

DEUXIÈME PARTIE (1)

Nous sommes heureux d'offrir à nos collègues la primeur de quelques articles de M. André DANJON, Professeur à la Sorbonne, Directeur de l'Observatoire de Paris. Que ce dernier, qui a bien voulu aider l'Association des Professeurs de Mathématiques lors de la refonte du programme de Cosmographie, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements pour sa collaboration, dont nos lecteurs apprécieront l'autorité et la compétence.

Le Bureau.

Notes sur l'astronomie

I. — LE POINT GAMMA ET LE TEMPS SIDÉRAL

La terminologie se crée à mesure que la science se développe. Lorsqu'une notion nouvelle se présente, on éprouve aussitôt le besoin de la désigner d'un mot. Mais une telle notion ne prend pas toujours du premier coup sa forme définitive ; aussi le langage scientifique acquiert-il rarement d'emblée cette perfection qu'on se plaît à lui prêter. Les sciences les plus anciennes sont celles dont le langage est le moins correct, lorsqu'on n'a pas pris la peine de le réformer depuis l'époque de sa création.

Le langage de l'astronomie est ancien et pauvre. Il renferme des expressions dont le sens est imprécis et qui se prêtent à la confusion et à l'équivoque. Leur emploi machinal risque, en vertu du pouvoir bien connu des mots, d'éveiller des idées fausses et de causer des erreurs de principe.

Ainsi, le mot *temps* sert à désigner des grandeurs irréductibles les unes aux autres, et son emploi met souvent les étudiants, parfois aussi les professionnels, devant de grandes difficultés d'interprétation.

D'une part, ce mot recouvre une notion abstraite, celle du *temps de la mécanique rationnelle*, à savoir, le paramètre t qui s'introduit sous ce nom dans les équations de la cinématique et de la dynamique. Tout le développement classique de la mécanique repose sur les notions abstraites d'espace et de temps, qui échappent à toute définition expérimentale, et que les traités présentent comme des notions premières.

Mais, d'autre part, les astronomes appellent « temps » des grandeurs concrètes, comme l'angle horaire du soleil ou *temps solaire vrai*. Il s'agit là d'un angle dièdre directement mesurable à l'aide d'instruments appropriés. Ce n'est pas un temps au sens de la mécanique, mais une grandeur physique variable en fonction du temps, suivant une loi dont l'expression est compliquée.

Enfin, on donne encore le nom de « temps » à des grandeurs d'une autre espèce, fonctions du temps, elles aussi, mais non directement mesurables. Ainsi, le point gamma échappe à l'observation ; cependant, les astronomes savent déterminer son angle horaire à chaque instant, avec une très

(1) Adresser, soit au Président, soit à M. HUISMAN, 11, rue Jacques-Cœur, Paris (4^e), toute communication destinée à la Deuxième Partie du *Bulletin*.

bonne approximation. Ils donnent à cet angle horaire le nom, tout à fait impropre, de *temps sidéral*. C'est encore une fonction du temps t de la mécanique, liée à ce paramètre par une relation de forme compliquée. On détermine le temps sidéral par le calcul, à partir de certaines données directement accessibles à l'observation, mais en faisant intervenir les résultats de la théorie.

C'est à cette troisième catégorie qu'appartient également le *temps solaire moyen*, tel qu'il est déterminé par les astronomes. Il se déduit de certaines données d'observation, mais avec l'indispensable secours de la théorie.

Voilà donc trois significations entièrement distinctes du mot *temps*. Faute de les bien distinguer, les débutants sont exposés aux plus graves erreurs de principe, et les astronomes eux-mêmes n'échappent pas toujours à ce danger. On renoncera difficilement à des habitudes de langage plusieurs fois séculaires, mais il est certain qu'une révision du vocabulaire astronomique faciliterait grandement l'enseignement des notions fondamentales. Si l'on décidait d'appeler désormais *angle tropique* le temps sidéral, *angle solaire* le temps solaire vrai, on ne verrait plus les étudiants se demander avec angoisse si les différences de longitude se comptent en temps solaire ou en temps sidéral, car ils auraient compris, sans avoir besoin d'y réfléchir, qu'une différence d'angles horaires n'est pas une durée, mais un angle dièdre, et que l'heure, unité employée dans ce cas particulier, n'est pas une unité de temps, mais une unité d'angle valant 15 degrés. Le professeur ne serait plus obligé de s'arrêter longuement sur ces notions élémentaires par la crainte d'une équivoque.

Il pourrait aussi se dispenser d'expliquer longuement pourquoi le *jour sidéral* n'est pas égal à la durée de la *rotation sidérale* de la terre, si l'on donnait au jour sidéral le nom plus correct de *jour tropique*, en réservant le nom de jour sidéral à la *durée de la rotation de la terre*. L'analogie avec l'année tropique et l'année sidérale serait immédiate. Ajoutons que, pour beaucoup, *sidéral* a le même sens que *stellaire*, de sorte qu'une association d'idées s'établit inconsciemment entre le temps sidéral et le mouvement diurne des étoiles, alors que le temps sidéral est déterminé essentiellement par le soleil, et par le soleil seul. C'est ce que nous allons établir.

Conservons la terminologie traditionnelle pour la commodité du lecteur, mais en réservant le nom de « temps » sans épithète au paramètre t de la mécanique. Le temps sidéral est défini comme l'angle horaire du point gamma. Quant au point gamma, ou équinoxe, c'est le nœud ascendant de l'écliptique dans l'équateur. Il n'est pas directement observable, mais on peut néanmoins déduire sa position de celle du soleil, lorsqu'on a fait la théorie de la rotation et de la translation de la terre. Décrivons sommairement la suite des opérations indispensables.

On sait comment on détermine la déclinaison d'un astre à partir de sa hauteur méridienne, mesurée elle-même à l'aide du cercle méridien. Supposons qu'un observateur note chaque jour, à midi vrai, l'heure θ que marque une horloge de bonne qualité, ainsi que la hauteur méridienne du soleil,

d'où il déduira sans peine la déclinaison correspondante δ . Il est facile d'établir la relation suivante entre les deux coordonnées équatoriales du soleil et l'obliquité ϵ de l'écliptique :

$$\sin \alpha = \tan \delta \cdot \cos \epsilon.$$

L'obliquité ϵ étant connue, la relation ci-dessus fournit immédiatement l'ascension droite α du soleil, ou, en d'autres termes, l'angle que fait le cercle horaire du soleil avec celui du point gamma. L'opération qui vient d'être décrite rattache donc le point gamma, non observable directement, à un astre observable, le soleil. Comme l'utilise-t-on en pratique ?

Si l'horloge avait marqué exactement le temps sidéral T , sa lecture au moment du passage du soleil aurait été égale à α ; puisqu'à chaque instant, le temps sidéral coïncide avec l'ascension droite des astres en passage supérieur au méridien. En fait, la lecture a donné θ . On dit que la correction de l'horloge est

$$\Delta = \alpha - \theta$$

ou que le temps sidéral T , à midi vrai, était

$$T = \theta + \Delta.$$

Cette correction Δ varie lentement d'un jour à l'autre (la méthode décrite ici ne donne sa valeur que pour le midi vrai), mais, comme la marche d'une bonne horloge s'écarte peu d'une fonction linéaire du temps, il est légitime d'interpoler les valeurs obtenues pour Δ , soit graphiquement, soit à l'aide d'une formule d'interpolation. La lecture de l'horloge à un instant quelconque, corrigée de la quantité Δ interpolée pour le même instant, fournit le temps sidéral T correspondant.

Supposons qu'on ait noté la lecture de la pendule au moment du passage supérieur d'une étoile au méridien. En corrigeant cette lecture comme il vient d'être dit, on obtient le temps sidéral au moment du passage, c'est-à-dire l'ascension droite de l'étoile. La mesure de la hauteur méridienne fournit en outre la déclinaison : les deux coordonnées équatoriales de l'astre sont alors connues.

Les étoiles dont l'ascension droite a été ainsi rattachée à celle du soleil sont dites *fondamentales*. Mais les coordonnées équatoriales d'une étoile sont elles-mêmes des fonctions du temps. En utilisant les théories de la précession, de la nutation et de l'aberration, on calcule sans peine les coordonnées apparentes des étoiles fondamentales pour une époque quelconque, connaissant leurs valeurs à l'époque des observations.

Le catalogue des étoiles fondamentales actuellement en usage (FK3) renferme les positions de 1.535 étoiles, dont les éphémérides sont calculées pour chaque année, et publiées. Ces étoiles constituent des relais commodes pour la détermination du temps sidéral ; elles jouent un rôle analogue à celui d'étalons secondaires, puisque, grâce à elles, on peut se dispenser d'observer le soleil, seul étalon primaire concevable. Il suffit, en effet, de noter l'indication de la pendule au moment du passage supérieur d'une étoile fondamentale, et de la retrancher de l'ascension droite fournie par l'éphéméride, pour obtenir une détermination de la correction Δ .

R. 2
i. 2
fondamentales

ralique
Pourquoi les astronomes utilisent-ils quotidiennement les étoiles fondamentales de préférence au soleil pour la détermination du temps sidéral ? Ils y sont conduits par des raisons d'ordre pratique. L'observation méridienne du soleil est beaucoup plus difficile que celle des étoiles. Elle exige des moyens techniques spéciaux et de minutieuses précautions, destinés notamment à éliminer les graves erreurs qu'entraînerait l'échauffement de l'instrument par le rayonnement solaire. L'observation des étoiles n'exige pas tant de précautions ; comme il est possible d'observer consécutivement plusieurs étoiles, on élimine en partie les erreurs accidentelles d'observation en prenant la moyenne des résultats fournis par chacune d'elles. Mais on ne saurait trop insister sur ce point, la détermination du *temps sidéral* par les étoiles fondamentales fait intervenir essentiellement, bien qu'indirectement, *les anciennes observations du soleil exécutées pour l'établissement du catalogue stellaire*.

ummar
La méthode qui vient d'être décrite emprunte une partie de ses éléments à l'observation, une autre à la théorie. L'obliquité n'est pas constante et c'est la mécanique céleste qui fournit sa valeur à chaque instant. C'est aussi la théorie qui donne les valeurs de la précession, de la nutation et de l'aberration. Le problème se complique encore, si l'on tient compte des mouvements propres, ce que l'on ne peut se dispenser de faire. Les étoiles ne restent pas dans la même position relative les unes par rapport aux autres ; chacune d'elles possède ce qu'on appelle un *mouvement propre* sur la sphère des fixes, dont il est nécessaire de tenir compte dans le calcul de l'ascension droite et de la déclinaison pour une époque quelconque. Le calcul de ces coordonnées fait donc intervenir un certain nombre de constantes, dont la valeur est fournie par la discussion des observations antérieures, avec un degré d'approximation limité.

La précision de l'éphéméride va donc nécessairement en décroissant à mesure qu'on s'écarte de l'époque à laquelle le catalogue a été établi. Au bout de quelques dizaines d'années, il devient nécessaire de réviser les positions du catalogue, ainsi que les constantes fondamentales et les mouvements propres, et cette révision nécessite un nouveau rattachement des étoiles au soleil. Travail de Pénélope, qui ne prendra vraisemblablement jamais fin, les astronomes se montrant de plus en plus exigeants à mesure que leurs moyens d'observation se perfectionnent.

(L'écart moyen d'une position stellaire fondamentale extraite du catalogue FK3 atteint actuellement 8 millièmes de seconde. Or, les horloges à diapason ou à quartz permettent de conserver le temps sidéral avec une précision notablement plus grande : leurs écarts diurnes propres n'atteignent pas 1 millième de seconde. La précision du catalogue actuellement en usage est donc nettement insuffisante.

Résumons-nous. Le point gamma, ou équinoxe, dont la définition fait intervenir le soleil, et le soleil seul, se trouve rattaché aux étoiles par l'intermédiaire des catalogues fondamentaux (coordonnées équatoriales et mouvements propres) et des constantes astronomiques fondamentales (précés-

sion, nutation, aberration). Le système formé par le catalogue et le tableau des constantes détermine la position du point gamma par rapport à l'ensemble des étoiles, et pour chaque instant. Mais, en raison de ses erreurs accidentelles ou systématiques, un tel système définit en réalité un équinoxe conventionnel, qui peut s'écarter plus ou moins de l'équinoxe vrai. L'écart varie avec le temps. Ainsi, l'équinoxe déterminé par Simon Newcomb s'écarte progressivement de celui de Le Verrier, et il en est distant actuellement de 0,075 s. Mais la discussion de Newcomb remonte déjà à plus d'un demi-siècle, et nul ne saurait dire où se trouve aujourd'hui l'équinoxe vrai par rapport à celui de Newcomb, à moins de faire de nouvelles observations.

Il suffit de changer le catalogue sans modifier les constantes pour établir une discontinuité dans le temps sidéral déduit des passages d'étoiles. Ainsi, lorsque, le 1^{er} janvier 1940 à minuit, le catalogue FK₃ a été substitué à celui d'Eichelberger, tout s'est passé comme si la correction des horloges avait subi un brusque changement de quelques millièmes de seconde.

On se posait, autrefois, un problème d'une nature toute différente de celui qui nous a occupés jusqu'ici, et que les manuels élémentaires exposent sous une forme généralement incorrecte. A quelle date le soleil passe-t-il au point gamma ? Pour répondre à cette question, on déterminait la déclinaison du soleil, par la méthode des hauteurs méridiennes, quelques jours avant et après l'équinoxe de printemps ; un procédé simple d'interpolation, complaisamment décrit dans les manuels, fournissait alors l'instant où la déclinaison s'était annulée, c'est-à-dire l'instant de l'équinoxe. Cette méthode, aujourd'hui désuète, fut appliquée par beaucoup d'observateurs de l'Antiquité et du Moyen Age, et jusqu'au début de la période contemporaine. Elle a fourni de précieuses données pour le calcul de l'année tropique. Elle mérite donc d'être mentionnée, en raison de son intérêt historique, mais il ne faut pas la présenter comme un mode de détermination du point gamma lui-même, puisque ce point n'a été rapporté à aucun point de repère identifiable par la suite. On pourrait, il est vrai, compléter l'observation en faisant intervenir, comme ci-dessus, l'observation des étoiles et d'une horloge, mais alors, on reviendrait à la méthode qui a fait l'objet des développements précédents, et qui s'applique, non seulement au voisinage de l'équinoxe, mais toute l'année, sauf à l'époque des solstices (elle donnerait alors pour $\sin \alpha$ une valeur très voisine de l'unité, en valeur absolue).

Au surplus, les astronomes de l'Antiquité savaient situer le point gamma par rapport aux étoiles, en mettant à profit les éclipses de lune survenant au voisinage d'un équinoxe.

Supposons, pour simplifier le raisonnement, qu'une éclipse de lune se produise à l'instant précis où le soleil passe au point gamma. Le centre de l'ombre de la terre sur la lune est le point de l'écliptique diamétralement opposé au centre du soleil, il est donc confondu avec le nœud descendant ou équinoxe d'automne. Des mesures directes fournissent donc la distance de ce nœud descendant aux étoiles situées dans la même région du ciel. On en conclut sans peine les longitudes célestes de ces étoiles, rapportées au point

gamma. Comme l'éclipse de lune ne coïncide pas exactement avec le passage du soleil à l'équinoxe, il y a lieu de corriger les résultats, en tenant compte de la longitude du soleil au moment de la mesure ; elle se calcule sans peine avec une approximation suffisante, si l'éclipse a lieu un petit nombre de jours avant ou après l'équinoxe.

C'est en comparant la longitude de l'Epi de la Vierge (α Virginis) trouvée par lui au cours d'une éclipse de lune quasi-équinoxiale, avec le résultat d'une observation analogue faite au siècle précédent par Timocharis, qu'Hipparque découvrit le déplacement rétrograde du point gamma dans l'écliptique, auquel il donna le nom de précession des équinoxes. Sur ce point, comme sur tant d'autres, les manuels élémentaires renferment des affirmations bien éloignées de la vérité historique. Et comme il arrive toujours en pareil cas, celle-ci est beaucoup plus attachante que les fictions qu'on lui a substituées.

A. DANJON.