

Ayant ainsi considéré, sous tous les aspects essentiels, le système de la science astronomique, je dois procéder maintenant à l'examen philosophique de ses diverses parties, dans l'ordre établi ci-dessus. Mais il faut auparavant jeter un coup d'œil général sur l'ensemble des moyens d'observation nécessaires aux astronomes, ce qui fera l'objet de la leçon suivante.

VINGTIÈME LEÇON.

Considérations générales sur les méthodes d'observation
en astronomie.

Toutes les observations astronomiques se réduisent nécessairement, comme nous l'avons vu, à mesurer des temps et des angles. La nature de cet ouvrage ne comporte nullement une exposition, même sommaire, des divers procédés par lesquels en a enfin obtenu, dans ces deux sortes de mesures, l'étonnante précision que nous y admirons aujourd'hui. Il s'agit seulement ici de concevoir, d'une manière générale, l'ensemble des idées fondamentales qui ont pu successivement conduire à une telle perfection.

Cet ensemble se compose essentiellement, pour l'un et l'autre genre d'observations, de deux ordres d'idées bien distincts, quoiqu'il y ait entre eux une harmonie nécessaire : le premier est relatif au perfectionnement des instrumens; le second concerne certaines corrections fonamen-

tales apportées par la théorie à leurs indications, et sans lesquelles leur précision serait illusoire. Telle est la division naturelle de nos considérations générales à cet égard. Nous devons commencer par celles sur les instrumens.

Quoique les moyens gnomoniques aient dû être rejetés avec raison par les modernes, comme n'étant pas susceptibles de la précision nécessaire, il convient d'abord de les signaler ici dans leur ensemble, à cause de leur extrême importance pour la première formation de la géométrie céleste par les astronomes grecs.

Les ombres solaires, et même, à un degré moindre, les ombres lunaires, ont été, dans l'origine de l'astronomie, un instrument très précieux, immédiatement fourni par la nature, aussitôt que la propagation rectiligne de la lumière a été bien reconnue. Elles peuvent devenir un moyen d'observation astronomique sous deux rapports : envisagées quant à leur direction, elles servent à la mesure du temps; et, par leur longueur, elles permettent d'évaluer certaines distances angulaires.

Sous le premier point de vue, lorsque l'uniformité du mouvement diurne apparent de la sphère céleste a été une fois admise, il suffisait, évidemment, de fixer un style dans la direction,

préalablement bien déterminée, de l'axe de cette sphère, pour que l'ombre qu'il projetait sur un plan ou sur toute autre surface fût connaître, à toute époque dans chaque lieu correspondant, les temps écoulés, par le seul indice de ses diverses positions successives. En se bornant au cas le plus simple, celui d'un plan perpendiculaire à cet axe, duquel tous les autres cas peuvent être aisément déduits par des moyens graphiques, il est clair que les angles horaires sont exactement proportionnels aux déplacemens angulaires de l'ombre depuis sa situation méridienne. Toutefois, de semblables indications doivent être imparfaites, puisqu'elles supposent que le soleil décrit chaque jour le même parallèle de la sphère céleste, et que, par conséquent, elles exigent une correction, impossible à exécuter sur l'appareil lui-même, à raison de l'obliquité du mouvement annuel, outre celle qui correspond à son inégalité; ce qui rend de tels instrumens inapplicables à des observations précises.

Sous le second point de vue, il est évident que la longueur variable de l'ombre horizontale projetée à chaque instant par un style vertical, étant comparée à la longueur fixe et bien connue de ce style, on en conclut immédiatement la distance angulaire correspondante du soleil au

zénith; ce rapport constituant par lui-même la tangente trigonométrique de cet angle, dont il a primitivement inspiré l'idée aux astronomes arabes. De là est résulté un moyen long-temps précieux, d'observer les variations qu'éprouve la distance zénithale du soleil aux divers instans de la journée, et celles plus importantes de sa position méridienne aux différentes époques de l'année. L'inexactitude inévitable des procédés gnomoniques consiste, à cet égard, dans l'influence de la pénombre, qui laisse toujours une incertitude plus ou moins grande sur la vraie longueur de l'ombre, dont l'extrémité ne peut jamais être nettement terminée. Cette influence, qui affecte d'une manière nécessairement fort inégale les diverses distances au zénith, peut bien être atténuée par l'emploi de très grands gnomons; mais il est évidemment impossible de s'y soustraire tout-à-fait.

Cette double propriété des indications gnomoniques avait été réalisée, dès l'origine de la science, par l'ingénieux instrument connu sous le nom d'hémisphère creux de Bérosee, qui servait à mesurer simultanément les temps et les angles, quoique, d'ailleurs, il fût encore moins susceptible d'exactitude que les instrumens imaginés plus tard d'après le même principe.

L'imperfection fondamentale des procédés gnomoniques, la difficulté d'une exécution suffisamment rigoureuse, et l'inconvénient de cesser d'être applicables précisément aux instans les plus convenables pour l'observation, ont déterminé les astronomes à y renoncer entièrement, aussitôt qu'il a été possible de s'en passer. Dominique Cassini est le dernier qui en ait fait un usage important, à l'aide de ses grands gnomons, pour sa théorie du soleil. Toutefois, la spontanéité d'un tel moyen d'observation, lui conservera toujours une valeur réelle, pour procurer une première approximation de certaines données astronomiques, lorsqu'on se trouve placé dans des circonstances défavorables, qui ne permettent pas l'emploi des instrumens modernes. Il est resté, d'ailleurs, dans nos observatoires actuels, la base de l'importante construction de la ligne méridienne, envisagée comme divisant en deux parties égales l'angle formé par les ombres horizontales de même longueur qui correspondent aux deux parties symétriques d'une même journée. Dans ce cas spécial, les deux causes fondamentales d'erreur signalées ci-dessus sont essentiellement éludées; car la pénombre affecte évidemment au même degré les deux ombres conjuguées; et, quant à l'obliquité du mouvement du soleil,

il est facile d'en éviter presque entièrement l'influence en faisant l'opération aux environs des solstices, surtout vers le solstice d'été. On peut, en outre, la vérifier et la rectifier aisément par l'observation des étoiles.

Considérons maintenant les procédés les plus exacts, en séparant, comme il devient indispensable de le faire, ce qui se rapporte à la mesure du temps de ce qui concerne celle des angles, et en examinant d'abord la première.

Il faut, à cet égard, reconnaître, avant tout, que le plus parfait de tous les chronomètres est le ciel lui-même, par l'uniformité rigoureuse de son mouvement diurne apparent, en vertu de la rotation réelle de la terre. Il suffit, en effet, d'après cela, lorsqu'on sait exactement la latitude de son observatoire, d'y mesurer, à chaque instant, la distance au zénith d'un astre quelconque, dont la déclinaison, d'ailleurs variable ou constante, est actuellement bien connue, pour en conclure l'angle horaire correspondant, et, par une suite immédiate, le temps écoulé, en résolvant le triangle sphérique que forment le pôle, le zénith et l'astre, et dont les trois côtés sont ainsi donnés. Si l'on avait dressé, dans chaque lieu, des tables numériques très étendues de ces résultats pour quelques étoiles convenablement choisies,

ce moyen naturel deviendrait, sans doute, beaucoup plus praticable qu'il ne le semble d'abord. Mais il ne saurait, évidemment, jamais comporter toute l'actualité nécessaire pour qu'il pût entièrement suffire, outre le grave inconvénient qu'il présente de faire dépendre la mesure du temps de celle des angles, qui est réellement aujourd'hui moins parfaite. Aussi ce procédé chronométrique n'est-il employé qu'à défaut de tout autre moyen exact, comme c'est essentiellement le cas en astronomie nautique. Sa grande propriété usuelle consiste, dans nos observatoires, à régler avec précision la marche de toutes les autres horloges, en la confrontant à celle de la sphère céleste. Et, cette importante vérification se fait même le plus souvent sans exiger aucun calcul trigonométrique; car on peut se borner à modifier le mouvement du chronomètre jusqu'à ce qu'il marque très exactement vingt-quatre heures sidérales, entre les deux passages consécutifs d'une même étoile quelconque à une lunette fixée, aussi invariablement que possible, dans une direction d'ailleurs arbitraire.

Les moyens artificiels pour mesurer le temps avec précision par des instrumens de notre création sont donc indispensables en astronomie. Cherchons à en saisir l'esprit général.

Tout phénomène qui présente des changemens graduels quelconques est réellement susceptible de nous fournir, par l'étendue des changemens opérés, une certaine appréciation du temps employé à les produire. Dans ce sens général, l'homme semble pouvoir choisir à cet égard entre toutes les classes des phénomènes naturels. Mais son choix devient, en réalité, infiniment restreint, quand il veut obtenir des estimations précises. Les divers ordres de phénomènes étant, de toute nécessité, d'autant moins réguliers qu'ils sont plus compliqués, cette loi nous prescrit de chercher seulement parmi les plus simples nos vrais moyens chronométriques. Ainsi, les mouvemens physiologiques eux-mêmes (1) pourraient, à cet égard, nous procurer quelques indications, en comptant, par exemple, le nombre de nos pulsations dans l'état sain, ou le nombre de pas bien réglés, ou celui des sons vocaux, etc., pendant le temps à évaluer, et, quelque grossier que soit nécessairement un tel procédé, il peut néanmoins avoir une véritable utilité dans certaines occasions où tout autre nous est interdit. Mais

(1) On peut utilement remarquer à ce sujet, d'après les poèmes d'Homère et les récits de la Bible, que, dans l'enfance de la civilisation, les fonctions sociales elles-mêmes servaient, jusqu'à un certain point, à marquer et à mesurer le temps.

il est évident, en général, que les divers mouvemens des corps vivans varient d'une manière beaucoup trop irrégulière pour qu'on puisse jamais les employer à la mesure du temps. Il en est encore essentiellement de même, quoiqu'à un degré bien moindre, des phénomènes chimiques. La combustion d'une quantité déterminée de matière quelconque homogène, peut devenir, par exemple, un moyen d'évaluer, avec une grossière approximation, le temps écoulé. Mais la durée totale de cette combustion, et surtout celle de ses diverses parties, sont évidemment trop incertaines et trop variables pour qu'on en déduise aucune détermination précise. Ainsi, puisqu'il a fallu écarter les phénomènes astronomiques, comme seulement destinés à la vérification, quoiqu'ils soient, par leur nature, les plus réguliers, ce n'est donc que dans les mouvemens physiques proprement dits, et surtout dans ceux dus à la pesanteur, que nous pouvons réellement chercher des procédés chronométriques susceptibles d'exactitude. C'est aussi là où ils ont été puisés de tout temps, aussitôt qu'on a senti le besoin de ne plus se borner aux moyens gnomoniques.

Les anciens ont d'abord employé le mouvement produit par la pesanteur dans l'écoulement des liquides : de là leurs diverses clepsydes, et les

sabliers encore usités à bord de nos vaisseaux. Mais il est évident que de tels instrumens, même en les supposant aussi perfectionnés que le permettraient nos connaissances actuelles, ne sont pas susceptibles, par leur nature, d'une grande précision, à cause de l'irrégularité nécessaire de tout mouvement dans les liquides. C'est pourquoi on a été rationnellement conduit, dans le moyen âge, à substituer les solides aux liquides, en imaginant les horloges fondées sur la descente verticale des poids. Ainsi, en cherchant, parmi tous les phénomènes naturels, des moyens exacts de mesurer le temps, on a été successivement conduit à se borner à un principe unique de chronométrie, qui semble, d'après l'analyse précédente, être en effet le seul propre à nous fournir définitivement une solution convenable du problème, et qui, sans doute, servira toujours de base à nos horloges astronomiques. Mais il s'en fallait de beaucoup qu'il pût suffire par lui-même, sans une longue et difficile élaboration, qui se rattache aux plus hautes questions mathématiques. En effet, le mouvement vertical des corps pesans, bien loin d'être uniforme, étant, au contraire, nécessairement accéléré, les indications d'un tel instrument sont donc naturellement vicieuses, quoique assujetties à une loi régulière. Le ralentissement indispen-

sable de la chute, à l'aide des contre-poids, ne rémédie en rien à ce défaut capital, puisque, affectant proportionnellement les diverses vitesses successives, il ne saurait altérer leurs rapports : il peut seulement diminuer la résistance de l'air, qui n'est là qu'une cause fort accessoire. Le problème chronométrique fondamental n'était donc nullement résolu jusqu'à ce que la création de la dynamique rationnelle par le génie de Galilée eût conduit à découvrir, dans une modification capitale du mouvement naturel des corps pesans, la parfaite régularité qu'on avait jusqu'alors vainement cherchée.

On a long-temps disputé à Galilée la gloire d'avoir eu, le premier, l'idée de mesurer le temps par les oscillations d'un pendule; et la discussion attentive de ce point d'érudition a montré, ce me semble, que c'était à tort. Mais il est, dans tous les cas, scientifiquement incontestable que ses belles découvertes en dynamique devaient y amener naturellement. Car, il en résultait nécessairement que la vitesse d'un poids qui descend suivant une courbe verticale décroît à mesure qu'il s'approche du point le plus bas, en raison du sinus de l'inclinaison horizontale de chaque élément parcouru : de sorte qu'on pouvait aisément concevoir que, par une forme convenable de la

courbe, l'isochronisme des oscillations serait obtenu si le ralentissement se trouvait, en chaque point, compenser exactement la diminution de l'arc à décrire. La solution de ce dernier problème mathématique était réservée à Huyghens, la géométrie n'étant point assez avancée à l'époque de Galilée pour qu'il fût encore accessible. Galilée paraît avoir été seulement conduit par l'observation à regarder comme rigoureusement isochrones les oscillations circulaires, sans avoir nullement connu la restriction relative à leur amplitude très petite, quoique ses propres théorèmes permissent de l'apercevoir aisément.

A partir de la première idée du pendule, et de la connaissance du défaut d'isochronisme rigoureux dans le cercle, l'histoire, impossible à développer ici, de la solution de ce beau problème par les immortels travaux d'Huyghens devient un des plus admirables exemples de cette relation intime et nécessaire qui fait dépendre les questions pratiques les plus simples en apparence des plus éminentes recherches scientifiques. Après avoir découvert que l'égalité parfaite de la durée des oscillations quelconques n'appartenait qu'à la cycloïde, Huyghens, pour faire décrire cette courbe à son pendule, imagina un appareil aussi simple que possible, fondé sur la belle conception des dé-

veloppées, qui, transportée ensuite dans la géométrie abstraite, en est devenue un des élémens fondamentaux. Les difficultés d'une exécution précise, et surtout l'impossibilité pratique de maintenir un tel appareil suffisamment inaltérable, ont dû faire entièrement renoncer au pendule cycloïdal. Quand Huyghens l'eut reconnu, il déduisit de sa théorie un moyen heureux de revenir enfin au pendule circulaire, le seul vraiment admissible, en démontrant que, le rayon de courbure de la cycloïde à son sommet étant égal à la longueur totale de son pendule, il pouvait transporter, d'une manière suffisamment approchée, au cercle osculateur tout ce qu'il avait trouvé sur l'isochronisme et sur la mesure des oscillations cycloïdales, pourvu que les oscillations circulaires fussent toujours très petites, ce qu'il assura par l'ingénieux mécanisme de l'échappement, en appliquant le pendule à la régularisation des horloges. Mais cette belle solution ne pouvait encore devenir entièrement pratique, sans avoir préalablement traité une dernière question fondamentale, qui tient à la partie la plus élevée de la dynamique rationnelle, la réduction du pendule composé au pendule simple, pour laquelle Huyghens inventa le célèbre principe des forces vives, et qui, outre qu'elle était indispensable, indiquait à l'art de

nouveaux moyens de modifier les oscillations sans changer les dimensions de l'appareil. Par un tel ensemble de découvertes pour une même destination, le beau traité *De Horologio oscillatorio* est peut-être l'exemple le plus remarquable de recherches spéciales que nous offre jusqu'ici l'histoire de l'esprit humain tout entière.

Depuis ce grand résultat, le perfectionnement des horloges astronomiques a été uniquement du domaine de l'art. Il a porté essentiellement sur deux points : la diminution du frottement, par un meilleur mode de suspension, et la correction des irrégularités dues aux variations de température, par l'ingénieuse invention des appareils compensateurs. Je n'ai point d'ailleurs à considérer ici les chronomètres portatifs, fondés sur la distension graduelle d'un ressort métallique plié en spirale, et dont l'étonnante perfection, presque égale aujourd'hui à celle des horloges astronomiques, est due essentiellement à l'art, la science y ayant peu contribué.

Tel est, en aperçu, l'ensemble des moyens par lesquels le temps est habituellement mesuré, d'une manière sûre, dans nos observations astronomiques, à une demi-seconde près, et quelquefois même avec une précision encore plus grande.

Considérons maintenant, sous un point de vue

général, le perfectionnement de la mesure des angles, dont l'histoire n'offre point toutefois un ensemble de recherches aussi intéressant.

Pour concevoir nettement d'abord, en quoi consiste, à cet égard, la difficulté essentielle, il suffit, ce me semble, de se représenter que, lorsqu'on se propose d'évaluer un angle seulement à une minute près, il faudrait, d'après un calcul très facile, un cercle de sept mètres de diamètre environ, en y accordant aux minutes une étendue d'un millimètre; et l'indication directe des secondes sexagésimales, en réduisant chacune à occuper un dixième de millimètre, exigerait un diamètre de plus de quarante mètres. D'un autre côté, en restant même fort au-dessous de dimensions aussi impraticables, l'expérience a démontré que, indépendamment de l'exécution difficile et de l'usage incommode, la grandeur des instrumens ne pouvait excéder certaines limites assez médiocres sans nuire nécessairement à leur précision, à cause de leur déformation inévitable par le poids, la température, etc. Les astronomes arabes du moyen âge ont vainement employé des instrumens gigantesques, sans en obtenir l'exactitude qu'ils y avaient cherchée; et on y a généralement renoncé depuis plusieurs siècles. Les télescopes à grandes dimensions qu'on remarque