *f*, et d'une tige de fer *g* qui pénètre dans la douille et y est fixée par la goupille *h*. Lorsque la température vient à s'élever, la tige de fer *g* et la douille *f* s'allongent: la traverse *ee* s'éloigne donc du point de suspension du pendule. Si les tiges de zinc *d, d* ne changeaient pas de dimension, la traverse *cc* suivrait la précédente, et s'éloignerait comme elle du point de suspension, en glissant le

long de la tige *g*. La dilatation qu'éprouvent en même temps les tiges de fer *b, b*, oblige la traverse *aa* à s'éloigner de *cc*; et par conséquent, en vertu de ces allongements des tiges de fer *g* et *b, b*, et de la douille de laiton *f*, la lentille *L* s'abaisserait au-dessous de la position qu'elle occupait précédemment. Mais les tiges de zinc *d, d*, au lieu de conserver les mêmes dimensions, se dilatent comme les autres tiges, et même elles se dilatent plus fortement qu'elles; leur dilatation suffit pour remonter le cadre formé par les traverses *aa, cc*, et par les tiges de fer *b, b*, de telle manière que la lentille *L*, qui est supportée par ce cadre, reste à une même distance du point de suspension du pendule, malgré le changement de température. Jusque-là on ne voit pas à quoi sert la douille de laiton *f*; on aurait pu, en effet, la supprimer, et prolonger la tige de fer *g* jusqu'à la traverse *ee* à laquelle on l'aurait fixée. Cette douille a été adaptée à l'appareil de suspension de la lentille afin qu'on puisse rendre la compensation du pendule aussi exacte que possible, après qu'il est construit. En effet, quelque soin que l'on prenne pour déterminer *a priori* les longueurs que l'on doit donner aux diverses tiges métalliques, pour que la dilatation des tiges de zinc compense exactement celle des autres tiges, il est rare que les oscillations du pendule n'éprouvent pas encore quelque légère modification dans leur durée par l'effet des changements de température. Il suffit alors de déplacer la goupille *h*, en la mettant dans un des autres trous qui sont pratiqués, sur une certaine longueur, à la fois dans la douille *f* et dans la tige *g*. La partie de la douille *f* située au-dessous de cette goupille, et celle de la tige *g* située au-dessus, étant évidemment les seules portions de ces pièces dont les dilatations influent sur la position de la lentille, on remplace par là une certaine longueur de fer par une même longueur de laiton, ou in-

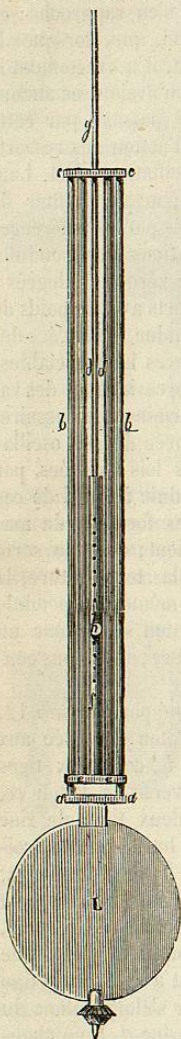


FIG. 12.

versement; et comme ces deux métaux ne se dilatent pas de même, on peut arriver ainsi, par le tâtonnement, à rendre la compensation du pendule très-exacte.

La figure 13 représente le pendule compensateur à mercure. La tige de fer *a* supporte à sa partie inférieure deux vases cylindriques de verre *b, b*, dans lesquels se trouve du mercure. Le mercure, par sa grande masse, tient lieu de lentille, et par sa grande dilatabilité il produit la compensation. Lorsque la température s'élève, la tige *a* s'allonge, et les vases *b, b*, s'éloignent du point de suspension du pendule; mais en même temps le mercure se dilate, et sa surface monte assez dans ces vases pour compenser l'abaissement qui résulte de la dilatation de la tige *a*.

L'exactitude de la mesure du temps étant absolument indispensable pour les observations astronomiques, on ne se contente pas encore de se servir d'horloges dans lesquelles le pendule a été mis à l'abri de l'influence de la température par des moyens tels que ceux que nous venons d'indiquer; mais on place ces horloges dans des lieux tellement choisis et tellement disposés, que la température y varie le moins possible.

§ 11. Les figures 14 et 15 montrent la disposition générale d'une horloge à pendule et à poids. Le poids moteur *A* agit à l'extrémité d'une corde qui est enroulée sur le cylindre *B*; il tend à faire tourner ce cylindre, et par suite la roue *C*; cette roue *C* engrène avec un pignon *D*, dont l'axe porte une deuxième roue *E*; le pignon *F* engrène avec la roue *E*, et sur son axe est fixée une troisième roue *G*; cette troisième roue engrène à son tour avec le pignon *H*, sur l'axe duquel se trouve une quatrième roue *K*; enfin la roue *K* engrène avec le pignon *L*, dont l'axe porte la roue d'échappement *M*. L'ancre *NN*, mobile autour de l'axe *O*, embrasse la partie supérieure de la roue *M*. L'axe *O* (*fig. 15*) porte une tige *S* qui se termine inférieurement par une fourchette *T*; la tige *UU* du pendule, dont *V* est la lentille, passe entre les branches de la fourchette *T*. Le pendule est suspendu par les deux ressorts *X, X*, qui fléchissent dans un sens ou dans l'autre, à mesure qu'il oscille.

L'unité de temps principale, à laquelle on rapporte la mesure d'un intervalle de temps quelconque, est le *jour*, dont nous don-

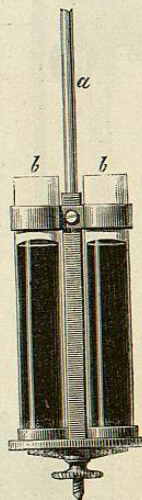


FIG. 13.