



Comment cet enfant peut-il savoir si le site internet qu'il consulte fournit des informations fiables ? Éduquer les jeunes à l'utilisation d'internet et des réseaux sociaux est crucial pour qu'ils aient un minimum de méfiance et ne prennent pas pour argent comptant tout ce qu'ils lisent en ligne.

BIBLIOGRAPHIE

S. Delouvé et N. Gauvrit (sous la dir. de), **Des têtes bien faites**, PUF, 2019.

E. Pasquinelli et al., **Esprit scientifique, esprit critique**, Le Pommier, 2017.

D. T. Willingham, **Critical thinking**, *American Educator*, vol. 31, pp. 8-19, 2007.

D. F. Halpern, **Thought and Knowledge : An Introduction to Critical Thinking**, Routledge, 2002.

avis, pourquoi ces équipes ont-elles tendance à avoir de moins bons résultats l'année suivant leur victoire?»

TRANSFÉRER SES CONNAISSANCES

Si vous aviez suivi le cours de l'université du Michigan, vous sauriez sûrement reconnaître ici un phénomène de «régression vers la moyenne» : pour un score partiellement dû au hasard, si on se trouve très haut ou très bas à un moment donné, on a tendance ensuite à se rapprocher de la moyenne. Si les gagnants font souvent moins bien la fois suivante, c'est parce qu'ils triomphent quand ils sont au mieux de leurs performances. De même, si vous avez une note exceptionnellement élevée à un examen quelconque, il est probable que la note suivante soit plus basse (et c'est certain si vous avez obtenu la note maximale la première fois). C'est un simple phénomène mathématique, mais il n'est pas très intuitif !

Or les étudiants qui avaient suivi les cours de raisonnement statistique ont souvent spontanément répondu en citant ce phénomène de régression vers la moyenne, ce que les autres faisaient plus rarement. Ces derniers invoquaient par exemple le fait de se reposer sur ses lauriers ou d'avoir trop confiance en soi.

Cela montre bien, au moins dans ce cas, que des outils de raisonnement appris en classe sont ensuite disponibles dans d'autres contextes et sont bien transférés.

Nous avons cité deux exemples d'études d'impact, mais il y en a bien d'autres. Plusieurs chercheurs ont même réalisé des méta-analyses portant parfois sur plus de cent études, et un tableau commence à émerger, même s'il reste beaucoup à faire pour trouver la meilleure manière de développer l'esprit critique. La bonne nouvelle est que les interventions pédagogiques fonctionnent dans l'ensemble. Pas autant qu'on le souhaiterait, certes, mais elles augmentent en moyenne l'esprit critique, c'est-à-dire les capacités à raisonner, analyser les arguments, percevoir les structures logiques, évaluer la fiabilité d'une information. L'effet est «moyen» selon les critères de la psychologie, mais il n'est pas nul.

QUELQUES RÈGLES À SUIVRE

Quelles sont donc les caractéristiques de l'enseignement le plus efficace ? Parmi les facteurs étudiés, deux ressortent distinctement. Premièrement, pour que l'enseignement soit efficace, il doit être explicite. Cela signifie que l'on doit dire aux élèves pourquoi et comment ils vont développer leur esprit critique. C'est pourquoi les enseignants de sciences et de philosophie, qui pensent développer implicitement les capacités de réflexion de leurs élèves par le fait qu'ils leur montrent l'exemple, n'obtiennent pas d'excellents résultats.

Second point important : il faut favoriser le transfert. Pour ce faire, plusieurs solutions sont envisageables. Une première consiste à multiplier les exemples dans des domaines variés : on montre comment évaluer la fiabilité d'une source concernant un article politique, un autre traitant d'écologie, un troisième portant sur le sport... Une seconde possibilité consiste à travailler sur du matériel abstrait. Par exemple, imaginer des leçons de logique formelle ou de psychologie dressant la liste des risques d'erreurs de jugement liés à la psychologie ordinaire.

Développer l'esprit critique des jeunes est donc possible... et vraisemblablement indispensable pour former des citoyens responsables. Se fier à l'intuition des enseignants ne suffit pas, il faut aussi appliquer l'esprit critique à l'éducation de l'esprit critique, chercher de manière raisonnée et empirique les meilleures stratégies possible à mettre en place dans les écoles. Le foisonnement d'idées et de projets innovants qui ont récemment éclos en France offre une occasion inédite de tester à grande échelle différentes pistes pour que la prochaine génération soit plus rationnelle que la précédente, et puisse mieux résister sur le champ de bataille idéologique des réseaux sociaux. ■

L'ESSENTIEL

> Avant le développement de la mécanique newtonienne, les savants n'étaient pas en mesure de décrire la trajectoire d'un corps en chute libre sur la Terre et de dire si cette chute déviait de la verticale.

> Les premières expériences ont donné des résultats parfois contradictoires. Mais les

travaux théoriques de Laplace et de Gauss ont montré que la déviation vers le sud était négligeable, contrairement à celle vers l'est. Cela a finalement été confirmé.

> Des physiciens s'intéressent encore à la question, en utilisant des descriptions plus réalistes de la Terre.

L'AUTEUR



RICHARD TAILLET
professeur de physique
à l'université Savoie
Mont Blanc et au LAPTh,
à Annecy-Le-Vieux

Chute libre, histoire d'une déviation

Lâcher des objets du haut de tours ou dans des puits de mine : une expérience maintes fois répétée par des savants désireux de déterminer si leur chute était déviée vers l'est et vers le sud. La question intéresse encore les physiciens d'aujourd'hui.

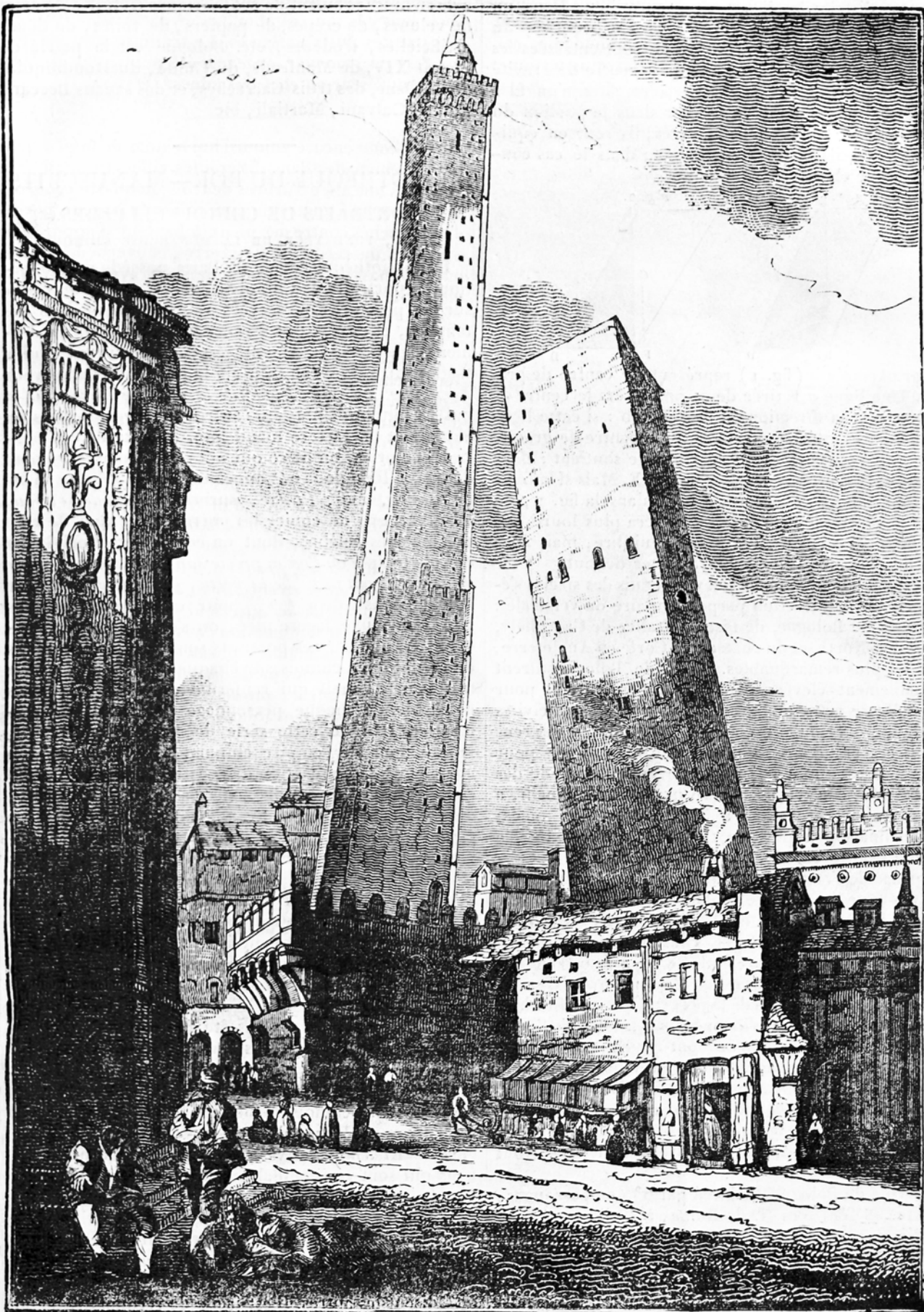
En 1903, le physicien américain Edwin Hall commençait par ces mots un article consacré à la chute des corps : « La question de savoir si une sphère lâchée d'une hauteur de quelques centaines de pieds s'écarte légèrement vers le sud de la direction d'un fil à plomb n'est peut-être pas l'un des problèmes les plus importants ni les plus urgents de la physique, mais elle a la dignité d'un âge vénérable et le charme du mystère. » Mystère en effet, car au cours des siècles précédents, les expériences conduisaient à des résultats contradictoires et seule une compréhension fine des lois de la gravitation a permis d'y voir clair. L'exercice est devenu un grand classique pour les étudiants, et des physiciens continuent de modéliser de façon plus précise la chute d'un corps s'il pouvait traverser librement la Terre.

Plusieurs siècles avant la remarque d'Edwin Hall, la question de savoir si un corps en chute libre s'éloigne de la verticale revêtait une importance fondamentale sur le plan cosmologique : les savants espéraient utiliser cette observation pour prouver que la Terre tourne sur

elle-même. Déjà, alors qu'il rédigeait *De Revolutionibus*, publié en 1543 et dans lequel il développait l'hypothèse héliocentrique, Nicolas Copernic avait saisi toute l'importance de bien comprendre la chute des corps. En effet, certaines des critiques qui lui étaient adressées argumentaient que la Terre ne pouvait pas être animée d'un mouvement de rotation, car cela aurait des conséquences spectaculaires (et non observées). Par exemple, selon ces critiques, une balle lâchée du haut d'un mât devrait atterrir plusieurs centaines de mètres à l'ouest de son point de lâcher, le mât et son support étant emportés par le mouvement de la Terre mais pas la balle, qui resterait en arrière.

Copernic lui-même, puis des coperniciens comme Thomas Digges ou Giordano Bruno, prirent grand soin de désamorcer ces objections en attribuant au projectile un mouvement circulaire (celui du point de lâcher) en plus de son mouvement vertical. Galilée, en particulier, s'efforça d'expliquer qu'une balle lâchée du haut d'un mât en mouvement est une balle lancée à la vitesse du mât, du point de vue d'un observateur qui ne participe pas au mouvement

Bologne présente deux tours penchées, symboles de la ville : Asinelli (97 mètres de hauteur) et Garisenda (48 mètres). À l'intérieur de la première, Giovanni Guglielmini a étudié en 1791 la chute des corps et leur déviation de la verticale.



> de la Terre (je l'appellerai l'observateur «fixe» dans la suite). Elle doit donc avancer horizontalement à la vitesse du mât avant d'atteindre le sol. Galilée évoqua aussi, dans son *Dialogue sur les deux systèmes du Monde* (1632), la possibilité que la balle se déplace plus rapidement que le sol (car le sommet du mât avance plus vite que le sol, puisqu'il est plus loin du centre de rotation) et l'atteigne à l'est du mât plutôt qu'à son pied. Mais le savant n'argumenta pas de façon très enthousiaste, tant l'effet lui apparaissait comme une conséquence erronée d'un mauvais raisonnement.

DES RAISONNEMENTS PRÉNEWTONIENS

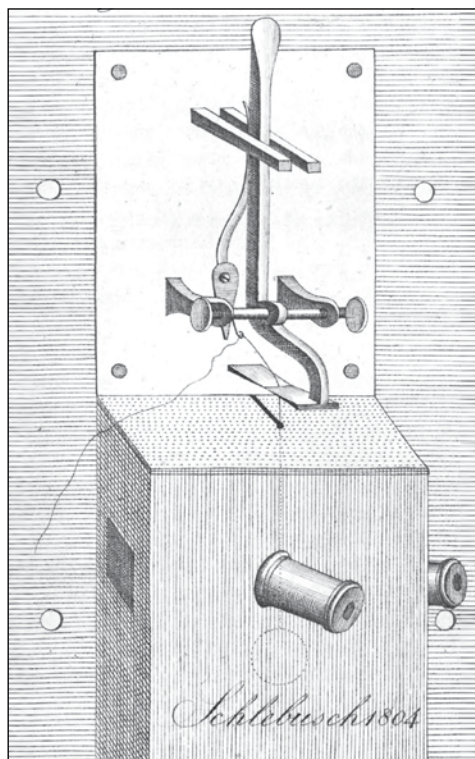
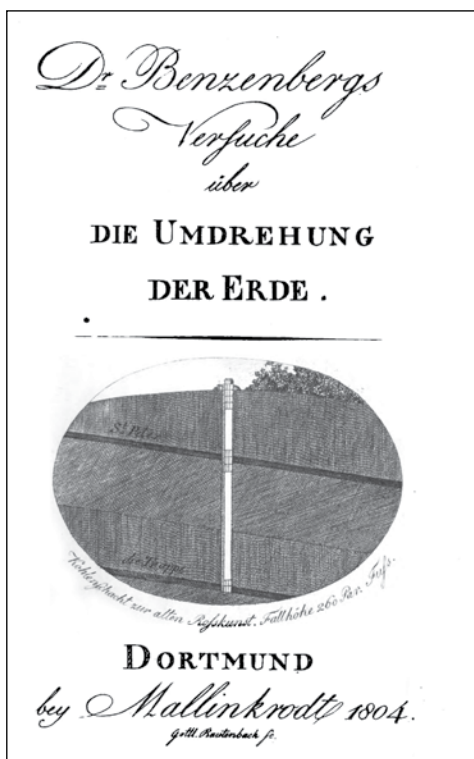
En 1679, dans une lettre adressée à Robert Hooke, Isaac Newton revint sur cette idée et montra que si la Terre tourne sur elle-même, la trajectoire d'une balle qui tombe doit être déviée vers l'est. Il comprit alors que l'expérience de chute libre était un moyen de mettre en évidence la rotation de la Terre de façon expérimentale. Cette question était un enjeu fondamental au XVIII^e siècle, période qui vit notamment la condamnation de Galilée par l'Église pour ses convictions héliocentriques (mais où le Londres de Newton autorisait plus de libertés dans l'exploration de ces idées que l'Italie de Galilée).

Toutefois, la description de la chute d'un corps dépend beaucoup de la compréhension que les physiciens ont de la façon dont la vitesse horizontale de l'objet évolue au cours de la

chute. Il était déjà possible de la déduire à partir de la loi des aires, énoncée quelques décennies plus tôt par Johannes Kepler dans le cadre du mouvement des planètes (elle stipule que le segment reliant le Soleil à une planète sur sa trajectoire balaie des aires égales en des temps égaux). Mais personne à cette époque n'avait imaginé que ces lois, relatives au mouvement des corps célestes, pouvaient avoir la moindre pertinence pour comprendre la chute des corps sur Terre.

De façon plus générale, la compréhension de la chute des corps demande de disposer de la notion d'inertie, de comprendre le concept de force et de maîtriser la notion de changement de référentiel. Malgré les avancées conceptuelles auxquelles il a contribué, ce n'était pas le cas de Galilée. Par exemple, pour lui, un corps lâché du haut d'une tour et qui serait libre de traverser la Terre décrirait (pour un observateur «fixe») un grand arc de cercle (voir la figure page ci-contre) qui l'amènerait exactement au centre de la Terre; l'hypothèse était astucieuse à plusieurs égards (elle a notamment pour conséquence que les corps sont uniformément accélérés vers le bas, pour l'observateur terrestre, en accord avec les observations), mais totalement déconnectée de toute notion de dynamique.

Ce n'était pas le cas de Newton non plus en 1679 (des années avant la publication de ses *Principia Mathematica*), qui imaginait plutôt une trajectoire en spirale, résultant de la composition d'un mouvement circulaire uniforme



Lors de sa seconde série d'expériences, en 1804, Johannes Friedrich Benzenberg a utilisé un puits de mine à Schlebusch, en Allemagne, d'une hauteur de 84 mètres (figurée à gauche). Il a aussi perfectionné son dispositif de lâcher des masses (à droite) afin de ne pas communiquer à l'objet une vitesse latérale au moment de son lâcher. En accord avec les calculs de Laplace et Gauss, Benzenberg a trouvé une déviation vers le sud quasi nulle.

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

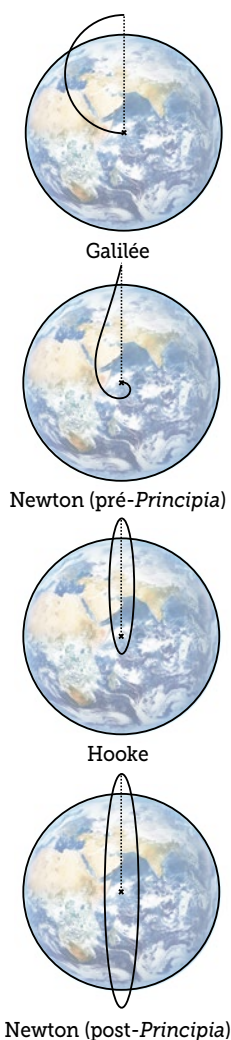
et d'un mouvement radial accéléré, spirale qui aboutit également au centre de la Terre.

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:



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 fallut 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

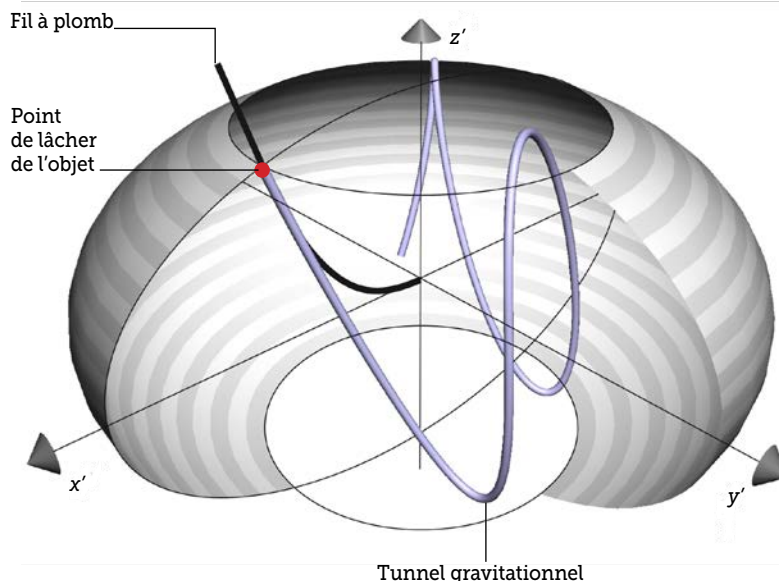
On appelle «tunnel gravitationnel» la forme du puits qu'il faudrait creuser dans la Terre pour qu'un corps lâché depuis son ouverture tombe sans jamais toucher les parois. La première chose à noter est que le calcul d'une trajectoire dans l'intérieur de la Terre diffère de celui d'une trajectoire au-dessus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



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.

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. ■

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

L'OFFUSCATION OU L'ART DE BROUILLER L'ÉCOUTE

Puisque les espions ou les marchands veulent en savoir trop sur vous, donnez-leur satisfaction en les laissant s'emparer d'informations nombreuses... et fausses!

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

Agacé par une publicité que je vois pour la énième fois sur le site d'actualités que je consulte, je clique dessus, je pousse dans un coin de mon écran d'ordinateur la fenêtre qui s'ouvre (de façon à cacher son contenu à mon regard), puis, quelques secondes plus tard, je ferme cette fenêtre dont je n'ai rien vu. Mon but est de fausser les informations que les systèmes qui me surveillent auront de moi, et de faire payer pour ce clic l'entreprise qui m'importune avec ses publicités (plus on clique sur une publicité en ligne, plus cela coûte à celui qui la propose). Ce que je viens de faire est de l'« offuscation ».

Cette stratégie de gestion et de production de l'information vise à obscurcir le sens qui peut être tiré d'une action ou d'un message, dans le but de troubler ceux qui en prennent connaissance et de les empêcher de tirer un profit de ce qu'ils croient apprendre.

Une définition plus précise pourrait être : « L'offuscation est la création délibérée d'informations surabondantes, ambiguës, désordonnées ou fallacieuses en les mélangeant aux données véridiques afin de rendre plus difficiles leur collecte, leur analyse et leur utilisation. » Autrement dit, tout ce qui brouille, obscurcit, assombrit, opacifie, masque, noie, fausse, gêne, rend illisibles des données est de l'offuscation. Un récent livre lui est consacré, traduit en français (voir la bibliographie). On y découvre les multiples formes, anciennes ou contemporaines, de cette technique de protection contre les regards indiscrets.

Depuis qu'on sait qu'internet est le terrain de chasse rêvé des collecteurs de « big data » et que des dossiers volumineux sont constitués sur chacun de nous pour mieux nous cibler, nous ressentons le besoin de nous protéger de ces intrusions dans nos vies. L'idée de cliquer sur les publicités gênantes est à l'origine du logiciel AdNauseam (<https://adnauseam.io>) qui, sans que vous ayez à vous en préoccuper, clique lui-même sur toutes les publicités des pages que vous consultez et empêche ainsi la constitution de profils pertinents à votre sujet. Le logiciel TrackMeNot (<http://trackmenot.io>) produit des effets de brouillage du même type.

D'autres méthodes plus radicales existent. Les VPN (*virtual private networks*, réseaux virtuels privés) permettent de créer des liens directs entre des ordinateurs distants, qui isolent leurs échanges du reste du trafic. La connexion au réseau TOR est un autre moyen qui, entre autres choses, rend anonyme une session de navigation web.

UNE PRATIQUE VIEILLE COMME LE MONDE... VIVANT

Le problème n'est en fait pas nouveau. Dans leur lutte pour la survie, les organismes vivants ont depuis longtemps mis en œuvre des méthodes d'offuscation. Un exemple spectaculaire et esthétique est celui des ocelles de papillons, ces motifs ronds imitant des yeux qui font fuir les prédateurs lorsque l'insecte déploie brusquement ses ailes. Les ocelles du paon-du-jour évoquent ainsi assez bien le regard d'un mammifère. De nombreux poissons, tels que le >