

Préambule

Cet ouvrage traite des références à utiliser en astronomie, en géodésie et en géophysique. D'une part, il s'agit des références pour exprimer les positions et les mouvements des corps naturels ou artificiels au sein du système solaire : mouvements orbitaux et rotations. D'autre part, la description des planètes, ainsi que l'étude de leurs déformations, s'il y a lieu, exigent des systèmes de référence locaux accompagnant leur mouvement dans l'espace. Ceci concerne surtout la Terre pour le moment : c'est d'une grande importance tant pour des raisons pratiques, telles que navigation, positionnement, que pour suivre l'évolution de notre planète, qui à la précision atteinte est « molle », et de ses enveloppes fluides.

Certes, ces mouvements et déformations existent par eux-mêmes et sont indépendants des références par rapport auxquelles on les exprime à l'aide de coordonnées spatiales et temporelles, mais dès que l'on veut les décrire et encore plus les modéliser par la théorie, le choix de « bonnes références » et de bonnes coordonnées est crucial. Que sont des bonnes coordonnées ? Ce sont celles qui conduisent à la représentation mathématique la plus simple.

D'emblée la nature a fourni à l'humanité des références astronomiques d'une grande qualité : la *sphère des fixes*, formée par le ciel étoilé, et un *temps uniforme*, par l'alternance des jours et des nuits et celle des saisons. On verra dans la partie historique de cet ouvrage comment ont été précisées au cours des siècles ces références empiriques. C'est leur qualité qui a permis de développer les théories de la mécanique rationnelle et de la gravitation. Puis, par un subtil recours à ces théories, les références ont été améliorées, ce qui ne manque pas de poser des problèmes de logique qui ont été notés surtout pendant la première moitié du xx^e siècle. On peut néanmoins penser que l'existence de ces bonnes références naturelles accessibles depuis l'antiquité a joué un rôle majeur dans l'éveil de la pensée scientifique. Que serait devenue une humanité aveugle à tout rayonnement électromagnétique venu de l'espace ?

Cependant dans les années 1950, l'astronomie qui traitait ces sujets, dite fondamentale, stagnait quelque peu pour deux raisons. D'une part les méthodes traditionnelles d'observation angulaire des astres, ne progressaient plus, à cause des incertitudes inévitables apportées par la réfraction atmosphérique. D'autre part la seconde était définie comme l'unité du temps solaire moyen supposé uniforme, mais vers 1950 on avait reconnu, sans aucun doute, ses variations relatives de 10^{-7} à 10^{-8} , dues aux irrégularités de la vitesse de rotation terrestre, en constatant l'inaptitude du temps solaire moyen à représenter le temps de la mécanique céleste. On a alors conçu un *Temps des éphémérides* et, en 1960, redéfini la seconde par l'adoption d'une expression conventionnelle de la longitude du Soleil. Cela a, certes, permis d'évaluer les irrégularités

de la rotation terrestre au cours des siècles et millénaires passés, mais, pour la physique et l'astronomie contemporaine, ces définitions n'avaient guère apporté de solution satisfaisante, car la précision de lecture du Temps des éphémérides était trop mauvaise (incertitudes de plusieurs dixièmes de seconde) ; la seconde dite « des éphémérides » n'a officiellement vécu que de 1960 à 1967.

Quant à la géodésie, elle pouvait décrire localement avec grande précision la surface terrestre par des mesures faites au sol. Mais les distorsions s'accroissaient avec la distance. Pour relier des sites à l'échelle de milliers de kilomètres et pour connaître pour la forme générale de la Terre, la géodésie devait avoir recours à l'astronomie, ce qui mettait en outre en jeu la description de la rotation terrestre. C'est l'envoi du premier satellite artificiel en 1958 qui a engendré ce qu'on a appelé par la suite la géodésie spatiale. De nos jours, cette nouvelle géodésie apporte l'exactitude millimétrique sur la connaissance de la surface de la Terre. On a acquis la certitude du mouvement relatif des plaques tectoniques, ainsi que de mouvements locaux, de sorte qu'il est apparu le problème de définir la référence, tournant globalement avec la Terre, à laquelle on doit rapporter les positions et vitesses des stations d'observation. En outre on a alors été sûr que le pôle de rotation terrestre dérivait par rapport à l'ensemble des plaques tectoniques, ce qui faisait l'objet de controverses depuis des décennies.

Ainsi, on se rend compte que références célestes, références terrestres, rotation de la Terre et temps forment un ensemble d'éléments indissociables dans leur réalisation et mesure. En fait, il en a toujours été ainsi, mais sans que l'on en soit pleinement conscient. Cet ouvrage montrera comment on est arrivé à une conception plus globale de ces problèmes fondamentaux.

Ce qui a conduit à une situation nouvelle, c'est tout particulièrement l'apparition des étalons atomiques de temps.

Lorsque, à la suite de décennies de travaux couronnés par plusieurs prix Nobel, le premier étalon atomique de fréquence opérationnel de Essen et Parry a commencé à fonctionner au Royaume-Uni en 1955, il a ouvert une nouvelle ère dans l'histoire. On parle volontiers de l'ère des techniques spatiales, de l'informatique, de la communication et autres ; il serait plus juste de parler de l'ère du « temps », car tous ces développements en dépendent. C'est pourquoi, dès ce préambule, les bouleversements de la mesure du temps sont rappelés.

L'étalon de temps de Essen et Parry avait d'emblée une inexactitude de fréquence relative de 10^{-9} à 10^{-10} , soit une centaine de fois inférieure aux variations de fréquence de la rotation de la Terre. La construction d'autres étalons et les progrès ininterrompus ont conduit à redéfinir la seconde en 1967 en se fondant sur une valeur conventionnelle de la fréquence de la transition hyperfine de l'atome de césium 133. Cette définition est toujours valide. Au moment de son adoption l'inexactitude relative réalisée était de 10^{-12} environ. Elle approche, en 2015, 10^{-16} (une seconde en 300 millions d'années) et elle se réduit constamment. Parallèlement, des échelles de temps atomique ont été construites par cumul des secondes atomiques et l'une d'entre elles, disponible depuis 1955 (sous des appellations diverses) est devenue en 1970 le *Temps atomique*

international (TAI) par accord international. Cette échelle est accessible maintenant au niveau d'exactitude de lecture approchant la nanoseconde.

Les sujets traités dans cet ouvrage mettent en jeu les grandeurs dites « mécaniques », temps, longueur, masse, dont les unités, seconde, mètre et kilogramme, sont définies dans le Système international d'unités (SI). On verra que pour étudier les mouvements orbitaux les masses M apparaissent sous la forme du produit GM avec la constante de la gravitation G , constante connue avec une faible précision (incertitude relative de 10^{-4} environ). Mais ce produit ne fait intervenir que les unités de temps et de longueur. Le mètre étant défini depuis 1983 par l'adoption d'une valeur conventionnelle de la vitesse de la lumière dans le vide, en dernier ressort, seules les incertitudes de la réalisation de la seconde apportent une limitation physique dans les sujets qui seront considérés. Il importe donc que les aspects théoriques soient traités avec une exactitude cohérente avec cette réalisation.

Le besoin de rigueur a conduit à mieux distinguer le concept théorique d'un *système de référence* (*reference system*) et ses réalisations appelées *repères de référence* (*reference frames*). Les repères sont perfectibles, mais pour assurer la cohérence des résultats d'observations, des versions conventionnelles, distinguées par des noms différents, sont successivement adoptés.

Les systèmes de référence sont maintenant définis dans le cadre de la relativité générale (RG) qui est devenue la théorie de travail. La modélisation des orbites d'objets soit naturels, soit artificiels doit y faire appel. Par exemple, le GPS bien connu de tous, ne pourrait pas fonctionner sans un traitement relativiste. Cette théorie, bien qu'un de ses premiers tests ait été l'explication de l'avance du périhélie de Mercure et qu'elle ait été introduite dès 1967 pour la métrologie du temps, n'avait pas véritablement pénétré la mécanique céleste et la géodésie. On se contentait souvent d'ajouter à la théorie newtonienne des *corrections relativistes*. Il a fallu attendre 1991 pour que l'Union astronomique internationale (UAI) l'adopte officiellement pour la définition des systèmes de référence par une série de recommandations qui précisaient la forme des coordonnées à utiliser. Ainsi l'UAI a ouvert une période de transition entre les conceptions newtoniennes et relativistes des références. Toutefois les composantes de la métrique relativiste adoptées alors ne permettaient pas de traiter convenablement les rotations ni la transformation entre systèmes barycentrique (au centre des masses du système solaire) et géocentrique. Cela a été corrigé en 2000 par l'adoption de composantes complétées par des termes d'ordre supérieur. À cette date et par la suite, des décisions importantes ont été prises au sujet des temps théoriques (temps-coordonnées), de la définition de l'axe de rotation terrestre, de la représentation de cette rotation, des transformations entre systèmes de référence. Un grand effort a conduit à une nomenclature et à des notations non ambiguës associées aux nouveaux concepts.

Quant aux repères de référence, leur réalisation est essentiellement empirique.

Les étalons atomiques de temps fournissent des réalisations de la partie temporelle des systèmes de référence avec des incertitudes négligeables en postulant que les fréquences associées aux transitions atomiques sont invariables sur la ligne d'univers

des atomes. Ils sont ainsi supposés donner le *temps propre* de la relativité. En on déduit par la théorie les repères temporels (*échelles de temps-coordonnée*) dont on a besoin.

Mais qu'en est-il des références d'espace (célestes ou terrestres)? Les références célestes posent des problèmes délicats que l'on découvrira dans l'ouvrage. En particulier, leur orientation touche aux fondements même de la physique (principe de Mach). Pratiquement, elle est fondée sur le postulat que plus un astre est lointain, le moins sa direction, telle qu'elle serait vue par un observateur au barycentre du système solaire, varie. Les repères conventionnels sont formés par des catalogues de directions, réputées invariables, de radiosources extragalactiques. Mais l'emploi de ces catalogues par un observateur réel exige une distinction entre une conception cinématique ou dynamique de non-rotation.

La valeur des coordonnées spatiales peut être exprimée en mètres, grâce à de nouvelles techniques de mesure, dites *temps-fréquence* : mesures de « distances » (en fait de temps de vol d'impulsions électromagnétiques) par radars et par lasers ; les mesures de « vitesses » par l'effet Doppler. Il faut mentionner aussi le développement de la radio interférométrie à très grandes bases (VLBI), de milliers de kilomètres, tributaire de la stabilité de fréquence d'horloges atomiques. Cette technique conduit à des mesures angulaires depuis le sol avec une précision inaccessible à l'astrométrie optique à cause de la réfraction atmosphérique. Elle a un rôle majeur pour déterminer l'orientation de la Terre dans l'espace.

En dépit de son importance, le sujet des références n'a pas été traité globalement, avant la parution d'un ouvrage collectif rédigé sous la direction de J. Kovalevsky (France), I.I. Mueller (USA) et B. Kolaczek (Pologne), paru en 1988. On y trouve, en particulier, une description des différentes phases entre la conception d'un système de référence et une réalisation de ce système, mise à la disposition des utilisateurs, désignée par repère, terminologie maintenant adoptée par tous et utilisée ici.

À présent, en 2015, l'essentiel semble avoir été accompli au sujet des concepts des systèmes de référence dans le cadre de la relativité générale et la voie est ouverte pour les améliorations de leur réalisation, c'est-à-dire des repères. Les problèmes théoriques restants touchent à l'usage du Système international d'unités (SI) à la place des unités astronomiques traditionnelles pour mesurer les coordonnées et surtout à la validité de la relativité générale. Ce dernier sujet est activement traité en introduisant des paramètres, dits du formalisme PPN (Parameterized Post Newtonian formalism), dans des déterminations d'orbites et dans des tests spécialement conçus. Jusqu'à présent, les déterminations expérimentales des valeurs de ces paramètres sont conformes à leurs valeurs (0 ou 1) en relativité générale, dans les limites des incertitudes.

Bien sûr, tout ce qui a été fait durant ces vingt dernières années dans le domaine des références d'espace et de temps est décrit dans des articles de revues astronomiques, géophysiques et physiques. Les décisions prises et les recommandations adoptées, apparaissent dans les publications d'organisations internationales ou intergouvernementales : l'UAI, l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), l'Union

radioscientifique internationale (URSI), l'Union internationale des télécommunications, le Comité international des poids et mesures (CIPM) et d'autres. Mais la pléthore de sources est quelque peu décourageante pour qui tente de s'informer sur ce sujet. Le Bureau des longitudes, dont plusieurs des membres et correspondants ont apporté des contributions majeures dans la théorie des systèmes de référence, leur réalisation par des repères, ainsi qu'à leur acceptation par les communautés internationales, a estimé que le moment était venu de décrire en un seul ouvrage la situation nouvelle dont on peut penser qu'elle perdurera pour l'essentiel. Cet ouvrage que nous vous présentons est principalement destiné aux étudiants, aux ingénieurs et aux scientifiques qui ne sont pas des spécialistes des sujets traités, mais qui sont des utilisateurs. Cependant nous nous sommes aussi efforcés de le rendre accessible à tous ceux qui s'intéressent à l'astronomie, aux sciences de la Terre, ainsi qu'aux questions scientifiques générales, en distinguant les développements trop pointus qu'ils pourront négliger sans que cela nuise à la compréhension du sujet.

Bernard Guinot

Bernard Guinot nous a quittés avant la sortie de cet ouvrage dont il fut l'un des principaux artisans. Ses co-auteurs souhaitent dédier ce livre à sa mémoire. Cet hommage s'ajoute à d'autres manifestations que le Bureau des longitudes prévoit d'organiser en reconnaissance de la carrière scientifique remarquable de Bernard Guinot.

Il me reste à remercier sincèrement chaque auteur et lecteur pour leurs précieuses contributions, et particulièrement le concours de Pascal Willis pour la coordination de ce travail.

*Claude Boucher
Président du Bureau des longitudes (2016-2017)
et coordinateur de cet ouvrage*