

## Une question historique :

Où tombe une pierre lâchée du haut d'une tour ? Au pied de la tour ? Vers l'ouest ? Vers l'est ?

Christian Larcher, Le Perreux sur Marne

*Dans ce qui va suivre nous allons examiner différents arguments utilisés au cours de l'histoire pour affirmer ou réfuter le mouvement de la Terre. Nous montrerons que Newton avait déjà perçu que la rotation de la planète devait provoquer une très légère déviation vers l'est des corps qui tombent en chute libre. Le raisonnement simple de Newton donnait une bonne approximation du phénomène mais l'adéquation avec les données expérimentales restait insuffisante. De nombreuses études, qui se poursuivirent jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle, conduisirent à introduire un facteur 2/3 dans l'évaluation obtenue par Newton, assurant ainsi une bonne compatibilité avec les données expérimentales.*

Pour Aristote, la Terre ne tourne pas sur elle-même ; si tel était le cas, une pierre lâchée du haut d'une tour n'arriverait pas à son pied, car pendant sa chute la Terre se serait dérobée en allant vers l'est ; la pierre tomberait donc à l'ouest de son point de départ. Deux mille ans plus tard il en est pratiquement toujours ainsi pour Tycho Brahé (1546-1601). Giovanni Borelli (1608-1679) écrit en 1668 : "Tout ce qui s'élève dans le ciel (oiseaux, nuages) ne partage plus de lien solide avec la Terre et doit, pour un observateur resté sur la Terre, se déplacer vers l'ouest à grande vitesse. Ce n'est pas le cas donc la Terre ne tourne pas".

L'argument paraît convaincant. Un autre argument était aussi avancé : si la Terre était animée d'un mouvement de rotation il devrait en résulter un fort courant d'air...

Galilée (1561-1642) indique qu'une pierre lâchée du sommet d'une tour pourrait garder en elle, "un mouvement indélébile", "un mouvement imprimé" acquis dès le départ ce qui pouvait justifier de sa chute au pied de la tour.

Une autre expérience est tentée en 1634 par l'abbé Marin Mersenne (1588-1648) ; elle consiste à tirer des coups de canon à la verticale. Mais comme aucun boulet n'est retrouvé il en conclut qu'ils se perdent dans l'éther...

Peu après, Newton (1642-1727) considère que quand un corps chute du haut d'une tour il garde sa vitesse d'entraînement. Mais il pense que la bille doit tomber très légèrement à l'est et il propose de mettre expérimentalement en évidence ce fait.

Dans une lettre, datée du 28 novembre 1679 et adressée au physicien Robert Hooke, il écrit : "étant donné qu'avant sa chute le corps était plus éloigné du centre de la Terre que les parties de la Terre

auxquelles il parviendra dans sa chute il en résulte que le mouvement d'ouest en est du corps sera plus important que le mouvement d'ouest en est de ces parties de la Terre (...). L'écart [par rapport à la verticale] sera très petit ; néanmoins je l'estime suffisant pour permettre de juger du fait" (Alexandre Koyré ; Études newtoniennes ; Gallimard 1968 p.282)

Déjà dans le "dialogo" (sur les deux systèmes du monde), publié en 1632, Galilée faisait remarquer que lorsqu'un bateau à voile se déplace, le sommet de son mât parcourt une distance plus grande que son pied. Puisque celui-ci est plus proche du centre de la Terre. Même Simplicio a compris puisqu'il dit que lorsqu'un homme voyage : "Sa tête fait un voyage plus grand que ses pieds".

Dans le langage formel actuel, le raisonnement de Newton consiste à dire que cette déviation résulte uniquement du fait que la vitesse linéaire "horizontale" d'un corps est d'autant plus grande que sa distance à l'axe de rotation de la Terre est plus élevée.

### Calculons la déviation dans cette conception :

Si la tour est située sur l'équateur, donc perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre, la vitesse horizontale d'un point A situé au sommet de la tour est (en notant  $\omega_0$  la valeur de la vitesse angulaire de la Terre autour de cet axe) :

$v_A = \omega_0(R_T + h)$  par rapport à l'axe de rotation, alors que la vitesse d'un point B, situé au pied de la tour, est  $v_B = \omega_0 R_T$

Comme  $v_A$  est plus grand que  $v_B$ , le corps qui tombe parcourt un arc plus grand que ne le fait le

pied de la tour dans le même intervalle de temps. La bille va donc un peu plus loin vers l'est que le pied de la tour. Calculons la différence, selon l'horizontale, entre la distance parcourue par le point A et celle parcourue par le point B (pied de la tour) situé à l'équateur pendant le temps t de chute en comptant positivement les déplacements vers l'est.

$$\Delta x = (VA - VB)t = \omega_0 (R_T + h).t - \omega_0 R_T.t = \omega_0 h t$$

Si l'on suppose négligeable la résistance de l'air, la chute est uniformément accélérée et la durée de la chute est liée à la hauteur de chute par la relation :

$$h = 1/2 g t^2 .$$

La chute est alors considérée comme parabolique.

En notant  $\Delta x_N$  (N pour Newton) la déviation vers l'est calculée dans la conception de Newton, on en déduit qu'à l'équateur :

$$\Delta x_N = 1/2 \omega_0 h . (2h/g)^{1/2}$$

$$\text{soit, en fonction de } h : \Delta x_N = \omega_0 (2/g)^{1/2} h^{3/2}$$

$$\text{ou encore } \Delta x_N = \omega_0 h . (2h/g)^{1/2}$$

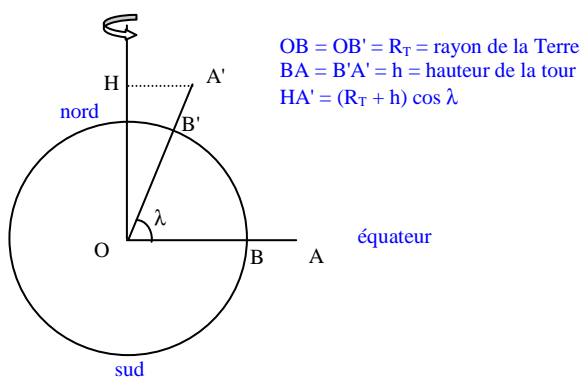


Fig.1. Chute depuis A ou A'

Si la tour est située en un point de latitude  $\lambda$ , la distance du point A' à l'axe de rotation de la Terre (voir figure 1) est :

$$d_{A'} = (R_T + h) \cos \lambda$$

Et celle du point B' :

$$d_{B'} = R_T \cos \lambda$$

La déviation est donc nulle aux pôles ( $\lambda = 90^\circ$ ) et maximale à l'équateur.

Pour  $\lambda = 45^\circ$  et  $h = 30$  m avec  $\omega_0 = 7,292 \cdot 10^{-5}$  rad/s  
 $\Delta x_N = 3,82$  mm

### Quand les expérimentateurs étudient la chute d'une bille

La vérification expérimentale est très délicate car la déviation est très faible et donc très sensible aux différentes perturbations. Celles-ci résultent de l'influence des mouvements de l'air, d'éventuelles vibrations, de la manière de lâcher la bille mais également de la manière de repérer son impact **au sol**. De plus cette déviation vers l'est est mesurée à partir de la verticale, mais comment déterminer cette verticale ? (1)

(1) nous y reviendrons dans un prochain numéro.

**1679** – Hooke réalise l'expérience dans une salle dont la hauteur est de 8,23 m. Il aurait observé une déviation vers le sud-est. Cette affirmation est peu crédible, car pour cette hauteur, la valeur théorique est de l'ordre de 0,5 mm.

**1679** – Jean-Dominique Cassini (I) utilise un puits de 56 m de profondeur situé dans le bâtiment Perrault de l'observatoire de Paris (il est toujours visible), mais on n'a pas retrouvé ses résultats.

**1790-1791** – l'abbé Guglielmi réalise l'expérience du haut de la Torre degli Asinelli de Bologne ( $\lambda = 44,5^\circ$ ) haute de 77,96 m. Il obtient une déviation vers l'est de 1,889 cm alors que l'évaluation de Newton conduirait à  $\Delta x = 1,62$  cm.

**1802** – Benzenberg du haut de la tour Saint-Micheal à Hambourg ( $\lambda = 53,55^\circ$  et  $h = 76,4$  m) observe une déviation vers le sud-est. La déviation observée vers l'est est de 0,9 cm alors que la théorie de Newton donne 1,15 cm.

Il refait l'expérience en 1804 dans un puits de mine à Schlebusch ( $\lambda = 51,05^\circ$ ) profond de 85,1 m. Il dit avoir obtenu en moyenne sur 29 chutes

$\Delta x = 11,5 \pm 2,9$  mm (déviation théorique 16,2 mm selon Newton).

**1831** – Reich dans un puits de mine de Freiberg en Saxe ( $\lambda = 51^\circ$ ) observe une déviation vers l'est de 2,83 cm pour une hauteur de chute de 158 m (la valeur calculée selon la théorie de Newton serait de 4,11 cm).

Il trouve également une déviation vers le sud de 0,5 cm ...

**1902** – le professeur Hall de l'Université de Harvard opère avec une hauteur de chute de 23 m dans une tour ( $\lambda = 39^\circ$  nord). À la suite d'un millier de chutes il trouve une déviation vers l'est de  $\Delta x = 0,15$  cm alors que la valeur calculée avec le modèle de Newton serait de 0,28 cm. La hauteur est plus faible que dans les expériences précédentes, mais le travail est mené avec beaucoup plus de soin :

- pour éviter les courants d'air Hall utilisait "un tube de 34 cm de diamètre en coton de traversin d'une seule pièce, tendu par des cintres et des poids de haut en bas de la tour",

- pour déterminer les points d'impact des billes au sol Hall, en 1903, utilisait des assiettes contenant une mixture de suif. L'opération n'était pas facile : si la température est trop basse (par exemple  $15^\circ$  C) le suif est trop dur, il s'émiette, ou se fracture exagérément sous l'impact des billes ; il faut alors ajouter du saindoux. Si la température augmente de quelques degrés le

mélange devient trop tendre et les billes viennent heurter l'assiette ; on ajoute alors un peu de cire d'abeille. Enfin pour repérer la position du centre de masse de chaque bille Hall disposait un "chapeau pointu" posé sur la bille.

**1903** – Flammarion à Paris expérimente avec des billes d'acier lâchées du haut de la coupole du Panthéon. Il relate cette expérience, réalisée le 3 juin 1903, dans le Bulletin de la SAF (Société Astronomique de France). Il avait fondé cette société en 1887.

"Nous avons profité de l'installation du pendule au Panthéon pour faire une série d'expériences sur la chute des corps et examiner si le mouvement de rotation de la Terre se manifeste dans cette chute de 68 m de hauteur".

"Un objet situé à 68 m au dessus du sol tourne un peu plus vite que le sol, et la vitesse dont il est animé n'étant pas détruite lorsqu'on l'abandonne à la pesanteur, tend à le faire tomber à 8 mm à l'est de la verticale marquée par le fil à plomb". (Bulletin de la SAF de l'année 1903 p. 329 et suivantes).

Les billes utilisées mesurent 15,84 mm de diamètre et leur masse est de 16,25 g.

Les billes en tombant laissent des empreintes assez profondes sur un plaque en plomb de 2,5 mm d'épaisseur ce qui permet de faire des mesures précises (figure 2).

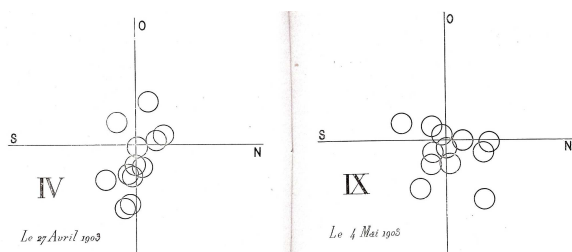


Fig.2. Trace des impacts sur les plaques de plomb

Camille Flammarion utilise un dispositif comportant un électro-aimant sans rémanence, ce qui permet de libérer la bille sans lui communiquer de vitesse initiale autre que celle d'entraînement par la Terre ! Il vérifie que les billes ne conservent pas une aimantation résiduelle, réalise l'expérience de jour et de nuit pour s'affranchir des vibrations éventuellement occasionnées par le passage des voitures (peu nombreuses à l'époque).

Au total il réalise 169 chutes en 14 séries du 20 avril au 14 mai 1903. Il obtient d'assez nombreuses traces qui s'écartent de la valeur théorique. Il attribue l'écart à des mouvements d'air sous la coupole et conclut que la déviation vers l'est est prépondérante ; il l'estime à 0,76 cm vers l'est alors que la valeur théorique de 1,20 cm avec le modèle de

Newton.

### Comparaison des déviations expérimentales et calculées

Date - lieu	h en m	$\lambda$ en degrés	$\Delta x$ exp en cm	$\Delta x$ calculé d'après Newton en cm	$\Delta x$ en cm calculé avec modèle actualisé
1790 Bologne	77,9 6	44,5	1,89	1,62	1,08
1802 Hambourg	76,4	53,55	0,9	1,15	0,77
1804 Schelbush	85,1	51,05	1,15	1,62	1,08
1831 Freiberg	158	51	2,83	4,11	2,74
1902 Harvard	23	39	0,15	0,28	0,19
1903 Paris	68	48,51	0,76	1,20	0,8

Le résultat théorique de Newton n'est pas conforme aux observations ; la déviation a bien lieu vers l'est mais avec une valeur plus faible que celle calculée.

La colonne de droite du tableau indique les valeurs calculées avec un modèle actualisé.

Notons que la déviation observée en 1790 semble avoir été surévaluée.

### Où est l'erreur ?

En fait trois questions sont à reprendre compte tenu des connaissances actuelles de physique : à quoi est due cette déviation ? Quelle est la valeur de cette déviation ? Existe-t-il réellement une déviation vers le sud ?

L'article de Georges Paturel qui suit présente une modélisation mathématique de la déviation vers l'est des corps tombant en "chute libre". Ces questions pourront être reprises ultérieurement.

*Koyré Alexandre: Études galiléennes ; Éditions Hermann, 1966*

*Koyré Alexandre: Études newtoniennes ; Éditions Gallimard 1968*

*Koyré Alexandre: Chute des corps et mouvement de la Terre ; Éditions Vrin 1973.*

*Newton Issac: Principia Christian Bourgeois ; Éditeur 1985.*

*Gapaillard Jacques: Et pourtant elle tourne ; Seuil 1993.*

*Galilée : Dialogue sur les deux grands systèmes du monde Points Sciences ; Seuil 2000.*

*BUP n° 842 mars 2002 Déviation vers l'est sans force de Coriolis, mais avec une calculette p. 523.*

*BUP n° 850 janvier 2003 Les preuves expérimentales des mouvements de la Terre p. 25*

*Reflets de la physique n° 17 janvier 2010 Petite histoire de la force de Coriolis p.18* ■