MUSÉE
D'HISTOIRE
DES SCIENCES
GENÈVE

PAR LA FORCE DES CHOSES !

Tomber, tourner, rouler

Catalogue d'exposition

muséum genève

Une institution
Ville de Genève

www.museum-geneve.ch

VILLE DE GENÈVE

Rédaction de la brochure	Stéphane Fischer, Laurence-Isaline Stahl Gretsch, Maha Zein
Photos	Gilles Hernot, Philippe Wagneur
Couverture	Cédric Marendaz, Philippe Wagneur
Mise en page	Corinne Charvet
Commissariat d'exposition	Stéphane Fischer, Laurence-Isaline Stahl-Gretsch
Relecture	Corinne Charvet, Alain Junod
Responsable de l'Unité Publics et Expositions	Hervé Groscarret
Directeur	Arnaud Maeder
Impression	Centrale municipale d'achat et d'impression de la Ville de Genève (CMAI)

Cette brochure est publiée en lien avec l'exposition *Par la force des choses : tomber, tourner, rouler,*
du 31 mai 2023 au 2 mars 2025

© Muséum Genève – 2023

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 2

1. Une petite histoire de la gravitation 3
   - 1.1 Plus c'est lourd, plus ça tombe vite ? 4
   - 1.2 Galilée et la chute des corps 5
   - 1.3 Newton, la gravitation en équation 11
   - 1.4 Einstein revisite la gravitation 20

2. Le pendule, instrument universel 21
   - 2.1 Le fil à plomb 21
   - 2.2 Le pendule, instrument scientifique 23
   - 2.3 Le pendule, étalon du temps 25
   - 2.4 Le pendule géant de Léon Foucault pour voir tourner la terre 25

3. Les gyroscopes 28

4 Les forces fondamentales 31

5 Bibliographie 33

6. La compréhension par le geste et l'expérience 34

7. Que la force soit avec vous : avant et après la visite de l'exposition (partie pédagogique) 37

INTRODUCTION

Des modèles de l'Antiquité aux expériences de Galilée, en passant par la formulation mathématique de Newton, la chute des corps interpelle les curieux : pourquoi est-ce que les objets tombent ? Pourquoi certains tombent-ils plus vite que d'autres ? Est-ce qu'ils tombent de la même façon sur Terre et dans l'espace ?

Si Galilée est le premier à formuler la loi de la chute des corps à l'aide d'un pendule et d'un plan incliné, c'est Newton qui explique que les corps tombent sur la Terre parce qu'ils sont attirés par le biais d'une force qu'il appelle la gravitation (du latin : *gravis*, lourd). Il démontre que cette force d'attraction est universelle. Elle s'applique aussi bien sur Terre que dans le ciel. Ainsi, la pomme qui tombe de son arbre est soumise à la même physique que la Lune qui gravite autour de notre planète. En parallèle, Huygens s'intéresse à ce qui tourne, à la force centrifuge, et applique le pendule de Galilée à la régularisation des horloges.

Au 19e siècle, gravitation et rotation se rejoignent. Le physicien français Foucault utilise d'abord un pendule – dispositif expérimental imaginé à l'origine par Galilée pour étudier la chute des corps –, puis un gyroscope pour démontrer que la Terre tourne sur elle-même.

Au début du 20e siècle, révolution ! Einstein supprime la gravitation. Dans son modèle de la relativité générale, tout n'est qu'affaire de courbure de l'espace-temps…

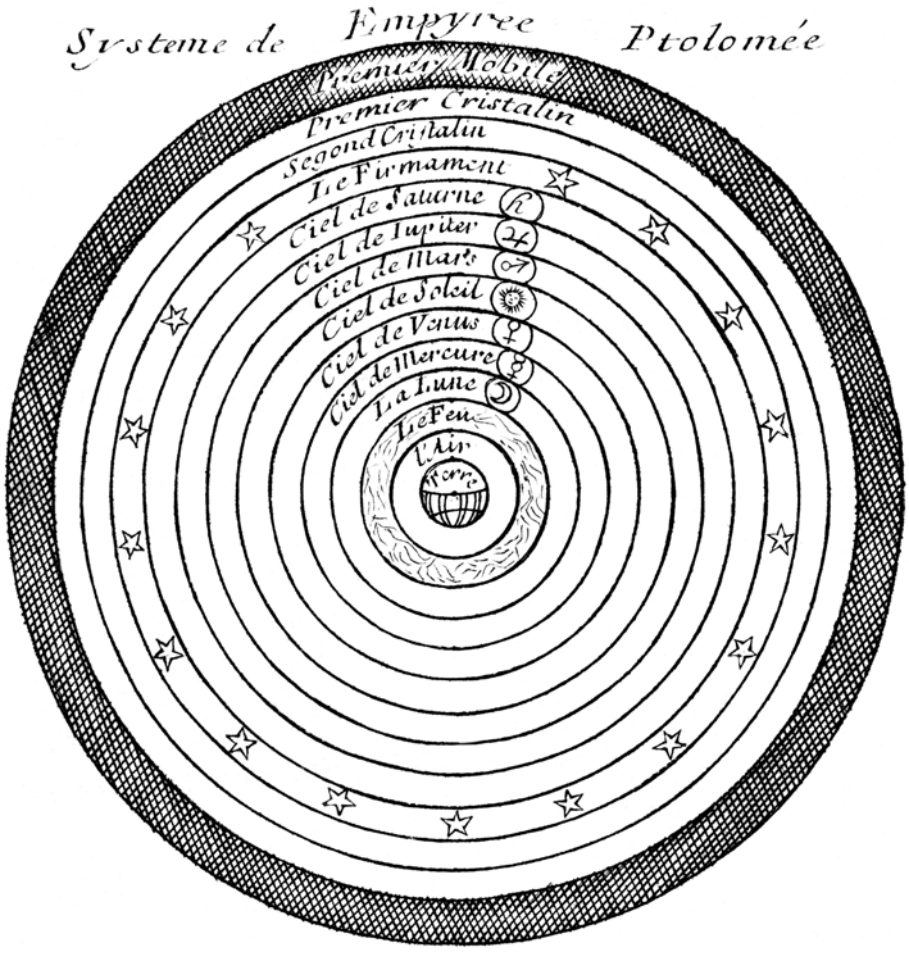
L'exposition invite à parcourir cette histoire de la gravitation en suivant la notion de force : une force appliquée à un objet le fait réagir. C'est donc à ce dialogue entre le mouvement et les modèles explicatifs qu'elle invite les visiteurs et visiteuses. Les gestes du présent sont ainsi relus avec les apports de l'histoire de la pensée humaine. Plans inclinés, pendules, gyroscopes et autres toupies en forment le cœur pour illustrer les forces qui font tomber, tourner ou rouler…

Rien de tel que des éléments interactifs pour comprendre un phénomène et passer un bon moment de science !

1. UNE PETITE HISTOIRE DE LA GRAVITATION

Phénomène physique très banal, la chute des corps a suscité l'intérêt des plus grands noms de la physique : Aristote, Galilée, Newton, Einstein…

Durant l'Antiquité, à la suite d'Empédocle, le philosophe grec Aristote (384-322 av. J.-C.), précurseur de la physique classique, propose une première explication de la chute des corps étroitement liée à sa vision cosmologique de l'Univers. Selon lui, l'Univers est une sorte d'emboîtements de sphères centrée sur la Terre. Celle-ci est entourée de plusieurs couches concentriques portant successivement les quatre éléments fondamentaux de la matière : la terre, l'eau, l'air et le feu, puis les principaux corps célestes : la Lune, le Soleil et les cinq planètes connues à l'époque. Le tout est encerclé par une dernière couche portant les étoiles fixes.



Le système géocentrique d'Aristote (dit de Ptolémée)
Nicolas Bion, L'usage des globes célestes et terrestres et des sphères suivant les différents systèmes du monde, *Paris, 1699*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences.

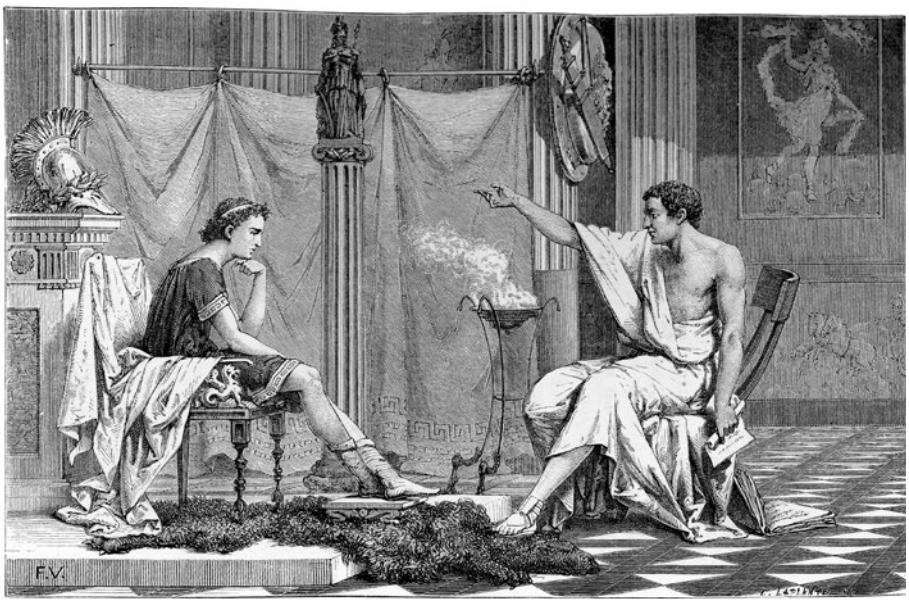
L'Univers d'Aristote comprend deux régions bien distinctes séparées par la Lune. Au-delà de notre satellite débutent les cieux, sièges d'inaltérabilité et d'incorruptibilité. Le mouvement naturel des corps célestes est le cercle, symbole géométrique de la perfection. Le mouvement circulaire ne connaît ni début ni fin. Il est éternel.

Sous la Lune se trouve le monde terrestre, constitué des quatre éléments, imparfait et corrompu. Si les corps terrestres restaient à leur place, le monde sublunaire serait au repos et ordonné comme les cieux. Malheureusement, le monde terrestre est sans cesse soumis à des changements brutaux qui tendent au désordre. Le mouvement de chute n'est qu'une tentative de remise à l'ordre, de rééquilibrage du monde.

1.1. PLUS C'EST LOURD, PLUS ÇA TOMBE VITE ?

Selon Aristote, dans le monde sublunaire, les corps ordinaires suivent naturellement un mouvement linéaire, soit vers le haut pour les corpuscules légers, soit vers le bas pour les plus lourds. Une grosse pierre tombe plus vite qu'un petit caillou. De plus, la vitesse du corps qui chute augmente lorsqu'il se rapproche de son lieu de destination : le centre de l'Univers.

Aristote remarque que la vitesse de chute dépend aussi de la résistance du milieu traversé. Une grosse pierre tombe moins vite dans l'eau que dans l'air. Il émet l'hypothèse que dans le vide où la résistance est nulle, la vitesse du corps qui tombe devrait être… infinie, voire instantanée. Ce qui est impossible selon le philosophe grec qui exclut ainsi l'existence du vide…



Aristote enseignant à Alexandre le Grand
Louis Figuier, Vies des savants illustres, *Paris, 1874*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

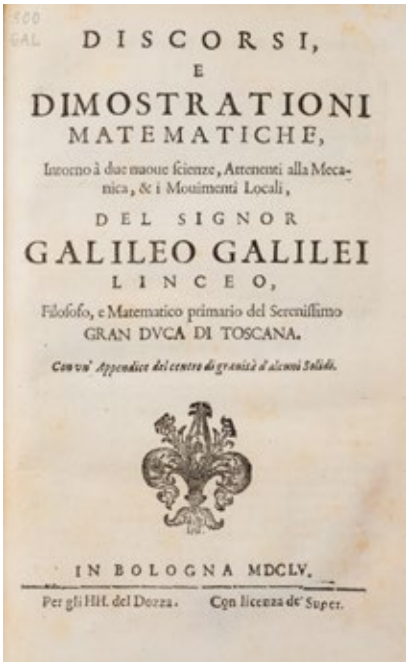
Aux yeux d'Aristote, deux autres raisons motivent son rejet du vide. Si celui-ci existait, les corps lourds et légers ne sauraient plus quelle direction suivre pour regagner leur lieu naturel et il y régnerait un grand désordre. Enfin, dans le vide, tous les corps tomberaient à la même vitesse. Ce qui est impossible selon la théorie d'Aristote soutenant que la résistance du milieu traversé est inversement proportionnelle à la masse du corps. Plus il est lourd, plus vite il tombera… Or dans le vide, cette résistance du milieu disparaît et tous les corps chuteraient à la même vitesse, ce qui est inimaginable pour le philosophe grec.

1.2. GALILÉE ET LA CHUTE DES CORPS

Pendant près de 2000 ans, la physique d'Aristote et sa vision géocentrique de l'Univers continueront d'être enseignées dans les universités et les collèges. Au tournant des 16e et 17e siècles, grâce à de nouvelles idées et au recours à l'expérience et à l'observation, le savant toscan Galilée (1564-1642) remet sérieusement en doute la conception aristotélicienne du monde. Durant l'hiver 1609 et 1610, il observe pour la première fois, à l'aide d'une lunette astronomique, que la Lune et le Soleil, deux corps célestes symbolisant la perfection, sont dotés l'une de cratères et l'autre de taches à sa surface. Derrière l'oculaire de sa lunette, Galilée découvre aussi que des satellites tournent autour de Jupiter qui n'est pourtant pas le centre du monde. Enfin, il met aussi en évidence les phases de Vénus, indiquant que la planète pourrait tourner autour du Soleil et non autour de la Terre.

Galilée n'en reste pas là. Il s'attaque aussi à la physique d'Aristote. Inspiré par les travaux d'autres physiciens du 16e siècle, il s'intéresse à la chute des corps. En 1604, il apporte une première définition du mouvement uniformément accéléré.

Galilée montre aux sénateurs de Venise les satellites de Jupiter
Louis Figuier, Vies des savants illustres, *Paris, 1874*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences


DISCORSI,
E
DIMOSTRATIONI
MATEMATICHE,
Intorno à due nuoue scienze, Attenenti alla Mecanica, & i Mouimenti Locali,
DEL SIGNOR
GALILEO GALILEI
LINCEO,
Filosofo, e Matematico primario del Serenissimo
GRAN DVCA DI TOSCANA.
Con vn' Appendice del centro di grauità d'alcuni Solidi.
IN BOLOGNA MDCLV.
Per gli HH. del Dozza. Con licenza de' Super.

Discours sur les deux sciences nouvelles
Page de titre d'une réédition des Discours *sur les deux sciences nouvelles de Galilée publiée en 1655 à Bologne*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

Il postule qu'un corps qui tombe voit sa vitesse augmenter par rapport à l'espace parcouru. Une erreur qu'il corrigera quelques années plus tard dans son célèbre ouvrage *Discours sur deux sciences nouvelles,* publié clandestinement en 1638 à Leyde, aux Pays-Bas, au crépuscule de sa vie. Il écrit qu'un corps en chute libre voit sa vitesse augmenter en fonction du temps écoulé et non plus de la distance.

Assigné à résidence dans sa villa d'Arcetri, près de Florence, suite à sa condamnation de 1633, Galilée profite de condenser dans un seul ouvrage la synthèse de tous ses travaux réalisés dans le domaine de la mécanique. Rédigé sous la forme de dialogues entre trois personnages : Salviati, le savant porte-parole de Galilée, Simplicio, le disciple d'Aristote et Sagredo, l'honnête homme qui cherche à comprendre la vérité, les *Dialogues* abordent à la fois des sujets comme la résistance des matériaux, la trajectoire des projectiles et surtout la chute des corps, domaine dans lequel Galilée démolit la thèse d'Aristote. Dans un premier temps, Galilée s'étonne qu'Aristote prétende que la vitesse de chute des corps dans un même milieu soit proportionnelle à leur poids. Autrement dit, qu'un corps pesant dix fois plus qu'un autre soit censé tomber dix fois plus vite. Galilée doute que le philosophe grec ait vérifié expérimentalement ses affirmations. « Mais moi qui en ai fait l'essai, je vous assure qu'un boulet d'artillerie pesant cent ou deux cents livres ou même davantage, ne précédera pas même d'une palme, en touchant terre, une balle de mousquet dont le poids n'excède pas une demi-livre, et cela après une chute commune de deux cents coudées… » (*Discours,* 107/p. 53)

Pour prouver qu'un corps lourd ne tombe pas plus vite qu'un corps léger, Galilée propose une démonstration rhétorique magistrale. Deux corps de masses différentes sont attachés ensemble et lâchés depuis une certaine hauteur. Selon la théorie aristotélicienne, les deux corps unis pèsent plus lourd et tombent plus vite. Mais en suivant toujours la même logique, le corps léger, dans sa chute, freine le corps lourd : par conséquent, les deux corps attachés tombent moins vite. Galilée en conclut que les deux corps tombent à la même vitesse indépendamment de leur poids.

Se basant toujours sur les affirmations d'Aristote, Galilée se livre aussi à des expériences de chute des corps dans différents milieux : il constate que les écarts entre deux corps de masses différentes sont plus importants dans les milieux les plus denses. Parfois, les corps ne coulent carrément pas et restent à la surface du liquide. « Dans le vif argent, l'or non seulement tombe vers le fond plus rapidement que le plomb, mais il est le seul à descendre ; tous les autres corps, métaux et pierres, montent vers la surface pour y flotter, alors que dans l'air des boules d'or, de plomb, de cuivre, de porphyre, ou de toute autre substance, auront des vitesses si voisines qu'une boule d'or, après une chute de cent coudées [environ 54 m, soit la hauteur de la tour de Pise…], ne précédera pas de quatre doigts [8 cm] une boule de cuivre… C'est alors, considérant ces faits, qu'il me vint à l'esprit que si l'on supprimait totalement la résistance du milieu, tous les corps descendraient à la même vitesse… » (Galilée, *Discours,* p. 61).

Contrairement à Aristote qui nie son existence, Galilée se sert d'un vide purement conceptuel pour y mener des expériences de pensées et tenter de mieux décrire un phénomène physique bien réel.

Marteau d'eau
MHS 2516
Verre, eau, 19e siècle

Tube en verre sous vide rempli d'eau. Lorsque l'on retourne le tube, l'eau frappe l'extrémité inférieure du tube en émettant un son analogue à un corps solide heurtant la paroi en verre.
Sur la Terre, la résistance de l'air à la chute des corps se remarque aussi sur les liquides. Dans l'air ambiant, un liquide qui tombe se divise en formant de petites gouttes. Dans le vide, au contraire, le liquide tombe comme une masse solide.

Pompe à vide
MHS 2837
Laiton, fonte, verre, 19e siècle

Le vide sous la cloche en verre se fait au moyen de deux pistons coulissant dans des cylindres en verre qui aspirent et refoulent l'air sous la cloche. Ce type de pompe était relativement courant au 19e siècle.

Dans l'impossibilité technique de produire du vide, les premières pompes à vide n'apparaissant que durant la seconde moitié du 17e siècle, Galilée en est réduit à concevoir diverses expériences dans l'air ambiant pour étudier la chute des corps. Plutôt que d'observer et de comparer la chute de différents corps, il imagine un dispositif permettant de reproduire une série de chutes successives : c'est le pendule bifilaire. Deux sphères de liège et de plomb (la boule de plomb est cent fois plus lourde que celle en liège) sont accrochées chacune à deux fils longs de 2,5 m de manière à ce que leur plan d'oscillation demeure constant. Les deux boules sont écartées de la verticale et lâchées simultanément. Après une centaine de battements, Galilée constate que les deux boules conservent la même période d'oscillation, même si celle de la boule en liège est fortement amortie à cause de la résistance de l'air.

Pendule bifilaire
Musée d'histoire des sciences

S'inspirant du pendule bifilaire décrit par Galilée dans ses Discours, *l'équipe scientifique du musée a reproduit un dispositif similaire dans la salle de médiation au sous-sol du bâtiment. Une sphère en acier (1565 g) et une boule de pétanque en plastique (31 g) de taille identique sont suspendues chacune par deux fils de pêche de 2,4 m de long accrochés au plafond. En lâchant simultanément les deux corps, on observe que leur période d'oscillation demeure constante pendant 50 à 60 battements, après quoi la boule en plastique finit par s'immobiliser, freinée par le frottement.*

Tube de Newton
MHS 546
Collection Pictet
Laiton, verre, acier, plume

Expérience faussement attribuée à Newton destinée à démontrer la loi de la chute des corps. Une pièce de monnaie et une plume sont introduites dans un tube en verre scellé à une extrémité et muni d'un robinet en laiton à l'autre. Lorsque l'on évacue l'air contenu dans le tube en reliant le robinet à une pompe à vide et qu'ensuite on retourne brusquement le tube, la plume et la pièce de monnaie chutent simultanément sans que l'un des deux corps prenne de l'avance sur l'autre. Si l'on répète l'expérience en laissant entrer de l'air dans le robinet, la pièce de monnaie tombe plus vite que la plume.

1.2.1. Le plan incliné

Poursuivant son étude de la chute des corps, Galilée fabrique un plan incliné en bois de 660 cm de long muni d'un canal dans lequel il fait rouler une bille en bronze. De cette manière, la chute est ralentie, ce qui facilite les observations et surtout les mesures de temps. A l'époque de Galilée, les chronomètres n'existaient pas. Pour mesurer le temps, le savant toscan compte les battements de son pouls ou pèse l'eau qui s'est écoulée d'un seau percé durant une période déterminée.

Durant ses expériences, Galilée mesure d'abord la durée totale de la chute de la bille le long du plan incliné, puis il la compare à la durée nécessaire à la bille pour parcourir « la moitié ou les deux tiers, ou les trois quarts, ou toute autre fraction » (Galilée, *Discours,* p. 144). A l'issue de ces mesures répétées une bonne centaine de fois, Galilée parvient à la conclusion qu'en négligeant les frottements de l'air, « les espaces parcourus par les billes sont entre eux comme les carrés des temps et cela, quelle que soit l'inclinaison du plan » (Galilée, *Discours*, p. 144).

Galilée met ainsi en évidence que la chute des corps est un mouvement uniformément accéléré. Il stipule (à défaut de pouvoir véritablement le démontrer) que dans le vide, tous les corps tombent de la même manière. La vitesse qu'ils acquièrent est proportionnelle à la durée de chute, quel que soit leur poids. Ce qui est en totale contradiction avec la théorie du mouvement d'Aristote qui affirme que la vitesse de chute dépend avant tout de la masse du corps, le fameux « Plus c'est lourd, plus ça va vite »…

Une question fondamentale reste cependant en suspens : qu'est-ce qui fait chuter les corps ? Galilée reste très vague dans sa réponse. Il invoque « un principe intrinsèque que possèdent par nature tous les corps pesants pour se mouvoir vers le centre commun des graves, c'est-à-dire notre globe terrestre, d'un mouvement continuellement et toujours également accéléré… » (*Discours,* 118/p. 62)

Plan incliné
Musée d'histoire des sciences

Pour ses démonstrations publiques, le MHS a fait réaliser par l'équipe de menuisiers de Muséum Genève un plan incliné similaire à celui décrit par Galilée dans ses Discours. Le plan repose sur deux pieds mobiles dont l'un est réglable en hauteur. Un canal creusé dans la partie supérieure du plan permet de faire rouler des billes en acier ou en verre d'un diamètre de 20 à 25 mm. Un mètre ruban est collé sur une face pour pouvoir mesurer les distances parcourues. Inspiré par un modèle conservé au Musée Galileo de Florence, le plan incliné du MHS peut être muni de clochettes amovibles disposées le long du canal et qui tintent au passage des billes. Ces clochettes remplacent les cordes en boyau de luth que Galilée plaçait à travers le canal de chute pour entendre les billes rouler.

Le mouvement parabolique

Dans la quatrième journée de ses *Dialogues*, Galilée étudie en détail le mouvement des projectiles très mal décrit à son époque. Il lance une bille sur une table à une certaine vitesse pour la faire tomber à son extrémité. Il observe que la bille suit une trajectoire courbe parabolique.

Galilée explique que « … le mobile que j'imagine doué de gravité, parvenu à l'extrémité du plan et continuant sa course ajoutera à son précédent mouvement uniforme et indélébile la tendance vers le bas que lui confère sa gravité… ». Il en déduit un théorème stipulant « qu'un projectile qu'entraîne un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas, décrit au cours de son déplacement une trajectoire semi-parabolique »… Autrement dit, que la trajectoire du projectile est la combinaison d'un mouvement horizontal à vitesse constante et d'un mouvement vertical dirigé vers le bas à vitesse variable.

Quelques années plus tard, Newton démontrera que la Lune tourne autour de la Terre en combinant un mouvement rectiligne et une chute parabolique continue en direction de notre planète. Le savant anglais calcule aussi que si l'on veut « satelliser » une pomme autour de la Terre, il faudrait la lancer à une vitesse horizontale de 28 400 km/h.

Plan incliné à paraboles
Musée d'histoire des sciences
Cet appareil est une réplique d'un dispositif expérimental fabriqué au 18e siècle pour illustrer le mouvement combiné découvert par Galilée. Une bille est posée au sommet du plan incliné. Elle quitte l'extrémité du plan à une vitesse horizontale qui demeure constante pendant la chute, comme le démontrent les intervalles horizontaux égaux entre les quatre anneaux traversés par la bille sur sa trajectoire. Les effets de la force de gravitation sont visualisés par l'accroissement des écarts verticaux entre les quatre anneaux.

1.3. NEWTON, LA GRAVITATION EN ÉQUATION

L'année de la mort de Galilée naît un autre génie : Isaac Newton (1642-1727), physicien anglais qui, poursuivant l'œuvre entamée par le savant toscan, découvre que le fameux principe intrinsèque qui fait chuter les corps est en réalité une force extérieure présente aussi bien sur Terre que dans l'espace : la gravitation ou attraction universelle.

La légende raconte que c'est en 1666, en regardant une pomme tomber d'un arbre, que Newton aurait eu la révélation qui l'a amené à formuler sa fameuse loi de l'attraction universelle. Tous les corps s'attirent entre eux, que ce soit sur la Terre ou dans le ciel. La pomme tombe parce qu'elle est attirée au sol par la force de gravitation terrestre. Mais la pomme exerce aussi une force d'attraction (négligeable) sur la Terre. Si la Lune tourne autour de la Terre, c'est parce qu'elle est attirée par notre planète. En retour, la Lune exerce aussi une force d'attraction sur la Terre qui se manifeste par le phénomène naturel des marées…

Isaac Newton
Louis Figuier, Vies des savants illustres, *Paris, 1874*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

La loi de la gravitation universelle

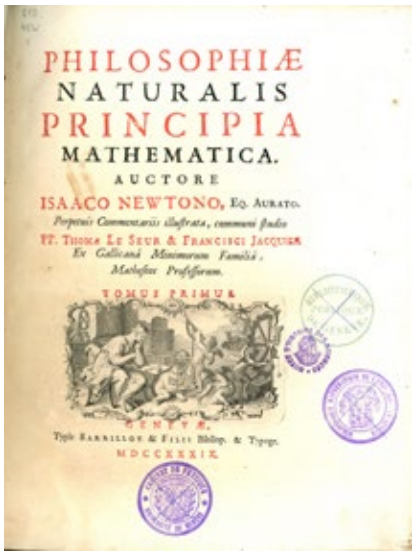
Après avoir étudié la course de la planète Mars pendant plus de huit ans, l'astronome allemand Johannes Kepler (1571-1630) démontre géométriquement que sa trajectoire ainsi que celles des autres planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers. Kepler complète cette première loi dite des orbites par deux autres lois : la loi des aires (des aires égales sont balayées dans des temps égaux) et la loi des périodes qui lie le carré de période des révolutions des planètes au cube de leurs distances au Soleil. C'est en se basant sur cette dernière loi qu'Isaac Newton parviendra à formuler mathématiquement sa fameuse loi de la gravitation. Tous les corps sur la Terre comme dans l'espace sont attirés entre eux par une force universelle, la gravitation. Cette force est proportionnelle à leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. La formule mathématique qui la décrit est la suivante

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

F : force gravitationnelle
G : constante gravitationnelle
M_1 : masse du premier corps
M_2 : masse du second corps
d : distance entre les deux corps

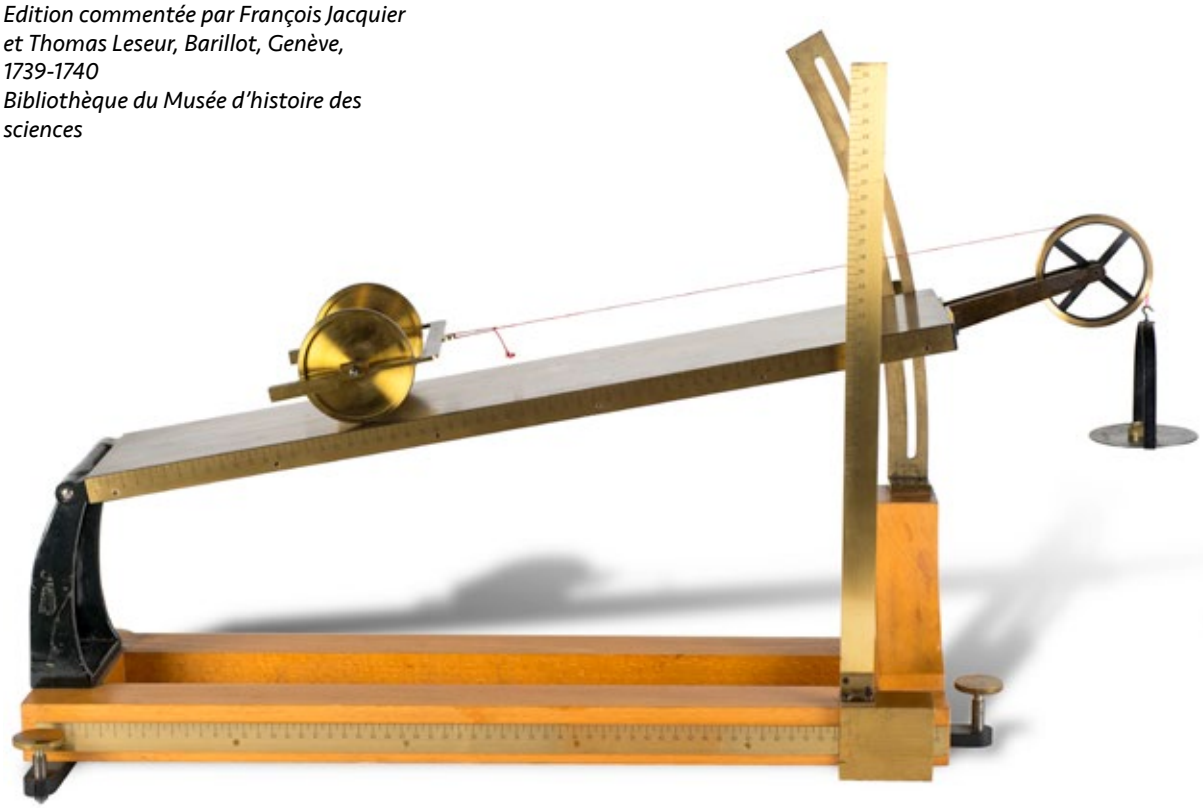
Compas à ellipses
MHS 614
Collection Pictet
Laiton, 19e siècle

Aussi appelé ellipsographe, cet instrument permet de tracer une ellipse d'un seul tenant. La verge du compas est munie de deux coulisseaux qui glissent dans deux rainures perpendiculaires l'une à l'autre.


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.
AUCTORE
ISAACO NEWTONO, Eq. Aurato.
Perpetuis Commentariis illustrata, communi studio
PP. Thomæ Le Seur & Francisci Jacquier
Ex Gallicanâ Minimorum Familiâ,
Matheseos Professorum.
TOMUS PRIMUS
GENEVÆ
Typis Barrillot & Filii Bibliop. & Typogr.
MDCCXXXIX.

En 1687, Newton publie *Philosophiae naturalis principia mathematica (principes mathématiques de la philosophie naturelle*), un ouvrage qui deviendra un monument de la physique classique. A côté de la gravitation universelle, le physicien anglais y énonce, entre autres, trois lois dites du mouvement tout aussi fondamentales. La première (ou principe d'inertie) stipule que tout corps non soumis à l'action d'une force est soit au repos, soit en déplacement selon un mouvement rectiligne uniforme. La deuxième loi souligne que toute force exercée sur un objet provoque une accélération qui sera d'autant plus faible que la masse de l'objet est grande. Enfin, la troisième loi (action-réaction) précise que les actions de deux corps l'un contre l'autre sont toujours égales et de sens contraire.

Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*
Edition commentée par François Jacquier et Thomas Leseur, Barillot, Genève, 1739-1740
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences



Plan incliné
MHS 2616
Acier, laiton, SIP, fin 19e siècle

Dispositif permettant de démontrer l'équilibre d'une masse sur un plan incliné selon la formule F = P sinα, avec P le poids du chariot ; F est la force qui tend le fil, égale au poids du plateau et α l'angle d'inclinaison du plan incliné.
L'angle du plan incliné peut être modifié à l'aide d'une vis autobloquante. On place sur le plan incliné un chariot à quatre roues attaché par un fil qui passe par une poulie située à l'extrémité supérieure du plan, et qui est relié à un plateau suspendu. On ajoute des masses dans le plateau jusqu'à ce que le chariot soit en équilibre.

Avec ses trois lois et le principe de la gravitation universelle, Newton offre au monde les clés de la mécanique terrestre et céleste. Grâce à elles, la trajectoire de tout corps sur la Terre et dans l'espace peut désormais être décrite et prédite en détail.

Après quelques années (voir décennies…) initiales de méfiance et de rejet surtout du côté de la France, adepte de la physique cartésienne, la mécanique newtonienne finira par s'imposer dans le monde entier. Il faut relever la contribution d'Emilie du Châtelet, mathématicienne et amie de Voltaire, qui traduisit Newton de latin en français.

Planétaire Adams
MHS 818
Laiton, acier, ivoire, Adams, Londres, 18e siècle

Construit au 18e siècle, le planétaire, ou orrery, est un instrument de démonstration qui représente le système solaire et le mouvement des principales planètes. Le Soleil est placé au centre. Une manivelle permet de mettre en mouvement, par le biais d'engrenages et de disques mobiles, la Terre, la Lune, Mercure, Vénus et Mars.
Chef-d'œuvre mécanique, ce planétaire symbolise aussi la puissance de la mécanique newtonienne. En connaissant la position des corps célestes et les forces agissant sur eux, on est en mesure de prédire leurs trajectoires et leurs mouvements futurs.

Poids et masse

Dans le langage courant, le poids et la masse sont deux termes souvent utilisés de manière indistincte, contrairement à la physique où la distinction est très claire. La masse désigne la quantité de matière d'un objet et s'exprime en kilos. L'inertie d'un objet dépend de sa masse. Plus elle est grande, plus il faut appliquer de force pour déplacer l'objet ou le freiner s'il est en mouvement.

Le poids, qui s'exprime en newtons, dépend de la gravité. Il désigne la force gravitationnelle qui attire un corps pesant vers le sol. Elle dépend de l'astre sur lequel on se trouve. Sur la Lune, où la force de gravité est six fois moins élevée que sur la Terre, on pèse six fois moins lourd. Au contraire, sur Jupiter, on pèse 2,5 fois son poids terrestre à cause d'une force d'attraction plus élevée.

La balance romaine
MHS 2849
Acier, 19e siècle

Une balance romaine permet de mesurer la masse d'un objet. Le résultat s'obtient en déplaçant des poids mobiles le long d'un bras gradué jusqu'à l'équilibre de celui-ci. Bien que l'on compare ici des forces, le résultat obtenu ne dépend pas de la gravité et peut s'exprimer en kilos. Il est le même sur la Terre, sur la Lune ou sur Jupiter.

Le peson
MHS 403
Acier, laiton, 19e siècle

Pour connaître le poids d'un objet (ou toute autre force), on peut utiliser un peson, sorte de balance constituée d'un ressort qui s'étire sous l'effet du poids à peser. La déformation du ressort entraîne la rotation d'une aiguille sur un cadran gradué indiquant le poids en kilogrammes. Cette unité est historique, mais impropre ; ce sont en fait des kilogrammes-force correspondant à environ 9,81 newtons. La valeur lue dépend de la gravité.
Les pèse-personnes traditionnels à ressort fonctionnent selon le même principe.

Centre de gravité

En physique, le centre de gravité est le point d'application de la résultante des forces de gravité et de pesanteur subies par un corps solide. Archimède définissait le centre de gravité comme étant le point « en lequel tout le poids du corps peut être considéré comme concentré ». Un corps est stable si la verticale de son centre de gravité tombe à l'intérieur de sa zone d'appui. Sinon, il se retrouve en déséquilibre et il bascule.

Cylindre lesté sur plan incliné
MHS 1969
Bois, acier, 19e siècle

Chaque objet possède un centre de gravité où s'applique la résultante des forces de gravité qui s'exercent sur ce corps. Un corps est stable lorsque son centre de gravité est au plus bas. Dans cette expérience, on modifie le centre de gravité d'un cylindre en bois (normalement situé au centre) en introduisant une masse métallique dans son bord. On place le cylindre en bas du plan en veillant à ce que le lest demeure sur le bord supérieur. On lâche le cylindre et on observe que celui-ci remonte la pente. Le cylindre se stabilise lorsque le lest se retrouve le plus bas possible.

Double cône
MHS 1955
Bois, 19e siècle

Dispositif expérimental classique pour illustrer le fait que le point d'équilibre d'un corps correspond au minimum de hauteur de son centre de gravité.
On pose le double cône sur la partie basse du plan incliné et on observe que celui-ci remonte la pente en tournant, son centre de gravité étant au plus bas lorsque le cône est au sommet de la pente.

La danseuse
La danseuse est reliée par une tige métallique à un lest placé sous elle et sous le fil. Ce lest abaisse au maximum le centre de gravité de l'ensemble, conférant ainsi un équilibre stable à la danseuse.

Le rameur
Lorsqu'il est poussé, le bateau se met à rouler bord sur bord. Après quelques oscillations, il revient spontanément à l'horizontale grâce au lest (quille) placé sous son point d'appui, qui le ramène à l'équilibre.

1.3.1. La gravitation, un artifice mathématique

Un détail restait cependant mystérieux dans la théorie de la gravitation universelle, et Newton lui-même en était conscient. Quelle est la nature de cette force invisible, pratiquement instantanée, qui se manifeste entre deux corps ? Un esprit subtil ? Un agent matériel ou immatériel ?

Isolée, la Lune serait animée d'un mouvement rectiligne uniforme, elle filerait tout droit dans l'Univers. Or elle tourne autour de la Terre. Il faut donc postuler l'existence d'une force qui la retient sur son orbite, qui agit comme la lanière qui retient la pierre dans la fronde quand on la fait tourner. Newton suggère que cette force est la gravitation, qui joue alors le rôle de force centripète (voir encadré). La nature profonde de cette force est inconnue, c'est une sorte d'artifice mathématique, mais son existence est démontrée par exemple par la chute d'une pomme. Dans le modèle de Newton, la Lune est en chute perpétuelle sur la Terre. Cette chute se combine avec son mouvement initialement rectiligne pour donner un mouvement le long d'une trajectoire elliptique quasi circulaire. Cette implication est établie rigoureusement à l'aide du calcul infinitésimal dont Newton est justement l'un des fondateurs.

La force centrifuge : une pseudo-force !

Prenons l'exemple du train qui prend un virage à grande vitesse. Les passagers sont projetés contre un côté du wagon vers l'extérieur. A leurs yeux, c'est un effet de la force centrifuge (du latin : *fugere*, fuir, s'enfuir), la même force qui se manifeste lorsqu'on est éjecté d'un carrousel qui tourne à grande vitesse. Pour un observateur extérieur immobile, cette pseudo-force centrifuge n'existe pas ; les passagers ont simplement conservé leur direction et leur vitesse initiales avant de heurter la paroi. La force centrifuge, aussi appelée force d'inertie, n'existe que pour un observateur situé dans un référentiel en rotation (donc accéléré).

La force centripète

La force centripète (du latin : *petere*, gagner, aller vers) est la force qui, quelle que soit son origine, maintient les objets sur leur orbite en les attirant vers le centre. Si l'on fait tourner autour de soi une boule accrochée par une ficelle, elle décrit un cercle. Vu de notre référentiel galiléen (immobile ou se déplaçant à vitesse constante), la boule reste sur sa trajectoire grâce à la force centripète qui est fournie par la tension du fil. Si le fil se casse, il n'y a plus de force et la boule part tout droit par inertie.

Appareil pour visualiser les effets de la force centrifuge
MHS 2528
Acier, fonte, cuir, Phywe, Allemagne, 20e siècle

Dispositif destiné à mettre en évidence divers effets de la force centrifuge. Une poulie motrice (activée manuellement) entraîne par le biais d'une courroie une autre poulie sur laquelle peuvent être placés différents accessoires.

1) Les effets de la force centrifuge sur la forme de la Terre
La Terre est représentée par un modèle comprenant plusieurs rubans verticaux en acier (les méridiens) enroulés en cercle et fixés aux extrémités d'une tige métallique. Lorsque le dispositif est mis en rotation, les rubans se déforment et donnent ainsi à la Terre la forme d'un ellipsoïde aplati aux pôles.

2) Régulateur à boules de Watt
Inventé par James Watt, le régulateur à boules est un dispositif mécanique qui permet de stabiliser la vitesse de rotation d'une machine à vapeur. Le régulateur comprend deux boules métalliques fixées aux extrémités d'un pantographe dont la partie supérieure est reliée par un levier à la vanne d'admission de vapeur de la machine. Lorsque le régulateur est mis en rotation, l'effet centrifuge écarte les deux boules de l'axe et fait descendre le haut du pantographe, ce qui entraîne la fermeture progressive de la vanne d'admission.

Centrifugeuse
MHS 1695
Aluminium, fonte, IKA, Allemagne, 20e siècle

Petite centrifugeuse de table à deux éprouvettes. Cet appareil motorisé utilise la force centrifuge pour séparer des liquides de densités différentes.

Corpuscules « ultramondains » et pesanteur

Astronome, géomètre, et physicien genevois, Nicolas Fatio de Duillier (1664-1753) présente en 1690, à la Royal Society de Londres, un mémoire intitulé *De la Cause de la pesanteur*, dans lequel il tente de trouver une explication mécanique à cette force de gravitation dont la nature profonde laissait Newton perplexe, bien qu'il ait été le premier à l'énoncer…

Nicolas Fatio de Duillier (1664-1753)
Wikipedia

Selon Fatio, la matière comprend davantage de vide que de plein. Ce vide est parcouru par un nombre considérable de corpuscules, sortes de particules submicroscopiques imperceptibles, circulant dans tous les sens à des vitesses très élevées. Lorsque deux corps se trouvent en présence, ils forment chacun une sorte de bouclier qui met l'autre à l'abri des particules. Comme l'action des particules est moins forte dans la région intermédiaire, les deux corps sont naturellement poussés l'un vers l'autre par une force qui, comme la surface de l'ombre portée, est inversement proportionnelle au carré de la distance !

Georges-Louis Le Sage (1724-1803)
Wikipedia

La théorie de Fatio sur la cause de la pesanteur sera reprise un siècle plus tard par un autre mathématicien et physicien genevois, Georges-Louis Le Sage (1724-1803). En 1761, dans son Essai de chimie mécanique, *il développe sa doctrine des corpuscules « ultramondains » basée en partie sur les principes énoncés par Fatio, à la différence que ces corpuscules ne sont plus élastiques et qu'ils se déplacent à une vitesse fort supérieure à celle de la lumière.*
Cette théorie ingénieuse sera finalement réfutée sur la base d'arguments thermodynamiques. Les chocs supposés à l'origine de l'attraction devraient donner lieu à un échauffement qui n'est pas observé.

De la relativité de la vitesse

Durant sa carrière mouvementée, Galilée était souvent confronté aux critiques de ses adversaires qui lui reprochaient de ne pas apporter de preuve formelle quant au mouvement présumé de la Terre tel qu'il était censé se produire dans un système héliocentrique. Si la Terre se déplace, on devrait ressentir les effets de la vitesse. Un corps lâché depuis le sommet d'une tour devrait tomber non pas à son pied, mais en arrière de celle-ci. Ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

Dans son ouvrage *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde* paru en 1632, Galilée explique qu'il est impossible de déceler le mouvement de la Terre depuis notre planète du fait que celui-ci s'effectue à vitesse constante. Pour Galilée, la vitesse est une notion relative. Il l'illustre par l'exemple d'un bateau. Enfermons-nous dans l'une de ses cabines quand il est amarré au port (donc à l'arrêt) pour y mener différentes expériences. Lâchons des mouches et des papillons et regardons-les voler dans toutes les directions. Munissons-nous d'un bocal rempli d'eau dans lequel on introduit des poissons. Ceux-ci nagent indifféremment de tous les côtés. Depuis une table, vidons un petit seau goutte à goutte dans un récipient placé au-dessous au sol. Lançons une balle à un ami. Nous n'avons pas besoin de la lancer plus fort dans une direction que dans l'autre. Répétons les expériences quand le navire se déplace à n'importe quelle vitesse pourvu que celle-ci demeure constante. On ne constate aucun changement, les insectes continuent à voler dans tous les sens, les poissons à nager normalement dans leur bocal, les gouttes d'eau de tomber verticalement dans le seau, et vous pouvez continuer à lancer la balle à votre ami dans toutes les directions sans remarquer de différence.

L'exemple du bateau de Galilée peut être appliqué aujourd'hui à l'avion ou aux trains à grande vitesse. Les lois de la mécanique demeurent les mêmes dans tous les référentiels en mouvement uniforme. Aucune expérience faite à l'intérieur ne permet de déterminer si votre véhicule est à l'arrêt ou en déplacement tant que celui-ci s'effectue de manière uniforme. Dans le cadre de sa théorie de la relativité restreinte formulée en 1905, Einstein étendra le postulat de Galilée à toutes les lois de la physique, qu'elles soient mécaniques, électriques, magnétiques ou optiques…

Cette notion de relativité de la vitesse énoncée par Galilée rejoint ce que Newton formule dans sa première loi, à savoir que l'état naturel de tout corps est soit le repos, soit le mouvement uniforme en ligne droite. Tant qu'un corps se déplace à vitesse constante, il ne subit aucune force.

Par contre, s'il freine, accélère ou change de direction, cela signifie qu'il est soumis à une force extérieure : gravitation, frottement, etc. Par exemple, lorsqu'un train lancé à vitesse constante freine brutalement, les passagers sont projetés vers l'avant sous l'effet de leur inertie. Vus par un observateur extérieur immobile, les passagers continuent de se déplacer vers l'avant comme s'ils n'avaient subi aucune force. Seuls le train et les sièges semblent avoir été freinés par une force opposée au sens de direction du train. Le train en cours de freinage n'est plus un référentiel galiléen.

Page de titre du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* publié par Galilée en 1632
Wikipedia

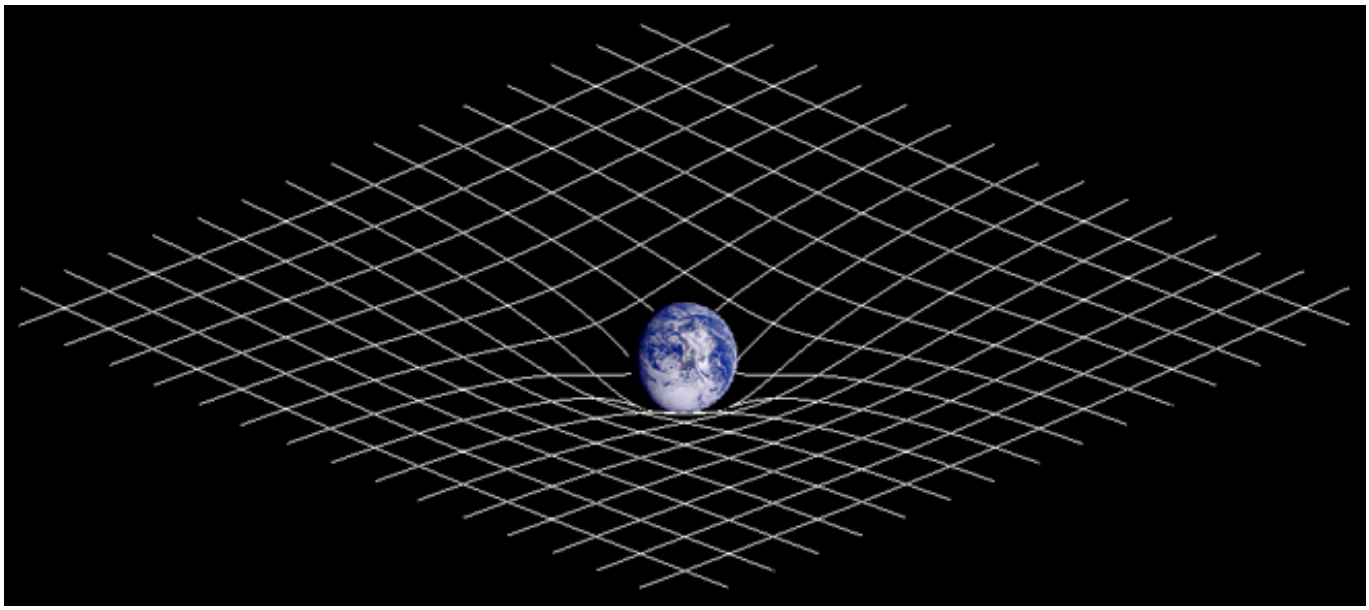
Albert Einstein, employé de l'Office suisse des brevets à Berne, vers 1905
Musée historique de Berne / Wikipedia

1.4. EINSTEIN REVISITE LA GRAVITATION

Au début du 20e siècle, la force de gravitation de Newton est mise à mal par un autre génie de la physique, Albert Einstein (1879-1955). Dans le cadre de sa théorie de la relativité générale publiée en 1915, il affirme, entre autres, que la gravitation résulte d'une déformation locale de l'espace-temps, une représentation mathématique de notre univers constitué de trois dimensions spatiales et d'une coordonnée temporelle.

Très difficile à appréhender par les profanes, l'espace-temps d'Einstein est souvent représenté par l'image d'une membrane de caoutchouc tendue sur laquelle on dépose une boule de pétanque – un Soleil imaginaire – qui la creuse localement. Si on lance une bille (la Terre) vers le creux, sa trajectoire, à l'origine linéaire, va s'incurver et épouser la forme du creux. Elle suit une trajectoire courbe nommée géodésique. C'est ainsi qu'Einstein conçoit la gravité. Exit la force de gravitation de Newton qui attire la planète vers le Soleil. Pour Einstein, la planète est piégée par le « creux » de l'espace-temps causé par la masse du Soleil. Si la boule que l'on place sur la membrane est de plus en plus lourde, elle va s'enfoncer dans la toile en la creusant toujours davantage. Il vient un moment où aucun objet, y compris la lumière, ne peut sortir de ce champ gravitationnel une fois happé : c'est alors un « trou noir ».

Le concept d'espace-temps formulé par Einstein est aujourd'hui indispensable pour appréhender des phénomènes cosmiques. A notre échelle, il résout une énigme : la masse pesante, source de la gravitation, devient formellement identique à la masse inerte, cause de l'inertie. Leur égalité a été vérifiée à un milliardième de millionième près (10^{-15}). Cependant, la gravitation de Newton reste largement utilisée en physique pour expliquer la majorité des phénomènes survenant à notre échelle.



La courbure de l'espace-temps, selon Einstein
Wikipedia

2. LE PENDULE, INSTRUMENT UNIVERSEL

Entraîné par la gravitation, le pendule a suscité l'intérêt de nombreux physiciens. Galilée et Newton s'en sont servis pour vérifier les lois de la chute du corps et de la conservation de l'énergie. Huygens l'a utilisé pour fabriquer la première horloge à balancier. Au milieu du 19e siècle, le Français Léon Foucault construit un pendule géant pour voir tourner la Terre.

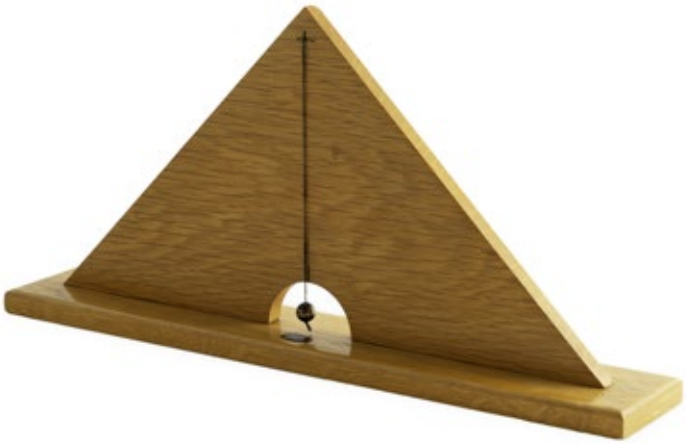
Fil à plomb
MHS 1269
Plomb, fil

2.1. LE FIL À PLOMB

Déjà utilisé dans l'Antiquité, le fil à plomb, simple fil lesté par un corps pesant, est probablement l'un des plus anciens instruments inventés par l'homme. Son utilité est d'indiquer la verticale d'un lieu, c'est-à-dire la direction de la force de gravité. Les maçons et les charpentiers s'en servent pour s'assurer de la verticalité de leurs murs. En géodésie, le fil à plomb suspendu sous le trépied d'un théodolite indique l'aplomb, le point de référence de la station.

Quadrant géométrique
MHS 750
Bois, papier, 19e siècle (?)

Version artisanale d'un quadrant géométrique destiné à mesurer des hauteurs. Après avoir pointé l'objet à mesurer, on relève le résultat indiqué par le plomb sur l'échelle de mesure. On obtient alors la hauteur en multipliant le résultat de la visée par la distance d'observation exprimée en décamètres.



Niveau de maçon
MHS 2527
Bois, plomb

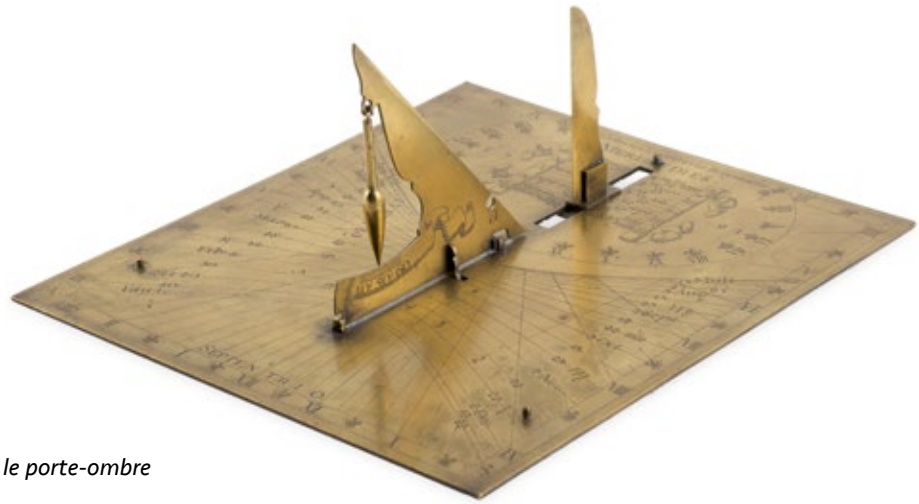
Châssis en bois triangulaire muni d'un fil à plomb. Après avoir posé la base du triangle sur une surface, on vérifie son horizontalité en s'assurant que le plomb marque la graduation médiane.

Cadran solaire équatorial
MHS 1294
Laiton, Rugendas, Augsburg, 18e siècle

Ce type de cadran solaire est doté d'une boussole pour l'orienter correctement dans la direction nord-sud et d'un petit fil à plomb pour assurer son horizontalité.

Cadran solaire de hauteur
MHS 1895
Carton, papier, Guiot, Paris, 18e siècle

L'heure est indiquée par la position d'une petite perle (coulissant le long du fil à plomb) sur l'une des lignes horaires du cadran.



Cadran solaire horizontal et analemmatique
MHS 1890
Laiton, Engelbrecht, Bohème, fin 18e siècle
Le fil à plomb est incorporé dans le style-axe, le porte-ombre de l'instrument.

2.2. LE PENDULE, INSTRUMENT SCIENTIFIQUE

C'est à Galilée que revient le mérite de s'être inspiré du fil à plomb pour concevoir un nouvel instrument pour l'étude de la chute des corps : le pendule (*voir chapitre 1.2. La chute des corps, p. 8)*.

Au cours de ses expériences, Galilée découvre qu'un pendule conserve toujours la même période d'oscillation, quelle que soit son amplitude, affirmation qui sera tempérée par la suite.

Il observe aussi que la période d'oscillation d'un pendule ne dépend pas de sa masse, mais uniquement de la longueur du fil de suspension. Ce qu'il formalise dans la loi suivante : « … quant aux temps d'oscillation des mobiles suspendus à des fils de différentes longueurs, ils ont entre eux même proportion que les racines carrées des longueurs de ces fils, ce qui revient à dire que les longueurs sont entre elles comme les carrés des temps… » *(Discours* 139-140, p. 78*)*.

Dispositif expérimental pour vérifier les lois du pendule formulées par Galilée
Musée d'histoire des sciences

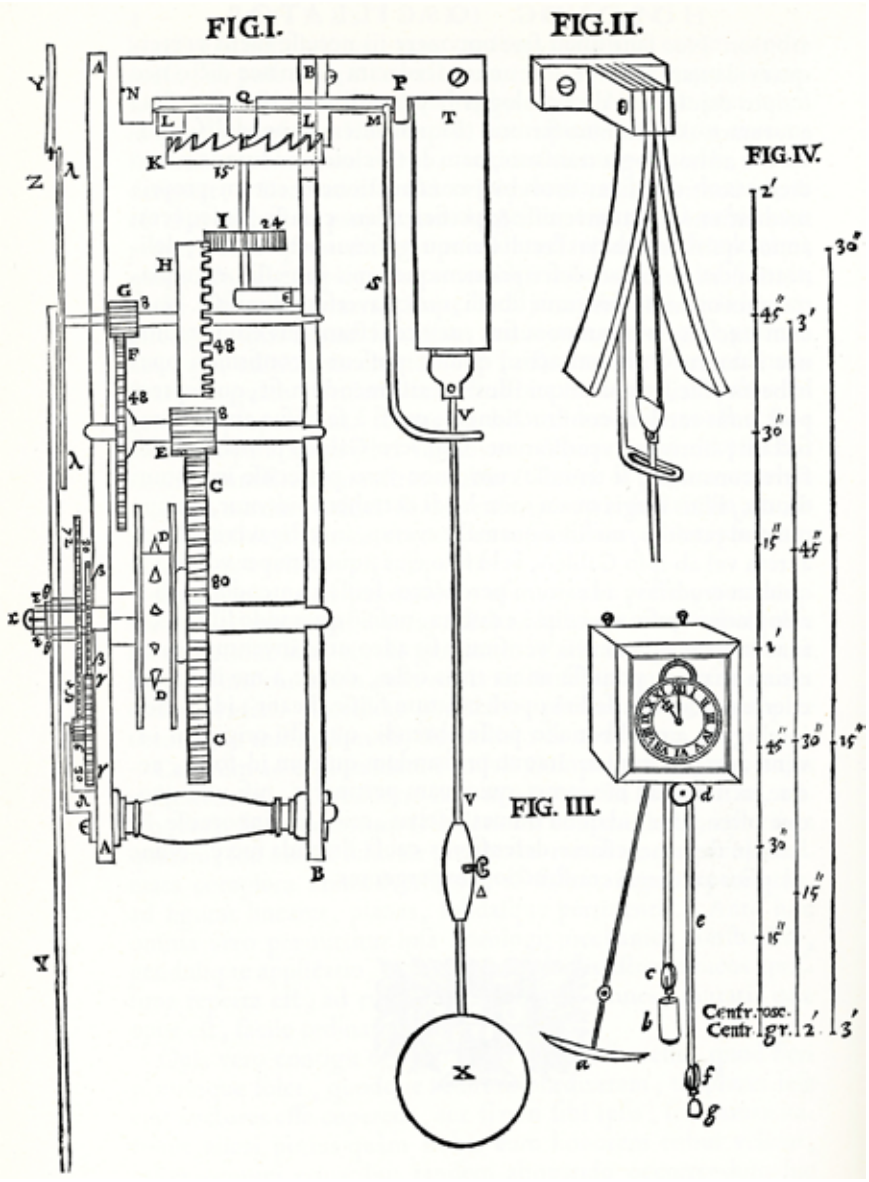
Sur un bras sont accrochés quatre pendules de longueur égale, mais de masses différentes (acier, verre, bois et papier mâché) pour vérifier l'isochronisme des petites oscillations. L'autre bras soutient quatre pendules de masse identique, mais de longueurs différentes.

Galilée et le lustre de la cathédrale de Pise
Selon la légende, Galilée aurait découvert les lois du pendule en observant les oscillations d'un lustre de la cathédrale de Pise. Les balancements du lustre conservent la même durée bien que l'amplitude de ses oscillations diminue avec le temps.
Louis Figuier, Vies des savants illustres, *Paris, 1874*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

Christian Huygens
Louis Figuier, Vies des savants illustres, *Paris, 1874*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

Après Galilée, c'est au tour de Newton puis du physicien hollandais Christian Huygens (1629-1695) d'étudier plus en détail la théorie du pendule. Corrigeant les affirmations de Galilée, Huygens précise que l'isochronisme (égalité des périodes d'oscillation) du pendule n'est valable que pour de faibles oscillations. Lorsque l'amplitude est grande, la période augmente sensiblement.

Reprenant une idée de Galilée, Huygens fabrique la première horloge régulée par un pendule (le balancier). Il introduit même un perfectionnement : en plaçant deux lames métalliques incurvées près du point d'attache, il force la masse à l'extrémité du pendule à décrire une trajectoire non pas en forme d'arc de cercle, mais en forme de cycloïde. Cette modification assure un isochronisme parfait indépendant de l'amplitude ; mais cette amélioration sera rarement utilisée et on préférera plus simplement limiter l'amplitude.



Le pendule à balancier de Huygens
Sur la figure 2, on distingue le système d'accroche du pendule entre deux lames métalliques incurvées.
Christian Huygens, Horologium oscillatorium…, *Paris, 1678, réédition, Bruxelles 1966*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

2.3. LE PENDULE, ÉTALON DU TEMPS

Au cours du 17e siècle, le pendule suscite beaucoup d'intérêt auprès de la communauté scientifique en tant qu'étalon de temps. De nombreuses expériences sont menées pour définir la longueur d'un pendule de référence qui battrait la seconde. Au milieu du 17e siècle, on adopte finalement une longueur de 0,9937 m pour un pendule battant la seconde à Paris. Mais très vite, les savants sont confrontés à un nouveau problème. Ce même pendule semble retarder lorsqu'il est utilisé sous les tropiques et l'équateur, comme le constatent certains astronomes au cours de leurs mesures. Ils sont obligés de raccourcir leur pendule de quelques millimètres pour qu'il batte la seconde au même rythme qu'à Paris.

Et là encore, Newton et Huygens trouvent la solution à ce problème. Par ce léger retard, le pendule révèle ce que les deux savants avaient déjà postulé, à savoir que la Terre, loin d'être parfaitement sphérique, est aplatie aux pôles et renflée à l'équateur. La cause en est la force centrifuge liée à la rotation de la Terre, plus marquée en périphérie qu'aux pôles. Par conséquent, les régions équatoriales sont légèrement plus éloignées du centre de la Terre que les pôles et les effets de la gravitation y sont moins sensibles.

Enfin, Huygens démontre encore que la position d'équilibre d'un pendule à l'équateur ne résulte pas seulement de l'attraction terrestre, mais aussi de la force centrifuge liée à la rotation de la Terre autour de son axe.

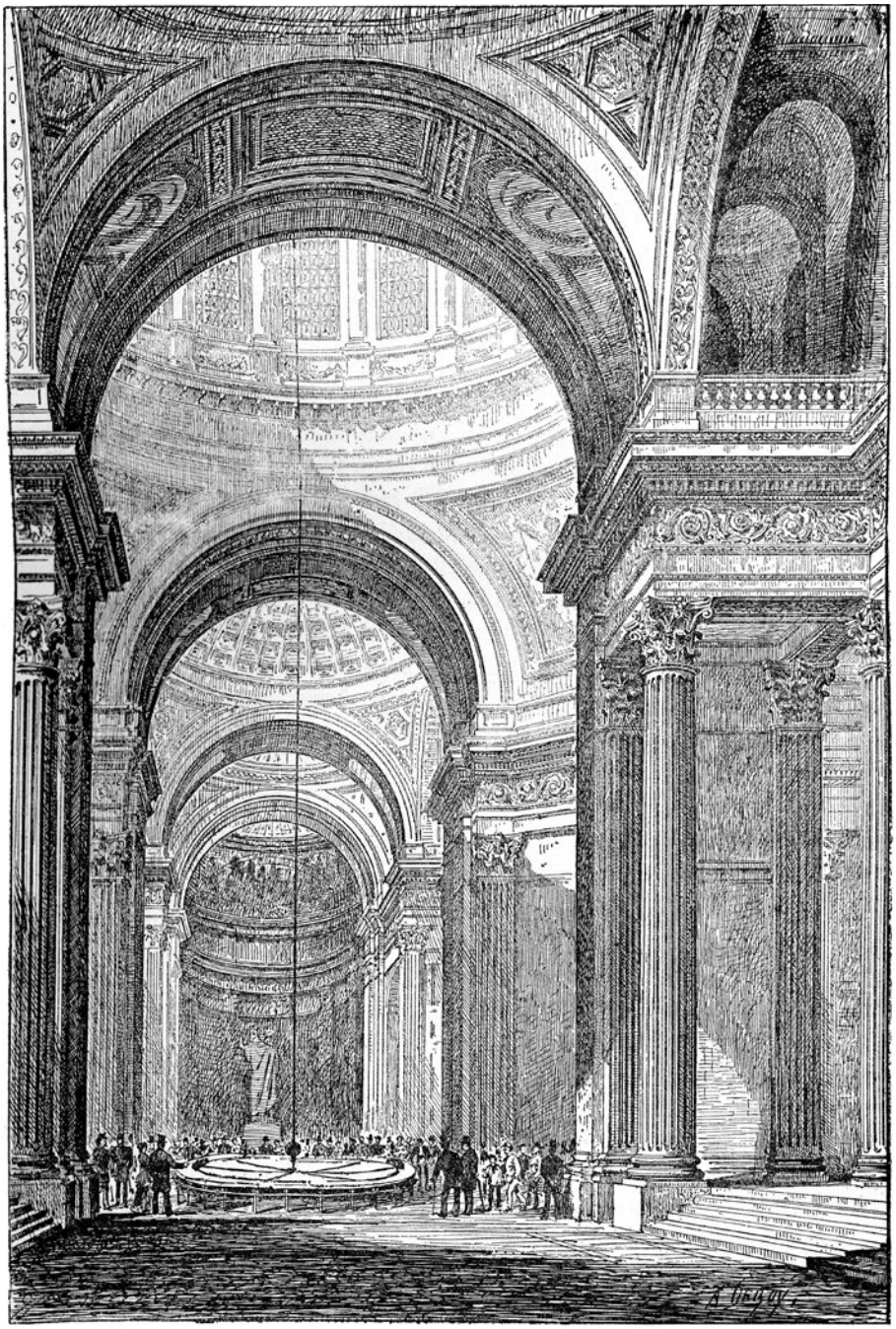
2.4. LE PENDULE GÉANT DE LÉON FOUCAULT POUR VOIR TOURNER LA TERRE

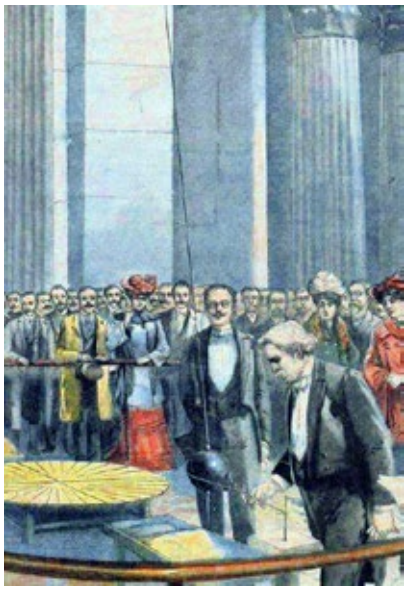
Malgré la qualité de ses arguments théoriques, Galilée n'a jamais réussi à prouver durant sa carrière que la Terre tourne bel et bien sur elle-même. Deux cents ans après lui, Léon Foucault (1819-1868), un physicien français, y parvient en se servant d'un instrument que le savant toscan avait développé lors de ses travaux sur la chute des corps : le pendule.

En 1851, Léon Foucault convie les Parisiens à venir voir tourner la Terre lors d'une expérience grand public réalisée au Panthéon. Il fait osciller une sphère métallique de 28 kilos au bout d'un fil d'acier de 67 m de long accroché au sommet de la coupole. La sphère est munie dans sa partie inférieure d'un stylet qui laisse à chaque oscillation des traces dans le sable disposé circulairement sous l'expérience. Après chaque période d'oscillation (16,5 secondes), la sphère laisse une nouvelle trace dans le tapis de sable. Au fur et à mesure de l'expérience, les traces progressent dans le sens des aiguilles d'une montre.

Léon Foucault
Léon Foucault. Travaux scientifiques. *Madame Veuve Foucault sa mère. Gauthier-Villars, Paris, 1878. Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences*

L'expérience du pendule de Foucault au Panthéon à Paris en 1851
Camille Flammarion, Astronomie populaire, *Paris, 1895*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences





Reconstitution de l'expérience du pendule de Foucault en 1902 au Panthéon à Paris par l'astronome Camille Flammarion
Pour libérer initialement le pendule sans lui donner d'élan, on brûle son cordon d'attache.
Wikipedia / Le Petit Parisien

Les spectateurs ont alors l'impression que le pendule tourne au fil du temps. Or, dans la réalité, ce sont eux et le Panthéon tout entier qui bougent ou plutôt qui tournent, entraînés par la rotation de la Terre. En effet, une des propriétés physiques du pendule est de conserver son plan d'oscillation même si son support est en mouvement. Si les spectateurs observaient l'expérience depuis l'espace, ils pourraient constater que le plan d'oscillation du pendule demeure fixe au cours de la rotation terrestre.

Mais en demeurant sur la Terre qui tourne, ils ont la sensation que la direction du pendule est déviée sous l'effet d'une force fictive, la force de Coriolis, qui s'exerce perpendiculairement à la direction de balancement du pendule.

La période de rotation apparente du pendule dépend de la latitude. A celle de Genève (46°12), le pendule met environ 32h25' pour effectuer un tour complet. Aux pôles Nord et Sud (latitude 90°), où le point de suspension coïncide avec l'axe de rotation de la Terre, la période de rotation est de 23h56' (jour sidéral). A l'équateur (latitude 0°), le pendule conserve toujours la même direction, car il est perpendiculaire à l'axe de rotation terrestre. De façon générale, la période varie comme le sinus de la latitude.

Pour être réussie, l'expérience de Foucault nécessite l'utilisation de pendules de grandes longueurs pour assurer l'isochronisme et limiter la vitesse de déplacement, et de masse importante pour que le frottement de l'air puisse être négligé ; dans l'expérience du Panthéon, le pendule oscillait pendant environ 6 heures. Les pendules de Foucault ont vite été équipés d'un système d'entraînement électromagnétique pour prolonger à volonté la durée de l'expérience.

Le pendule de Foucault
Musée d'histoire des sciences

Réalisé par Pierre Wets, ingénieur à la section de physique de l'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, le pendule de Foucault présenté dans l'exposition « Par la force des choses » du Musée d'histoire des sciences est doté d'un entraînement électromagnétique. Il peut ainsi fonctionner de manière continue malgré sa faible longueur (environ 2 m). Un anneau de Charron a été installé sous le point d'attache du pendule. Cet anneau métallique contre lequel le fil du pendule se heurte à chaque demi-oscillation permet d'éviter que le pendule ne décrive à la longue une ellipse.

La chute des corps et la rotation de la Terre

Newton aurait été le premier à postuler que la chute des corps effectuée depuis une grande hauteur permet de vérifier le mouvement de rotation de la Terre. Si la Terre tourne sur elle-même, la vitesse tangentielle doit augmenter à mesure que l'on s'éloigne de son axe. En un jour, le sommet d'une tour parcourt un cercle plus grand et possède donc une vitesse supérieure à celle d'un point situé à sa base. Donc, si l'on fait tomber un objet du sommet de la tour, il arrivera légèrement plus à l'est de son point de départ. Dans notre référentiel en mouvement, on attribue cet effet à la force de Coriolis. L'hypothèse de Newton a été confirmée expérimentalement par plusieurs physiciens dont l'Allemand Ferdinand Reich (1799-1882) qui démontre en 1833 qu'un objet lâché dans un puits de mine de 158 m de profondeur voit son point de chute dévié de 28 mm vers l'est.

3. LES GYROSCOPES

Grâce au gyroscope, sorte de toupie améliorée, Léon Foucault a apporté une deuxième preuve expérimentale de la rotation de la Terre.

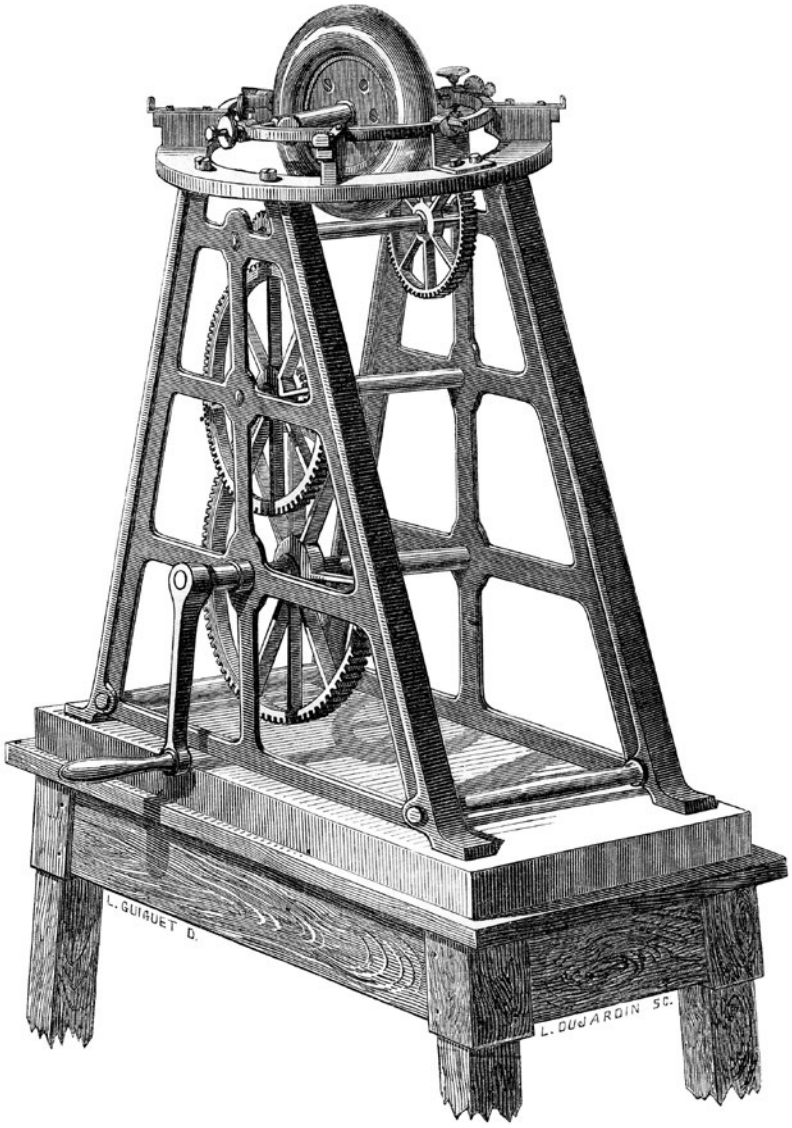
La physique de la toupie

Connue depuis l'Antiquité, la toupie est un formidable jouet scientifique. Son fonctionnement repose sur plusieurs principes physiques fondamentaux. Pour rester bien équilibré, son centre de gravité doit se situer sur l'axe de rotation. Plus une toupie est large (ses masses étant réparties loin de l'axe de rotation), plus son moment d'inertie augmente. L'axe de la toupie qui touche le sol doit être aussi ponctuel que possible pour diminuer les effets du frottement. Une toupie peut se lancer à la main avec une ficelle ou par un système de crémaillères et de roues dentées.

Lorsqu'elle est en mouvement, une toupie se comporte comme un gyroscope. Son axe de rotation pointe toujours dans la même direction. En ralentissant, la toupie ne tombe pas tout de suite ; sous l'effet de la force de gravitation, son axe de rotation commence à décrire un cercle autour de son point de contact avec le sol, phénomène nommé précession.

Toupies diverses
Musée d'histoire des sciences

Après son expérience du pendule, le physicien français Léon Foucault a imaginé un autre dispositif pour rendre visible de manière plus immédiate la rotation de la Terre. Il fabrique un instrument qu'il nomme gyroscope, sorte de toupie améliorée constituée d'un tore en bronze traversé par un axe en acier inséré dans un cardan métallique. Le disque est mis en rotation à une vitesse élevée (150 à 200 tours/minute) par un système d'engrenages actionné par une manivelle. L'instrument est capable de conserver cette rotation rapide pendant près de dix minutes, durée suffisante pour effectuer des mesures.



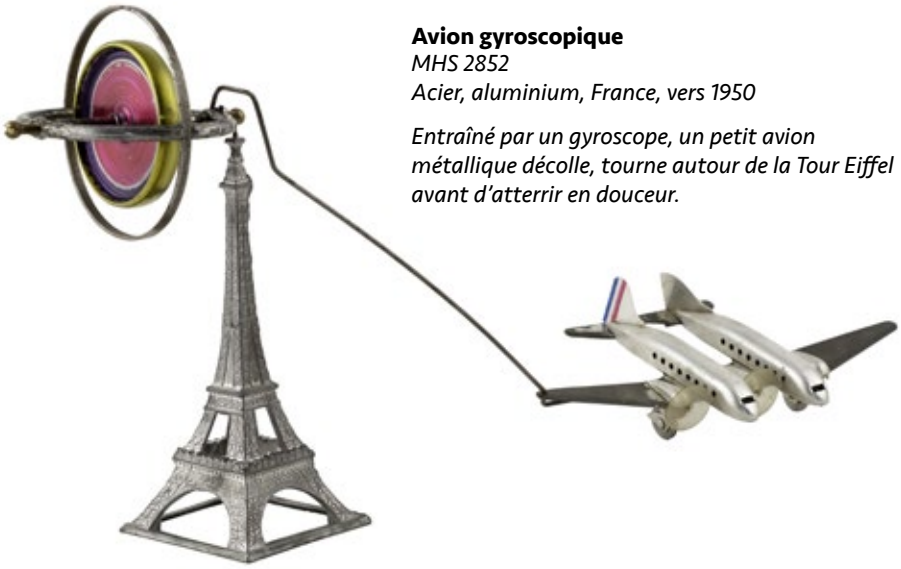
L'appareil à engrenages destiné à lancer le gyroscope de Foucault
François Arago, Astronomie populaire*, Paris, 1856*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

Une fois mis en rotation, le gyroscope est inséré dans un support comprenant un cardan vertical suspendu au bout d'un fil et reposant très légèrement sur un pivot de manière à ce que son axe de rotation puisse s'orienter librement.

Support pour observer le mouvement apparent du gyroscope
François Arago, Astronomie populaire*, Paris, 1856*
Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences

Gyroscopes anciens
MHS 2851
Acier, tôle, plastique, 20e siècle

Tant qu'il tourne à grande vitesse et qu'il n'est perturbé par aucune force extérieure, l'axe de rotation du gyroscope reste fixe (comme l'est le plan d'oscillation du pendule), conformément au principe physique de la conservation du moment cinétique. Le déplacement apparent de l'axe de rotation peut être visualisé au moyen d'une longue aiguille fixée au support du disque et par l'observation au microscope d'une échelle graduée placée sur le cardan vertical.



Avion gyroscopique
MHS 2852
Acier, aluminium, France, vers 1950

Entraîné par un gyroscope, un petit avion métallique décolle, tourne autour de la Tour Eiffel avant d'atterrir en douceur.

Horizon artificiel d'avion
Commandé par un gyroscope, l'horizon artificiel est un instrument de bord qui indique l'inclinaison et l'assiette de l'avion. Dispositif réalisé par Etienne Schaechtelin.
Musée d'histoire des sciences

A la fin du 19e siècle, les gyroscopes sont utilisés dans les bateaux comme boussole. Entraînés par des moteurs électriques, ils gardent leur orientation constamment pointée vers le nord malgré les mouvements du navire. Les gyroscopes permettent de contrôler le roulis et le tangage ainsi que de visualiser le cap à suivre. Aujourd'hui encore, grâce à leur capacité à s'opposer au changement de direction de leur axe de rotation, les gyroscopes équipent toute sorte d'engins terrestres et spatiaux pour contrôler leur altitude, leur cap ou leur stabilité.

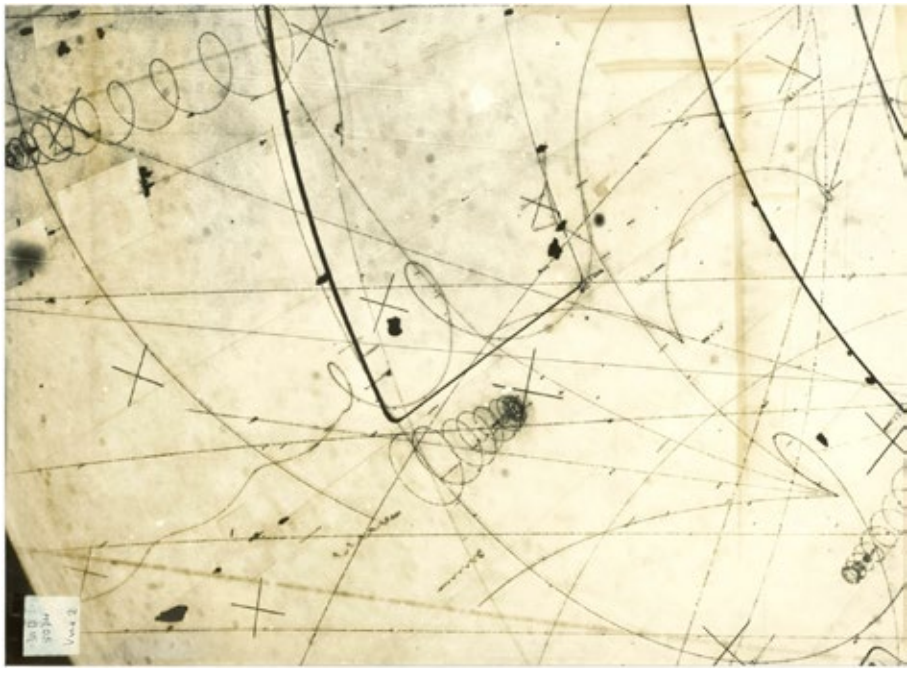
4. LES FORCES FONDAMENTALES

La force gravitationnelle n'est pas la seule force qui agit sur la Terre. Les physiciens en distinguent trois autres : la force électromagnétique, la force forte et la force faible.

La force électromagnétique résulte de l'unification de la force électrique d'une part (qui se manifeste par l'attraction ou la répulsion entre objets chargés, ou dans la liaison qui maintient les électrons près du noyau des atomes), et de la force magnétique d'autre part (que l'on observe lorsque l'aimant attire le fer, ou dans les phénomènes d'induction). L'électromagnétisme est décrit par les équations de Maxwell, dont les ondes radio et la lumière ne sont que des cas particuliers.

La force forte agit à l'échelle subatomique. Elle assure la cohésion des noyaux atomiques, qui éclateraient sous la seule action de la répulsion électrique entre protons. Son rayon d'action se limite à la taille d'un neutron ou d'un proton ($\sim 10^{-15}$ m).

La force faible intervient à une échelle encore plus petite, de l'ordre du centième de la précédente. Responsable de la radioactivité bêta, qui se produit lorsqu'un proton se transforme en un neutron ou vice-versa, cette force est à l'origine de la désintégration de certains noyaux radioactifs. Les forces faibles et fortes sont particulièrement étudiées au CERN où les physiciens traquent les particules fondamentales, constituants ultimes de la matière.



Traces de particules observées dans l'expérience LEBC (LExan Bubble Chamber) installée dans l'accélérateur SPS (Super synchroton à protons)
CERN, Genève

Dans le modèle dit standard, il a été possible d'unifier les forces électromagnétique, faible et forte dans un formalisme unique où les forces résultent de l'échange de particules porteuses. Mais la force gravitationnelle résiste encore à l'unification.

Parmi toutes ces forces fondamentales, la force forte est la plus… forte, environ 100 fois plus puissante que la force électromagnétique. Mais comme on l'a vu, sa portée est très limitée. La force de gravitation est la plus faible, mais en revanche elle est capable d'agir à l'échelle de l'Univers.

Pendule de Waltenhofen
MHS 346
Bois, aluminium, acier, Leybold, vers 1970

Cet appareil de démonstration illustre un phénomène d'induction mettant en jeu les forces électromagnétiques. Il met en évidence les courants de Foucault, un phénomène physique découvert en 1851 par le physicien français Léon Foucault (1819-1868). Le pendule métallique (en matériau non magnétique) oscille librement entre deux électroaimants lorsque ces derniers ne sont pas alimentés. Lorsque l'on fait circuler du courant dans les bobines des électroaimants, le pendule freine et s'arrête quasi instantanément. La raison est liée à l'apparition de courants induits dans le disque du pendule qui génèrent un champ magnétique s'opposant à celui des électroaimants.
Le principe des courants de Foucault est utilisé aujourd'hui dans certains systèmes de freinage de poids lourds ou de locomotives ainsi que dans les plaques de cuisson à induction.

5. BIBLIOGRAPHIE

Ben-Dov Yoav. 1995. *Invitation à la physique*. Paris, Seuil.

Bourdial Isabelle. 2001. *L'énergie et la matière*. Paris, Larousse.

Buchanan Josephine, Whitelaw Ian. 1993. *Forces et mouvement*. Paris, Gallimard.

Fadel Kamil. 2015. *Vous avez dit physique ?* Paris, Dunod.

Figuier Louis. *Vies des savants illustres.* Paris, 1874. Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences.

Fischer Stéphane, Stahl-Gretsch Laurence-Isaline. 2015. *Terre et Soleil*. Genève, Musée d'histoire des sciences.

Foucault Léon. *Travaux scientifiques.* Madame Veuve Foucault sa mère. Gauthier-Villars, Paris, 1878.

Galilée. 1992. *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde.* Traduction René Fréreux. Paris, Seuil.

Galilée. 1994. *Discours concernant deux sciences nouvelles*. Traduction Maurice Clavelin. Paris, PUF.

Huygens Christian. 1966. *Horologium oscillatorium...* Paris, 1678, réédition, Bruxelles. Bibliothèque du Musée d'histoire des sciences.

Mambrini Yann. 2021. *Newton à la plage*. Paris, Dunod.

Newton Isaac. 1739-1740. *Philosophiae naturalis principia mathematica.* Edition commentée par François Jacquier et Thomas Leseur. Barillot, Genève.

Rothen François. 2009. *Surprenante gravité*. Lausanne, PPUR.

Signore Robert. 2008. *L'histoire de la chute des corps*. Paris , Vuibert.

Signore Robert. 2011. *Histoire du pendule*. Paris, Vuibert.

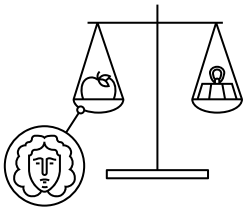
Speziali Pierre. La physique in : Trembley Jacques (ed). 1987. *Les savants genevois dans l'Europe intellectuelle*. Genève, Journal de Genève et Association pour le Musée d'histoire des sciences de Genève.

6. LA COMPRÉHENSION PAR LE GESTE ET L'EXPÉRIENCE

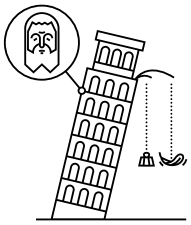
L'exposition « Par la force des choses. Tomber, tourner, rouler » cible la compréhension des phénomènes par l'expérimentation personnelle des visiteurs et visiteuses à travers une série de dispositifs interactifs relatifs à différentes thématiques mobilisant des forces. Ils sont tous mis en lien avec les savants, identifiés par un pictogramme à leur effigie et une mise en situation.

Différence entre poids et masse

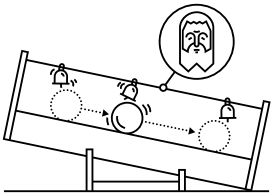
Trouver sa masse
Mesurer son poids



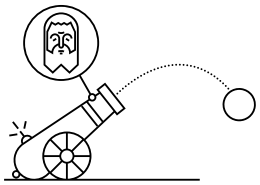
Chute des corps, directe ou à travers des dispositifs particuliers



Chute des corps



Plans inclinés



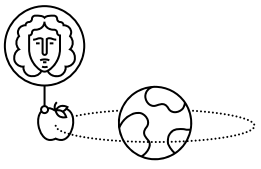
Balistique

Centres de gravité et équilibre

Illusion physique
Monter en tombant
Bateau ivre
Danseuse équilibriste

Une loi de gravitation universelle

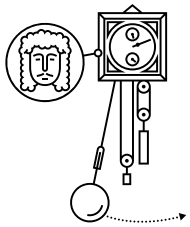
Mécanique céleste



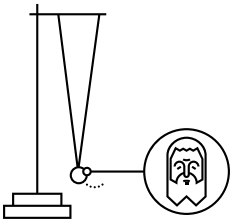
Forces de friction

Et que ça glisse !

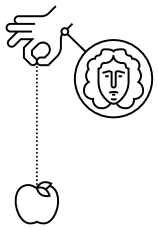
Le pendule, un instrument scientifique



Le fil à plomb
Battre la seconde



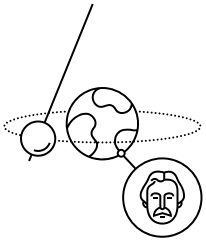
La longueur du fil a-t-elle une importance ?
La masse a-t-elle une importance ?



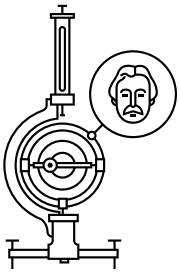
L'énergie se conserve
Pendule de Newton

Voir la Terre tourner

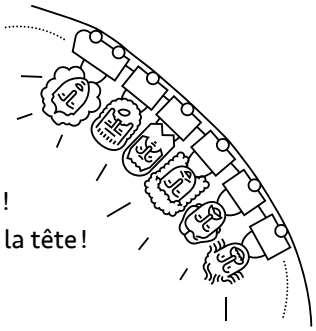
Voir tourner la Terre
Faire tourner la Terre



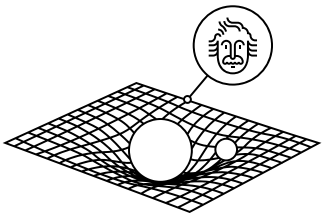
Toupies et gyroscopes



Piste de danse
pour toupies et gyroscopes



Tu me fais tourner la tête !
Tu ne me fais pas tourner la tête !
Carrousel gyroscopique
Grand looping



La relativité générale

Courbure de l'espace-temps

6. QUE LA FORCE SOIT AVEC VOUS : AVANT ET APRÈS LA VISITE DE L'EXPOSITION

Quoi de plus banal qu'un objet qui tombe sur le sol ? A partir de ce phénomène quotidien, on peut susciter l'intérêt des jeunes pour l'un des sujets les plus fondamentaux de la physique : les forces d'attraction et de gravitation.

La chute des corps est un sujet qui a sans cesse questionné les scientifiques. Le « bon sens » d'Aristote, ce qui est plus lourd tombe plus vite, se voit d'abord mis à mal au 17e siècle par Galilée qui expérimente et émet des hypothèses par le raisonnement. Newton, qui naît l'année de la mort de son prédécesseur, réussira le tour de force de formuler les lois du mouvement et rendre la théorie de la gravitation universelle. Au début du 20e siècle, Einstein remet en cause la force de la gravitation en montrant qu'elle résulte d'une déformation de l'espace et du temps.

Les expériences qui suivent permettent d'appréhender quelques étapes de cette histoire et de comprendre certaines forces qui régissent notre monde.

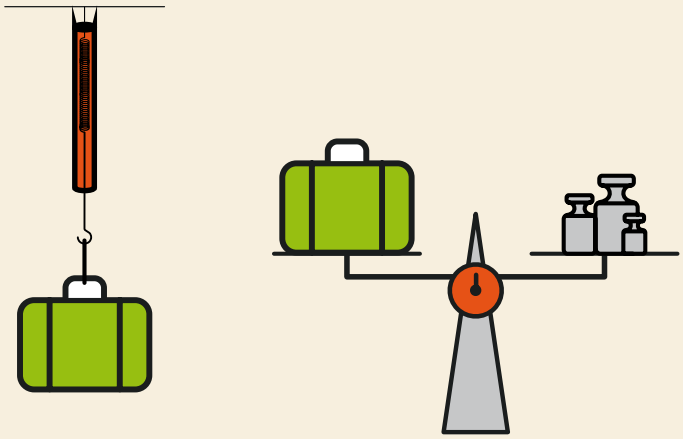
GLOSSAIRE DES FORCES

Quelques définitions s'imposent afin de lever des ambiguïtés sur certains termes.

- **Force :** une force désigne une poussée ou une traction exercée sur un objet par un autre objet ou un champ.
  L'ensemble des forces appliquées à un objet a pour effet de lui transmettre une accélération ou de le déformer.
- **Gravité :** la **force gravitationnelle** est une interaction physique qui cause l'attraction mutuelle entre deux corps dotés d'une masse. Elle est réciproque : si l'objet A attire l'objet B, alors l'objet B attire aussi l'objet A avec la même force. Par exemple, cette attraction s'exerce entre un objet et un astre comme la Terre et un satellite, ou entre deux astres comme une planète et le Soleil. Elle s'exprime en newtons (N).
  Cette force produit une accélération gravitationnelle qui est l'accélération que subirait un corps s'il était en chute libre.
  Les accélérations gravitationnelles à la surface de la Terre et de la Lune sont:
  $g_T = 9{,}8\ m/s^2 = 9{,}8\ N/kg$
  $g_L = 1{,}6\ m/s^2 = 1{,}6\ N/kg$

- **Masse :** la **masse** est la quantité de matière qui constitue les corps indépendamment de l'endroit où ils se trouvent. Elle s'exprime en kg.

- **Poids :** c'est la force exercée sur un corps par la gravitation. Elle dépend de la masse et de la taille de l'astre sur lequel on se trouve.
  Par exemple, sur la Lune, un corps présentera un poids six fois moindre que sur la Terre. L'unité de poids est le newton (N).



Poids (P)
Unité : Newton [N]

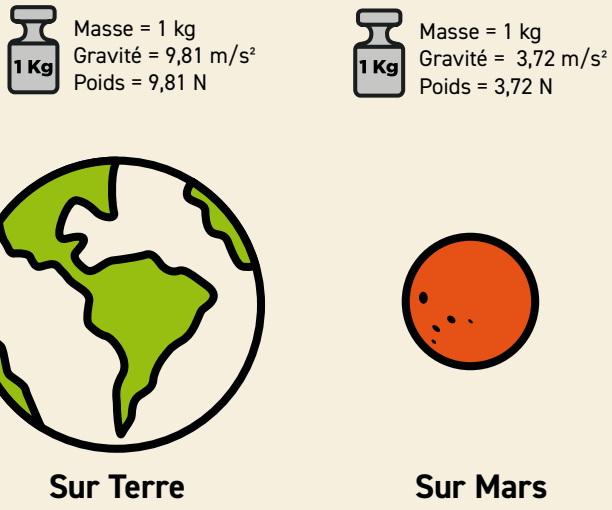
Masse (m)
Unité : kilos [kg]

Différence entre la masse et le poids

Masse et poids sont liés par la relation suivante :

poids = masse x g

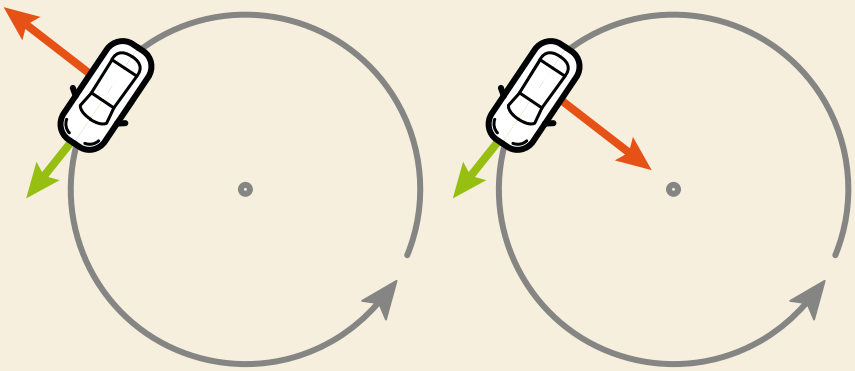
où g représente l'accélération de la pesanteur en un lieu donné.



Un objet de 1 kg a une masse de 1 kg sur Terre et sur Mars, mais un poids différent.

- **Force centripète :** un mouvement circulaire est causé par une force qui est dirigée vers le centre de la trajectoire. Cette force dite centripète est constamment perpendiculaire au déplacement.

- **Force centrifuge :** la force centrifuge est une force fictive qui pousse un corps loin du centre de rotation d'un mouvement circulaire. Elle est ressentie dans le référentiel en mouvement et résulte de l'inertie face au changement de direction.
  Cette force se ressent par exemple dans une voiture lors d'un virage serré. Lorsqu'une voiture entre dans une courbe, les roues exercent une force vers l'intérieur du virage afin d'amener la voiture dans la direction appropriée : c'est la force centripète. Mais les personnes assises à l'intérieur ressentent une force qui tend à les amener vers l'extérieur. C'est cette force que l'on nomme force centrifuge.



Force centripète et centrifuge
Flèche verte : vitesse
En orange à gauche : force centrifuge ressentie dans la voiture
En orange à droite : force centripète qui fait tourner la voiture

- **Frottement, friction :** le frottement apparaît entre deux corps en mouvement relatif lorsqu'ils sont en contact. Il résulte des interactions entre les surfaces et s'oppose au mouvement.

TOMBER - LA CHUTE DES CORPS

Plus c'est lourd, plus ça tombe vite ?

Ce postulat d'Aristote a été admis pendant presque 2000 ans. Il faut attendre le 17e siècle avec Galilée pour remettre en cause cette hypothèse qui était assez intuitive. (cf. chap. 1 de cette brochure pour les explications historiques)

Matériel
- une boule de pétanque
- une balle de tennis
- une feuille de papier
- tapis ou mousse pour protéger le sol

Marche à suivre

Avant chaque expérience, demandez aux enfants quel objet tombera en premier.

Se mettre debout sur un tabouret. Lâcher les différents objets depuis la même hauteur, au même moment et observer la chute.

1. Deux objets de même forme, mais de masse différente : lâcher la balle de pétanque et la balle de tennis.
2. Deux objets de masse et de formes différentes : lâcher une feuille de papier et la balle de tennis.
3. Chiffonner la feuille de papier pour former une boule puis la lâcher à nouveau avec la balle de tennis.
4. Poser une feuille de papier sur un livre et les lâcher.

Explications

La **chute libre** est le mouvement vertical effectué par un objet lorsqu'il ne subit que l'effet de la force gravitationnelle.

Si l'on néglige le frottement de l'air, un objet qui effectue un mouvement de chute subit toujours une accélération de 9,8 m/s^2 à la surface de la Terre.

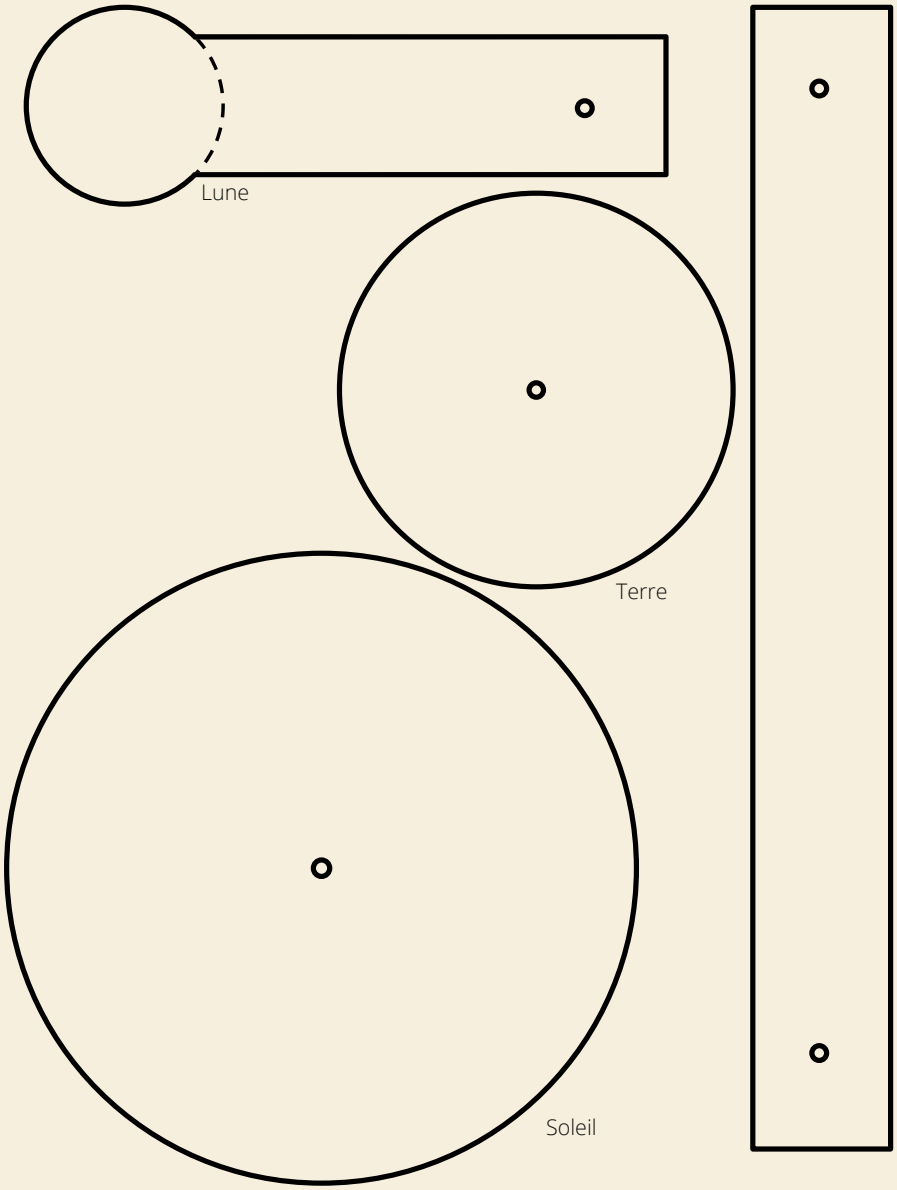
Ceci signifie que si on laisse tomber la balle de tennis et la balle de pétanque du sommet d'un même immeuble, les deux objets accéléreront au même rythme et arriveront au sol en même temps, pour autant qu'on néglige le frottement ! La vitesse de chute est donc indépendante de la masse de l'objet.

Dans les expériences proposées, la balle de pétanque tombe un peu avant la balle de tennis uniquement à cause du frottement de l'air.

Quand la feuille n'est pas froissée, elle expose une grande surface à l'air et c'est cet air qui ralentit sa chute. Une fois froissée, la surface de contact avec l'air est moins grande et elle tombera alors en même temps que la balle de tennis, toujours si l'on néglige le frottement de l'air. Quand une feuille est posée sur un livre, elle est « protégée » de l'air et les deux objets touchent le sol en même temps.

La lune tombe tout le temps sur la Terre...

MODÈLE À IMPRIMER ET DÉCOUPER



Matériel

- ciseaux
- poinçon
- attaches parisiennes
- modèle papier du tellurium à imprimer si possible sur papier cartonné

Marche à suivre

Colorier ou peindre la Terre, la Lune et le Soleil.

Découper les formes sur les lignes noires (ne pas découper sur les pointillés).

Faire un trou dans les petits cercles à l'aide du poinçon.

Relier le bras de la Terre au centre du Soleil puis le bras de la Lune au centre de la Terre.

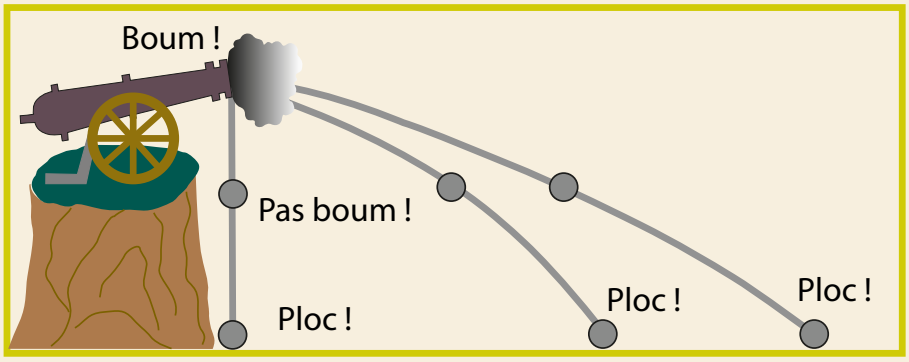
Le petit tellurium est prêt pour expérimenter les mouvements Terre-Lune-Soleil.

Activité extraite du Guide d'activités en astronomie pour les groupes parascolaires édité par la Fédération des astronomes amateurs du Québec.
https://www.faaq.org/bibliotheque/activitesjeunes/guideactiviteastronomiques-v2-1096.pdf

Explications

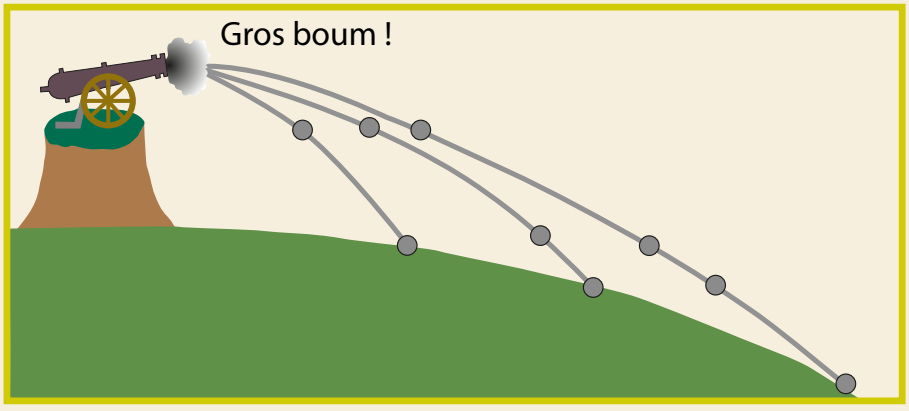
Pour répondre à la question pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur la Terre comme le fait une pomme, Newton donne l'exemple d'un canon qu'il imagine au sommet d'une montagne.

Lorsque le boulet est tiré horizontalement, il suit une trajectoire parabolique et prend le même temps pour toucher le sol que si on le laisse tomber à la verticale. Plus la vitesse initiale est importante, plus le boulet ira loin, mais puisque tous les corps tombent avec la même accélération, le temps de chute est toujours le même indépendamment de la vitesse horizontale. Ceci est valable en considérant la Terre comme plate.



Canon de Newton : trajectoires verticale et paraboliques (d'après André Ross. Accromath vol. 11, été-automne 2016. Dossier gravité p. 7).

Vu que la Terre est sphérique, elle aura tendance à « se dérober » sous le boulet et le temps de chute va alors augmenter avec la vitesse initiale.



Canon de Newton : la Terre sphérique se dérobe sous le boulet (id.).

Si le projectile est tiré à très très grande vitesse, la Terre se dérobe continuellement sous le boulet et celui-ci continuera de tourner autour de la Terre. Newton conclut uniquement par ce raisonnement que la Lune tombe constamment sur la Terre. C'est ainsi qu'il comprend que la gravitation est valable tant pour la pomme que pour les astres célestes.

Lorsque le boulet est tiré à très grande vitesse, il tourne autour de la Terre. Celle-ci se dérobe sans arrêt (ibid.).

JOUER AVEC LE CENTRE DE GRAVITÉ

Le centre de gravité est le point d'application de la résultante des forces de gravité ou de pesanteur sur un objet. Il dépend de la répartition des masses. Par exemple, le centre de gravité de la Terre est en son centre géométrique, car la masse est répartie symétriquement autour du centre. Le centre de masse d'un marteau se situe dans la partie métallique, car elle est beaucoup plus dense que le manche. On peut repérer facilement le centre de masse d'un objet en le posant sur son doigt : s'il tient en équilibre, c'est que le doigt est sous le centre de gravité.

Equilibres improbables

1. Deux fourchettes et une pièce

Matériel :

- 2 fourchettes identiques
- 1 pièce de monnaie
- une bouteille en verre et/ou un bord de table droit

Marche à suivre

Glisser la pièce entre les deux dents extérieures de deux fourchettes placées tête à tête comme sur l'image ci-dessous.

Prendre l'ensemble pièce-fourchette et déposer le bord de la pièce sur le rebord d'une bouteille, d'un verre ou d'une table. Glisser les fourchettes le plus loin possible sur la pièce et ajuster jusqu'à ce que les fourchettes soient en équilibre.

Placement des fourchettes et de la pièce

L'ensemble fourchettes-pièce en équilibre

2. Mobile facile !

Matériel

- deux pailles pliables
- un cure-dent
- un poinçon
- un crayon
- une boule de pâte à modeler
- du papier cartonné
- colle ou papier collant

Marche à suivre

Fabriquer le socle en plantant le crayon dans la pâte à modeler.

Avec le poinçon, percer les deux pailles du côté de la partie courte du coude (à peu près au milieu) afin d'y mettre le cure-dent.

Dessiner et découper une petite tête (environ 3 cm de diamètre) et la coller en haut du cure-dent.

Plier les pailles vers le bas et déposer le tout sur le crayon. Ajuster leur position afin que le mobile tienne en équilibre.

Détail du mobile au niveau des pailles

Explications

On a tendance à croire que le centre de gravité se trouve toujours à un endroit où il y a de la matière et non pas « à côté » de l'objet. Pourtant, le centre de gravité d'un disque vinyle est dans le trou central, là où il n'y a pas de matière.

1. Le système fourchettes-pièce est soumis à deux forces : celle de l'attraction terrestre (le poids) et celle de la bouteille sur le système (au niveau de la pièce).
   Pour que le système soit dans une position d'équilibre stable, il faut que le centre de gravité soit situé à la verticale au-dessous du point de suspension (ici, le point de contact entre la pièce et la bouteille). Dans le cas présent, la plus grande partie de la masse se trouve dans les manches des fourchettes, au-dessous du col de la bouteille, ce qui réalise la condition d'équilibre.
2. Dans le mobile, le centre de gravité est situé également juste en dessous du point d'appui, c'est-à-dire la pointe inférieure du cure-dents. Le mobile tient alors en équilibre.

Mobile entier

Matériel

- une chaise ou un tabouret
- un mur

Juste avec le corps

1. Le défi de la chaise

Marche à suivre

Se mettre face au mur. Placer la chaise entre vous et le mur de manière à pouvoir la porter facilement. Poser la tête contre le mur et abaisser votre dos jusqu'à ce qu'il forme un angle droit avec vos jambes. Prendre la chaise à deux mains, plaquer l'assise contre le buste et essayer de soulever le dos pour retrouver la position verticale.

Explications

Certaines personnes y arrivent, d'autres pas. Tout est question de centre de gravité. En général, les femmes y arrivent mieux que les hommes. Sans le soutien du mur, beaucoup d'hommes tomberaient en avant, car leur centre de gravité s'est déplacé à l'avant de leurs pieds.

Plus de la moitié du corps est donc relocalisée en avant, ce qui empêche de se relever.

Les femmes ont généralement des épaules plus étroites et des hanches plus larges que les hommes. Leurs graisses sont plutôt stockées dans le bas du corps, ce qui implique un centre de gravité plus bas pour compenser la masse de la partie supérieure du corps. Lorsque les femmes se baissent, leur centre de masse surplombe les pieds sans cependant les dépasser. Se relever est alors plus facile.

2. Deux doigts sur le front

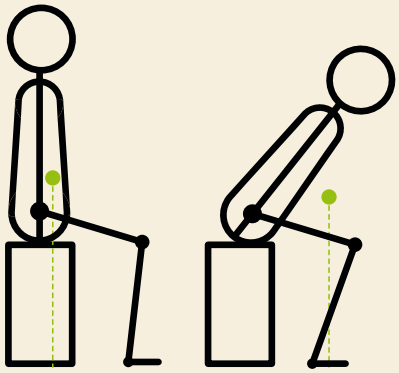
Marche à suivre

Une personne s'assied sur une chaise contre un mur. L'autre personne place deux doigts sur son front.

Demander à la personne assise de se lever en restant droite et sans mettre les bras en arrière.

Explications

L'exercice est difficile à réaliser, car en position assise, le centre de gravité est situé au niveau du nombril. Pour se lever, il faut le déplacer au-dessus des pieds, ce qui est impossible sans incliner le tronc. Plus les pieds sont proches de la chaise, moins le tronc doit basculer vers l'avant pour que le centre de gravité soit au-dessus des pieds.



Déplacement du centre de gravité entre la position assise et debout

FORCE CENTRIFUGE

Essoreuse à salade

Matériel

- une essoreuse à salade
- des feuilles de salade

Marche à suivre

Laver les feuilles de salade sous l'eau puis les placer dans le panier de l'essoreuse. Fermer l'ustensile et faire tourner le panier durant environ 30 secondes.

Ouvrir l'essoreuse et observer.

Explications

Comme son nom l'indique, cet ustensile de cuisine permet d'essorer la salade de manière plutôt efficace. En tournant la manivelle, le panier intérieur est entraîné dans un mouvement circulaire rapide et va alors projeter la salade et l'eau sur les côtés. La salade reste dans le panier, l'eau s'écoule par les trous de la passoire.

C'est l'effet centrifuge suite à la rotation rapide du panier qui projette la salade et l'eau sur les bords.

Faites tourner le ballon !

Matériel

- un écrou assez gros
- un ballon de baudruche de couleur claire

Marche à suivre

Glisser l'écrou dans le ballon dégonflé puis le gonfler et le fermer avec un nœud.

Tourner le ballon de plus en plus vite.

Observer le mouvement et le son émis.

Explications

L'écrou se retrouve plaqué contre la paroi du ballon grâce à la force centrifuge. Vu sa forme, l'écrou roule de manière aléatoire et provoque alors un son dû à la vibration de la paroi du ballon. Comme de l'air passe par le trou de l'écrou, il émet un deuxième son. Le ballon joue également le rôle de caisse de résonance.

OSCILLER - LES PENDULES

Le pendule est probablement l'un des instruments scientifiques les plus anciens. Il est facile à fabriquer et à expérimenter. Le nombre des oscillations, la période et les amplitudes dépendent de certains facteurs décrits ci-dessous.

Matériel

- un crayon
- une table
- du scotch
- de la ficelle fine
- un fil de fer rigide
- des écrous
- un chronomètre

Un pendule simple

Changer la masse, la longueur du fil.

Marche à suivre

Fixer un crayon au bord d'une table comme sur l'image.

Pendule simple avec un ou plusieurs écrous comme masse.

Couper un morceau de ficelle en fonction de la hauteur de la table (environ 50 cm) puis la nouer à l'extrémité du crayon dépassant de la table. Faire bouger la boucle : elle doit être mobile, mais pas trop.

Tordre le fil de fer de manière à former un crochet. Le fixer au bout de la ficelle. Il permet de suspendre le ou les écrous qui constituent la masse nécessaire à tout pendule.

1. Suspendre un écrou et faire osciller le pendule en le lâchant d'un angle d'environ 30°. Compter les allers-retours (appelés oscillations) durant 30 secondes.
2. Refaire l'expérience avec deux puis trois écrous. Le but est de voir si la masse influence le nombre d'oscillations. Que constate-t-on ?
3. Réaliser à nouveau l'expérience en lâchant le pendule d'un angle plus grand. En d'autres termes, modifier l'amplitude.
4. Modifier la longueur du pendule de moitié, puis lâcher le pendule comme pour l'expérience 1. Si vous voulez être encore plus convaincu.e de l'effet de la longueur sur les oscillations, réduisez encore de moitié.

Explications

Cette petite série d'expériences avec un pendule permet de réaliser que la masse et l'amplitude ne modifient en rien le nombre d'oscillations. Si vous constatez tout de même des différences, c'est probablement dû à l'imprécision inévitable du lâcher.

La période d'un pendule, soit la durée d'une oscillation complète (aller et retour), ne dépend que de la longueur de la ficelle du fil de suspension.

TOURNER - GYROSCOPES ET TOUPIES

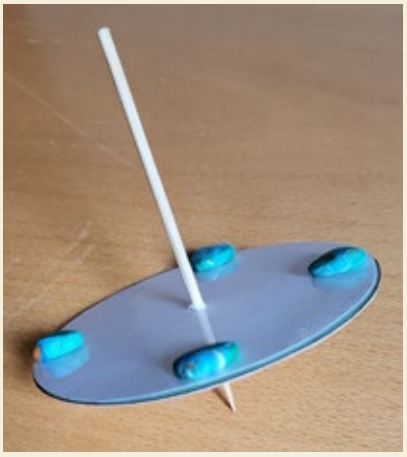
Qui n'a pas une fois dans sa vie fait tourner une toupie ? Cet objet ludique est un très bon outil pour comprendre quelques principes de base de physique, mais aussi pour un atelier bricolage avec divers matériaux recyclés.

Matériel variable

Pour le corps de la toupie : cercle en carton, bouchon de bouteille, CD, assiette en papier, pot de yoghourt

Pour l'axe : cure-dents, pic à brochettes, clou, crayon

Masses : petites pièces de monnaie, trombone, pâte à modeler



Deux exemples de toupies.
La pâte à modeler est utilisée pour augmenter la masse.

Marche à suivre (exemple d'une toupie simple)

Découper un cercle dans un morceau de carton et le décorer.

Fixer un cure-dent ou un morceau de pic à brochette de 8 à 12 cm au centre.

On peut se contenter de cette toupie très simple ou en augmenter sa masse en fixant de la pâte à modeler sur le cercle. L'augmentation de masse la fait tourner plus longtemps et de façon plus stable.

Explication

Le principe de base d'une toupie est toujours le même :

- une masse équilibrée avec un centre de gravité situé sur l'axe de rotation,
- un grand moment d'inertie par rapport à l'axe. Plus une toupie est large, plus son moment d'inertie augmente et plus elle tournera longtemps. Si le moment d'inertie est faible, elle tournera plus vite (exemple de la patineuse qui diminue son moment d'inertie et augmente sa vitesse en serrant ses bras le long du corps),
- un contact ponctuel de l'axe avec le support pour diminuer les effets du frottement,
- un système de mise en rotation (tige, ficelle…) permet de lancer la toupie. Une fois en rotation, la toupie se comporte comme un gyroscope.

Le temps de rotation peut être augmenté en abaissant le centre de masse, en minimisant la friction au niveau de l'embout et en répartissant la masse loin du centre (grand moment d'inertie).

Volet pédagogique

L'exposition *Par la force des choses : tomber, tourner, rouler…* et les expériences suggérées précédemment présentent des liens avec le PER en particulier avec les objectifs d'apprentissage suivants :

Cycle élémentaire : MSN 15, MSN 16 A 11 AC&M, A 13 AC&M, FG 11
Cycle moyen : MSN 25, MSN 26, SHS22, A 23 AC&M, FG 23
Cycle d'orientation : MSN35, MSN 36

Pour assurer la pertinence et l'intérêt de la visite, il est fortement conseillé de la préparer en classe avant votre venue au Musée d'histoire des sciences. Le présent document vous y aidera.

Cette brochure est téléchargeable sur www.museum.geneve.ch

L'exposition *Par la force des choses* est recommandée pour les enfants à partir de 6 ans. Il n'y a pas de limite supérieure.

Quelques références :

http://phymain.unisciel.fr/ : une référence pour des petites expériences scientifiques

https ://www.wikidebrouillard.org/ : une autre référence pour des petites expériences scientifiques

https://www.youtube.com/watch ?v=J_AO5qMoQAI : C'est toujours pas sorcier- la gravité, 22 novembre 2022

https://youtu.be/dlDWHIX-c5M : la chute des corps expliquée par Etienne Klein, 19 décembre 2018

https://www.rts.ch/decouverte/sciences-et-environnement/terre-et-espace/l-apesanteur/ : plusieurs documentaires sur l'apesanteur rassemblés

Pour organiser votre visite

Les visites guidées des collections du musée doivent être réservées au minimum deux semaines à l'avance par mail : **maha.zein@ville-ge.ch ou au 022 418 50 69**
Elles sont gratuites pour les écoles du Canton de Genève.
Pour les classes venant d'autres cantons ou de l'étranger, le tarif est de CHF 20.- par heure et par groupe.

Musée d'histoire des sciences de Genève

Villa Bartholoni
Parc de la Perle du Lac
128, rue de Lausanne
1202 Genève
www.ville-ge.ch/mhs
mhs@ville-ge.ch
+41 22 418 50 60

Horaires

Ouvert tous les jours de 10h à 17h
Fermé le mardi
Entrée libre

Accès

Le Musée se trouve dans la Villa Bartholoni, une villa de maître nichée dans le Parc de la Perle du Lac.

Il est conseillé de s'y rendre en transports publics.
Déconseillé en voiture. En semaine, il n'y a que quelques places disponibles à l'entrée du parc de la Perle du Lac. Le week-end, possibilité de stationner au parking de l'IHEID voisin.

MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES GENÈVE

Parc de La Perle du Lac
128 rue de Lausanne
CH-1202 Genève, Suisse

HORAIRE
Le Musée d'histoire des sciences est ouvert tous les jours de 10h-17h, sauf le mardi, le jour de Noël (25 décembre) et le jour de l'An (1er janvier) / Les 24 et 31 décembre, le Musée ferme à 16h

CONTACT
Tél. +41 22 418 50 60
www.museum-geneve.ch
mhs@ville-ge.ch

ACCÈS
bus 1-25 (arrêt Perle du Lac)
tram 15 (arrêts Butini & France)
bus 11-22 (arrêt Jardin botanique)
bateau Mouettes M4 (arrêt Châteaubriand)

Gare CFF de Genève Cornavin à 15 min. à pied
Halte ferroviaire Genève Sécheron (lignes régionales) à 5 min. à pied

Le bâtiment étant ancien, il ne dispose pas d'ascenseur. Un système pour les personnes à mobilité réduite permet néanmoins d'accéder au rez.

muséum genève