

Les résultats de Hall ont marqué la fin des expériences sur la déviation vers le sud

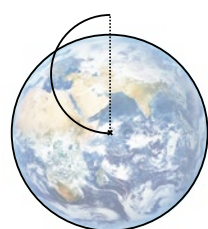
et d'un mouvement radial accéléré, spirale qui aboutit également au centre de la Terre.

Le questionnement de Newton faisait écho à celui qu'avait déjà mené Hooke quelques années auparavant. Ce fut le point de départ d'une correspondance entre les deux hommes sur la question de la trajectoire d'un corps en chute libre sur une Terre en rotation.

Hooke exprima son désaccord avec les conclusions de Newton: pour lui, la trajectoire n'était ni un arc de cercle ni une spirale, mais une ellipse (l'avenir lui donnera partiellement raison sur ce point, même s'il s'agissait pour lui davantage d'une intuition éclairée que d'une véritable démonstration), et la chute devait s'accompagner d'une déviation vers le sud, plus importante que la déviation vers l'est. En 1680, Hooke affirma même avoir observé ces deux déviations en étudiant la chute de corps sur une hauteur de 8 mètres, mais il ne put reproduire ces expériences devant la Royal Society lorsqu'elle le lui demanda.

En 1726, Newton dévoila la version aboutie de sa théorie de la gravitation universelle dans sa troisième édition des *Principia Mathematica*: tous les corps s'attirent selon une force qui décroît avec la distance qui les sépare (la paternité de cette idée sera au cœur d'une des guerres que se livrèrent Hooke et Newton). L'objet lâché du haut du mât ne se dirige plus vers le centre de la Terre parce que c'est son lieu naturel, conformément à la vision aristotélicienne, mais subit une force dirigée vers le centre de la Terre, lieu moyen de l'attraction de toutes les parties composant la planète. Il en découle notamment que l'objet n'atteint jamais le centre de la Terre et, dans le cas d'une Terre de densité homogène et sphérique, décrit une ellipse de même centre que la Terre (pour Hooke, l'ellipse était décentrée).

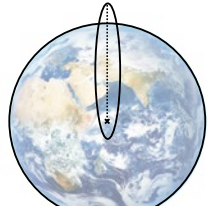
À ce moment de l'histoire, les lois de la mécanique newtonienne fournissaient tous les éléments pour que l'influence de la rotation de la Terre sur la chute des corps puisse être étudiée de façon rigoureuse, une bonne fois pour toutes:



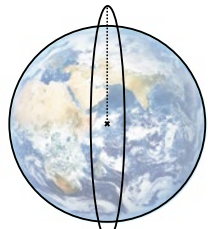
Galilée



Newton (pré-Principia)



Hooke



Newton (post-Principia)

À quoi ressemblerait la trajectoire d'un objet en chute libre qui pourrait voyager à l'intérieur de la Terre considérée comme homogène? Galilée a proposé un arc de cercle, Newton une spirale et Hooke avait comme intuition une ellipse décentrée. En découvrant les lois de la gravitation, Newton a montré que la bonne solution est proche d'une ellipse centrée.

on peut calculer exactement la trajectoire dans le référentiel non tournant et en déduire la trajectoire dans le référentiel terrestre et donc la déviation par rapport à la verticale. Toutefois, ce n'est pas ainsi que les choses se sont passées. Plus précisément, il ne se passa rien pendant un siècle. Newton lui-même ne chercha pas à approfondir ce sujet, en partie parce qu'il s'était activement éloigné de ce qui pouvait le mener à des conflits avec ses pairs. Ses premiers partisans ne se passionnèrent pas non plus pour cette affaire de déviation vers l'est et vers le sud, plus occupés à défendre la mécanique de Newton contre celle de Descartes, qui, dans le cadre de sa propre théorie de la gravitation, prévoyait un aplatissement plutôt au niveau de l'équateur qu'aux pôles sous l'effet de la rotation de la Terre.

Un siècle plus tard, en 1791, l'Italien Giovanni Guglielmini se saisit de la question et réalisa plusieurs expériences de chute beaucoup plus minutieuses que celles de Hooke, en faisant chuter des objets d'une hauteur de 78 mètres depuis la tour Asinelli, à Bologne (voir l'image page 75). Son objectif n'était plus de montrer la rotation de la Terre (alors bien admise depuis que l'héliocentrisme copernicien avait définitivement pris le pas sur le géocentrisme), mais de vérifier quantitativement les lois de la mécanique de Newton. Il prit notamment soin de faire ses expériences par atmosphère calme, mit au point un système de lâcher qui limitait les vitesses latérales initiales des billes et repéra les points d'impact au microscope. Il trouva une déviation vers l'est de 1,9 centimètre et vers le sud de 1,2 centimètre.

UNE MESURE DIFFICILE

Malheureusement, l'intérêt de ces mesures fut fortement diminué du fait qu'il ne put déterminer la position de référence (le point où tomberaient les billes si elles n'étaient pas déviées) que six mois après les expériences de lâcher et il est probable que le dispositif ait subi des changements au cours de cette période. Ce délai s'explique par la difficulté de cette détermination: il faut repérer la position d'équilibre d'un fil à plomb, c'est-à-dire d'un pendule de 78 mètres de long. On imagine aisément que la moindre vibration ou le moindre courant d'air empêchent le système d'être à l'équilibre. Il faut attendre des conditions atmosphériques particulièrement calmes, non pas sur une échelle de quelques secondes comme pour les chutes, mais de plusieurs jours.

Quelques années plus tard, Johann Friedrich Benzenberg, astronome, géologue et physicien allemand, commença à son tour à s'atteler sérieusement au problème, grâce à deux séries d'expériences. Dans la première, en 1802, il lâcha 31 billes d'une hauteur de 76 mètres depuis la tour de l'église Saint-Michel, à Hambourg. Il trouva des déviations comprises >

entre 2,8 centimètres vers l'ouest et 4,7 centimètres vers l'est, et comprises entre 2,3 centimètres vers le nord et 3,7 centimètres vers le sud. Ces mesures étaient très dispersées, mais elles semblaient présenter une asymétrie: la moyenne indiquait une déviation de 9 millimètres vers l'est et de 3,3 millimètres vers le sud. Benzenberg sollicita l'aide de Heinrich Olbers, astronome dont le nom aujourd'hui est attaché au paradoxe de la nuit noire (qui se résume à cette question: si l'Univers est statique et infini, il est rempli d'une infinité d'étoiles, alors pourquoi le ciel nocturne est-il noir?), pour interpréter ces résultats, c'est-à-dire pour obtenir des valeurs théoriques auxquelles les comparer.

Olbers étudia la question et la soumit à son tour à Carl Friedrich Gauss, un des grands mathématiciens de l'époque. L'astronome et physicien français Pierre-Simon de Laplace s'y intéressa aussi, probablement aiguillonné par l'intérêt de Gauss: ils étaient habitués à se trouver en compétition sur des points scientifiques. Ils furent amenés, en décrivant le mouvement de chute dans le référentiel terrestre tournant, à détailler un effet subtil que le mathématicien et ingénieur français Gustave Coriolis retrouva quelques décennies plus tard et que l'on nomme aujourd'hui «force de Coriolis».

Il s'agit du fait que la trajectoire d'un corps qui se déplacerait en ligne droite, à vitesse constante, dans un référentiel «fixe», est perçue comme courbe pour un observateur attaché à un référentiel tournant. Cet observateur interprète cette courbure comme étant l'effet d'une force (la force de Coriolis), que certains tiennent à qualifier de fictive, au même titre que la force centrifuge, car elle ne se manifeste pas dans le référentiel «fixe». C'est précisément cette propriété qui en fait une excellente sonde du caractère tournant ou non d'un référentiel; c'est grâce à elle que le pendule de Foucault (1851) met en évidence la rotation de la Terre sur elle-même.

L'INFIME DÉVIATION VERS LE SUD

En 1803, en étudiant la chute des corps sous l'action de leur poids, de la force centrifuge et de la force de Coriolis, Gauss et Laplace parvinrent à une formule similaire à celle que l'on enseigne encore de nos jours concernant la déviation vers l'est. Pour la déviation vers le sud, Laplace ne prédit «aucune déviation sensible», tandis que Gauss fournit une expression analytique donnant des valeurs non nulles mais très faibles. Pour une chute de 76 mètres comme dans l'expérience de Benzenberg, Gauss obtint une déviation théorique de 8 millimètres vers l'est et de 1 micromètre vers le sud. Si la première valeur est en accord avec la valeur expérimentale de 9 millimètres obtenue par Benzenberg, la seconde ne l'est pas du tout: la valeur mesurée de la déviation vers le sud est

VOYAGE AU « CENTRE DE LA TERRE » DANS UN TUNNEL GRAVITATIONNEL

On appelle « tunnel gravitationnel » la forme du puits qu'il faudrait creuser dans la Terre pour qu'un corps lâché depuis son ouverture tombe sans jamais toucher les parois. La première chose à noter est que le calcul d'une trajectoire dans l'intérieur de la Terre diffère de celui d'une trajectoire au-dessus de la surface. En effet, les lois de la gravitation indiquent que les parties de la Terre situées à un rayon supérieur à la distance entre le centre de la Terre et l'objet exercent une attraction globale nulle. Il faut donc recalculer la part de masse active en chaque point de la trajectoire dans la Terre, ce qui n'est pas le cas en surface où toute la Terre contribue.

Dans le cas où la Terre est considérée comme parfaitement sphérique, homogène et sans rotation, et où les frottements avec l'air sont négligeables, le tunnel gravitationnel serait rectiligne et relierait le point de départ au point situé

à l'antipode. L'objet lâché à l'entrée du tunnel oscillerait entre ces deux points en atteignant une vitesse maximale au centre de la planète. La rotation de la Terre, responsable pour les observateurs qui tournent avec elle de la « force de Coriolis », induit une déviation vers l'est et vers le sud. On montre alors, toujours pour une planète sphérique, que le tunnel est un peu courbé et aboutit à un point situé à quelques milliers de kilomètres à l'ouest du point antipodal. Si ces tunnels devaient être construits et utilisés pour voyager d'un point du globe à un autre, ils ne pourraient être utilisés que dans un sens !

Du fait de sa rotation, la Terre n'est pas sphérique mais aplatie aux pôles. En 2018, je me suis intéressé à la forme de ces tunnels en prenant en compte cette déformation. Le premier résultat étonnant est que la plupart des calculs sont assez simples, accessibles à un étudiant en licence, si l'on prend soin de se placer du point de vue d'un observateur « fixe ». Le second concerne la forme des tunnels : ceux-ci sont entièrement contenus à l'intérieur de la Terre. Ouverts à une extrémité (celle où le corps est lâché), ils ne débouchent nulle part ailleurs à la surface de la Terre (voir la figure ci-dessous).

R. T.

