

> 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

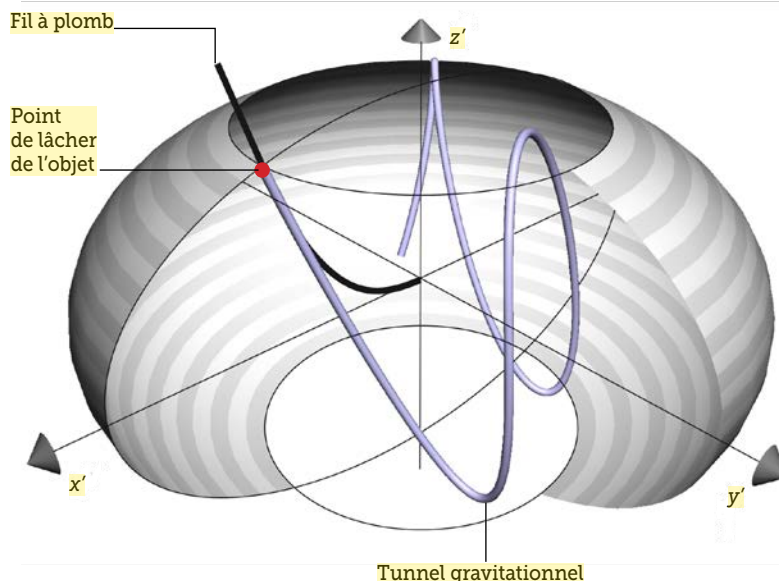
On appelle « tunnel gravitationnel » la forme du puits qu'il faudrait creuser dans la Terre pour qu'un corps lâché depuis son ouverture tombe sans jamais toucher les parois. La première chose à noter est que le calcul d'une trajectoire dans l'intérieur de la Terre diffère de celui d'une trajectoire au-dessus 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.



totalement inexpliquée. Au passage, Gauss et Laplace montrèrent que le frottement de l'air a peu d'influence sur la déviation vers le sud.

Piqué par ces résultats, Benzenberg affina ses expériences en 1804 en utilisant pour la chute un puits de mine à Schlebusch (84 mètres, voir la figure page 76) et en améliorant le dispositif de lâcher des billes, pour limiter une éventuelle vitesse initiale latérale qui biaiserait les mesures. Cette fois, en sélectionnant parmi ses mesures celles qui lui semblaient avoir été prises dans les conditions les plus fiables, ses résultats ne montrèrent pas de déviation vers le sud.

Tout serait finalement assez simple si l'histoire s'arrêtait là. Mais non. Le chimiste allemand Ferdinand Reich, en 1831, et d'autres renouvelèrent l'expérience, avec des hauteurs de chute allant jusqu'à 400 mètres. Ils mirent clairement en évidence une déviation vers le sud incompatible avec les résultats de Gauss et Laplace. Le problème était assez étonnant pour que des explications non gravitationnelles soient avancées. Par exemple, dans les années 1840, le Danois Hans Christian Ørsted et le Britannique John Herschel proposèrent que dans les billes en métal utilisées, des courants induits dus à l'interaction avec le champ magnétique terrestre soient responsables de la déviation vers le sud.

L'EXPÉRIENCE DÉFINITIVE

Au début du xx^e siècle, Edwin Hall, évoqué dans l'introduction, celui-là même qui donna son nom à un effet de déviation des électrons dans un conducteur en présence d'un champ magnétique, se pencha à son tour sur cette question avec une approche expérimentale différente et que l'on pourrait qualifier de plus moderne. Plutôt que d'augmenter encore la hauteur de chute, il préféra se placer à une hauteur modeste (23 mètres, dans la tour du laboratoire de physique Jefferson, à l'université Harvard, aux États-Unis), mais dans des conditions qui lui permettaient de contrôler les incertitudes expérimentales (pas de courants d'air, pas de différence de température entre les parois intérieures de la tour, etc.). Il obtint ainsi la première mesure de la déviation vers l'est affectée d'incertitudes expérimentales inférieures à la valeur mesurée. Cette mesure était en accord avec la prédiction de la mécanique newtonienne, calculée par Gauss et Laplace. Les déviations vers le sud qu'il observa étaient dans la limite des erreurs expérimentales, c'est-à-dire compatibles avec une déviation nulle.

Satisfait de ces résultats, Hall s'avoua toutefois impuissant à expliquer l'ensemble des déviations vers le sud observées par ses prédécesseurs, ce qu'il considéra comme une véritable énigme. L'erreur était certainement expérimentale, mais, faute de pouvoir assister aux expériences, les historiens des sciences disposent de peu d'indices pour le confirmer.

Les résultats de Hall ont marqué la fin de l'approche expérimentale du problème de la déviation vers le sud, mais ils ont coïncidé avec le début d'un renouveau d'intérêt théorique, et ce pour plusieurs raisons.

D'une part, la définition de la déviation vers le sud est assez subtile. Lorsqu'un corps chute et atteint le fond du puits, à partir de quel point de référence doit-on mesurer une déviation ? Expérimentalement, ce point peut être matérialisé par un fil à plomb sans mouvement, une masselotte accrochée au bout d'un fil attaché au point de lâcher. Or, dans la Terre en rotation, le fil à plomb, s'il est assez long et si le fil est de masse négligeable, n'indique pas la direction de la pesanteur au point d'attache, mais celle au niveau de la masselotte (pire, il n'est pas rectiligne si la masse du fil est prise en compte, car il est soumis à la force centrifuge et à une force de gravitation qui évoluent tout le long du fil). Une évaluation correcte de la déviation vers le sud doit en tenir compte. Ce n'est qu'en 1911 que le mathématicien américain William Roever souligna clairement cette subtilité.

D'autre part, la valeur de la déviation vers le sud est sensible à la façon dont le champ de pesanteur évolue au cours de la chute, en intensité et en direction, c'est-à-dire qu'elle est sensible à la forme de la Terre (son léger aplatissement aux pôles, par exemple) et à la façon dont sa masse volumique augmente avec la profondeur, paramètres qui relèvent des géosciences.

Enfin, si l'on s'intéresse aux situations proches de la réalité expérimentale, le problème fait apparaître deux paramètres que l'on peut considérer comme petits : la vitesse de rotation de la Terre est faible devant le temps qu'il faudrait au projectile pour la traverser de part en part et, dans les expériences réelles, les hauteurs de chute sont faibles devant le rayon de la Terre. Dans cette situation, les physiciens sont tentés de simplifier les équations pour en trouver des solutions approchées. Mais la procédure est assez délicate et les physiciens ont parfois été en désaccord sur la façon de le faire (techniquement, sur la façon de calculer un développement limité à deux paramètres).

Ces subtilités font du problème de la chute libre une question sur laquelle des physiciens reviennent régulièrement, pour en proposer des variantes, des solutions plus complètes, avec des hypothèses plus réalistes sur la forme ou la composition de la Terre, ou simplement pour aborder ce vénérable problème sous un angle nouveau (voir l'encadré page ci-contre). Ils le font généralement en marge de leur activité de recherche quotidienne, pour satisfaire un aspect de leur métier que l'on met trop rarement en avant : le plaisir d'explorer les lois de la physique, celui-là même qui transparait dans les propos de Hall cités au début de cet article. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Taillet, **Free falling inside flattened spheroids : gravity tunnels with no exit**, *Amer. J. of Physics*, vol. 86, pp. 924-933, 2018.

A. Koyré, **Chute des corps et mouvement de la Terre**, Vrin, 1973.

A. Armitage, **The deviation of falling bodies**, *Annals of Science*, vol. 5(4), pp. 342-351, 1947.

E. H. Hall, **Do falling bodies move south ?**, *Physical Review*, vol. 7, pp. 179-190, 1903.