

> 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

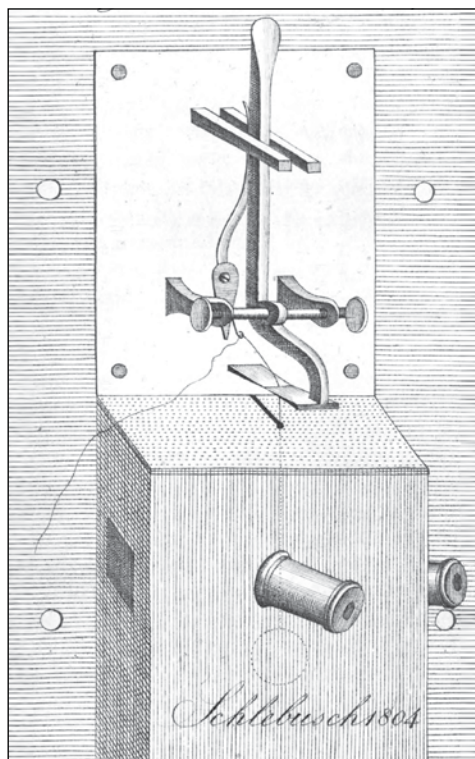
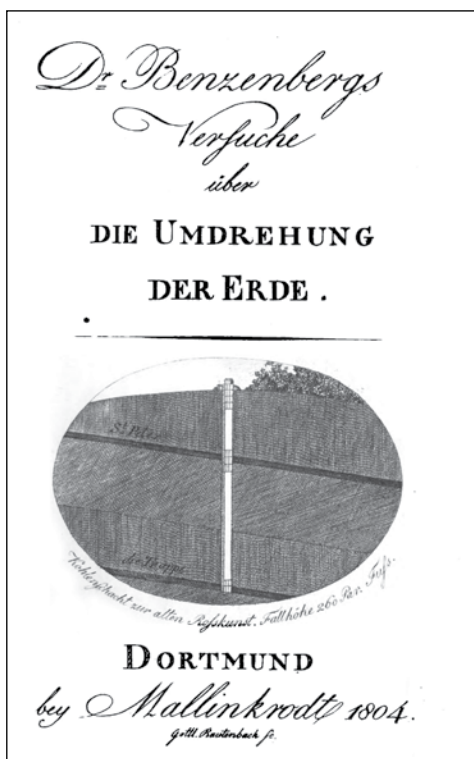
En 1679, dans une lettre adressée à Robert Hooke, Isaac Newton revint sur cette idée et montra que si la Terre tourne sur elle-même, la trajectoire d'une balle qui tombe doit être déviée vers l'est. Il comprit alors que l'expérience de chute libre était un moyen de mettre en évidence la rotation de la 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

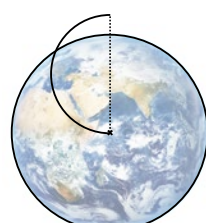
et d'un mouvement radial accéléré, spirale qui aboutit également au centre de la Terre.

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).

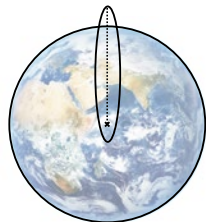
À ce moment de l'histoire, les lois de la mécanique newtonienne fournissaient tous les éléments pour que l'influence de la rotation de la Terre sur la chute des corps puisse être étudiée de façon rigoureuse, une bonne fois pour toutes:



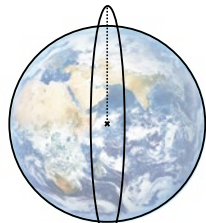
Galilée



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 ➤