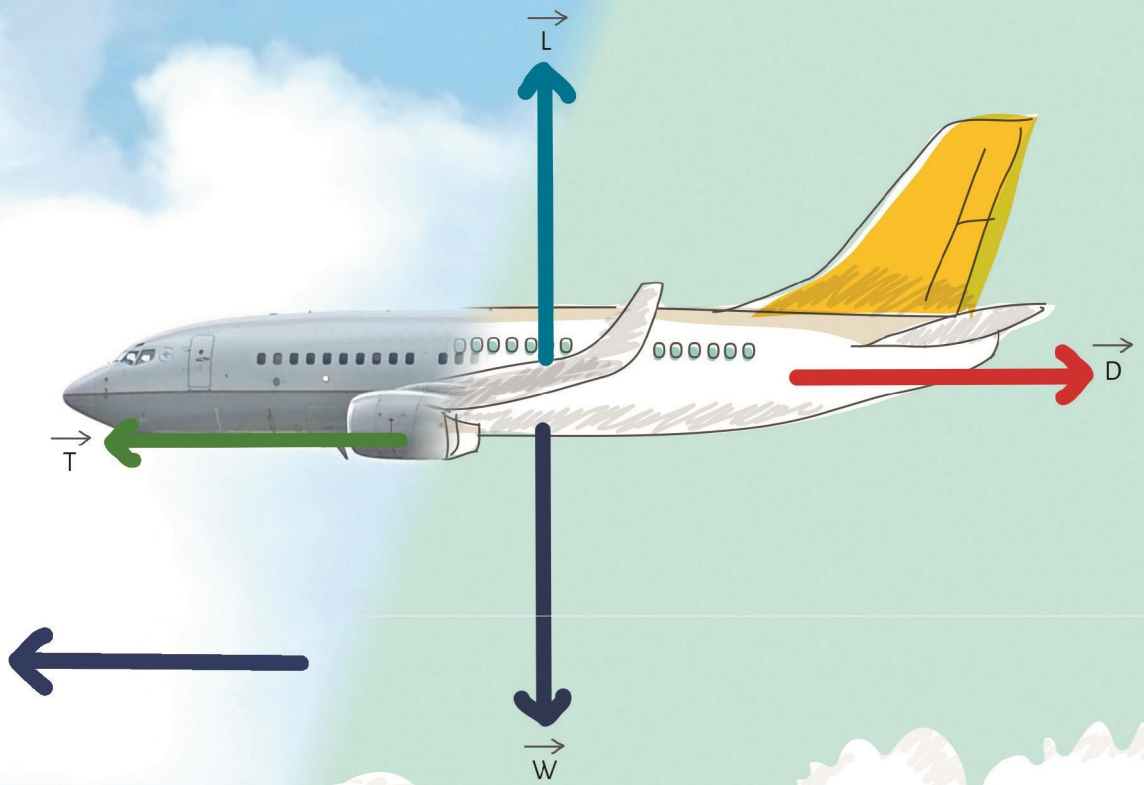


KURT BAKER

Les bases de la physique

EN 60 NOTIONS **ILLUSTRÉES**



DELACHAUX
ET NIESTLÉ

Les bases de la **physique**

KURT BAKER

Édition originale :

Titre original : *Physics, an illustrated guide for all ages*

© UniPress Books Limited, Grande-Bretagne, 2021

Édition française :

© Delachaux et Niestlé, Paris, 2022

Dépôt légal : janvier 2022

ISBN : 978-2-603-02866-7

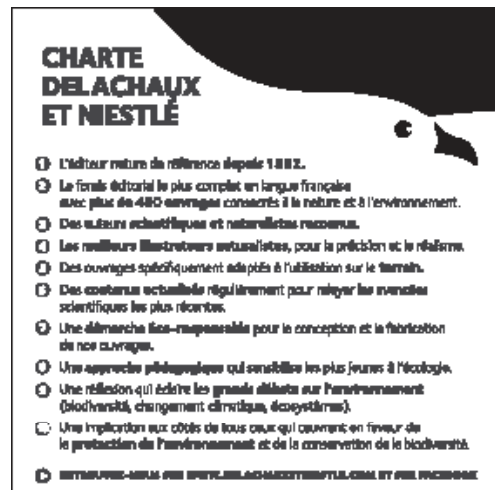
Impression : Lego, Italie

Traduction : Claude Checconi, Jörg Ruthel
Relecture scientifique : Manon Berger, Thomas Berger
Préparation, mise en pages, relecture : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq
Couverture : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq
Photo de couverture : © icholakov / iStock / Getty Images Plus

Cet ouvrage ne peut être reproduit, même partiellement et sous quelque forme que ce soit (photocopie, décalque, microfilm, duplicateur ou tout autre procédé analogique ou numérique), sans une autorisation écrite de l'éditeur. Tous droits d'adaptation, de reproduction et de traduction réservés pour tous pays.

Les bases de la physique

EN 60 NOTIONS **ILLUSTRÉES**



SOMMAIRE

Introduction 6

1 Forces 8

Qu'est-ce qu'une force ? 9
 Forces de contact 10
 Forces à distance 14
 Lois de Newton 22
 RÉCAP 24

2 Mouvement linéaire 26

Position d'une particule 27
 Mouvement d'une particule 28
 Graphiques de mouvement 30
 Accélération constante 34
 RÉCAP 36

3 Mouvement de rotation 38

Exemples de mouvement de rotation 39
 Mouvement circulaire 40
 Mouvement orbital 42
 Cinématique et dynamique de la rotation 45
 RÉCAP 48

4 Lois de conservation 50

Types de lois de conservation 51
 Systèmes fermés 52
 Collisions 54
 RÉCAP 60

5 Électricité 62

Charge électrique et transfert de charge 63
 Courant, tension et résistance 64
 Circuits électriques 68
 RÉCAP 74

6 Champs et forces 76

Les champs et leurs effets 77
 Champs de gravitation 78
 Champs magnétiques et électriques 80
 RÉCAP 84

7 Électromagnétisme 86

Loi de Faraday 87
 Induction électromagnétique 88
 Perte et transfert d'énergie 90
 Rayonnement et spectre électromagnétiques 92
 Spectre électromagnétique 94
 RÉCAP 96

8 Théorie des ondes 98

Amplitude, fréquence et période 99
 Oscillations harmoniques 100
 Ondes progressives 104
 Propriétés des ondes 106
 Interférence et ondes stationnaires 109
 Effet Doppler 111
 RÉCAP 112

9 Optique 114

Les lois de la réflexion 115
 Réfraction, loi de Descartes et réflexion totale 116
 La science de l'optique 118
 Le comportement de la lumière 120
 Interférence et interférométrie 123
 RÉCAP 126

10 Thermodynamique 128

Température 129
 Transfert d'énergie thermique 130
 Principes de la thermodynamique 134
 RÉCAP 140

11 Fluides 142

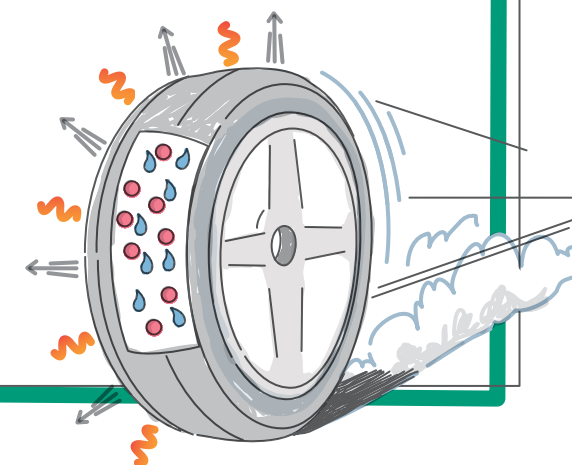
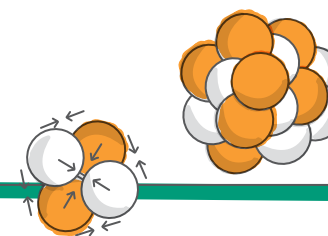
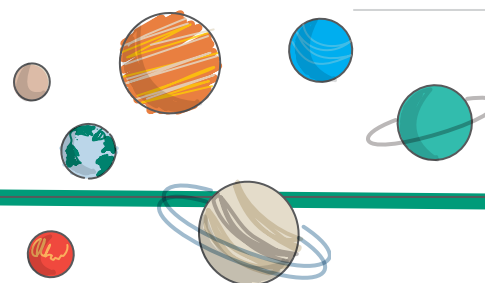
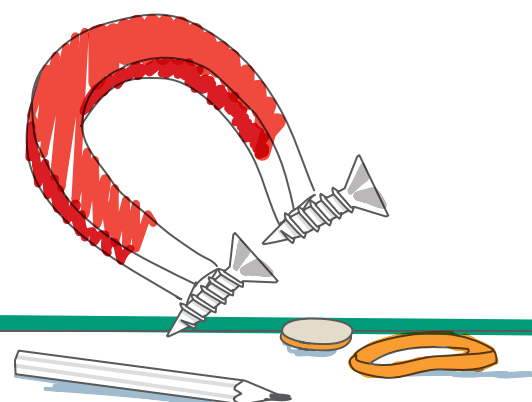
Densité et pression 143
 Différence de pression, portance et flottabilité 144
 Écoulement des fluides et principe de Bernoulli 146
 RÉCAP 148

12 Physique moderne 150

Théorie de la relativité restreinte 151
 Théorie de la relativité générale 152
 Physique nucléaire 154
 Réactions nucléaires 156
 Physique quantique 158
 Le modèle standard 160
 Semi-conducteurs 162
 RÉCAP 164

13 Astrophysique 166

L'évolution stellaire 167
 Diagramme de Hertzsprung-Russell 170
 Dynamique des galaxies 172
 Décalage vers le rouge et vitesse de récession 174
 La constante de Hubble 176
 Début de l'univers 178
 Fin de l'univers 180
 Lentilles gravitationnelles et ondes gravitationnelles 182
 Trous noirs 184
 RÉCAP 186
 Index 188

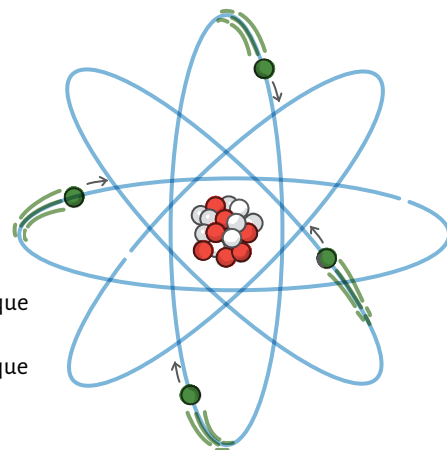


INTRODUCTION

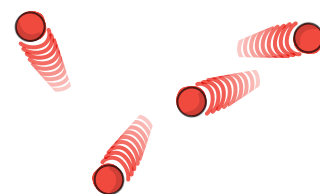
La physique est la science unificatrice qui définit et sous-tend tout ce qui nous entoure. Ses lois universelles et univoques décrivent la mécanique du monde dans lequel nous vivons, l'univers atomique à sa base et le paysage cosmique de l'espace qui nous domine.

C'est sir Isaac Newton (1642-1727), mathématicien et physicien anglais, qui ouvre la voie à une meilleure compréhension du mouvement des objets soumis à des forces extérieures. Reliant physique et mathématiques, il utilise des formules pour exprimer des relations physiques complexes. Il commence à percer les mystères de la gravité, pose les bases de la mécanique classique et esquisse la voie à suivre pour élucider les secrets de la lumière, de la physique quantique, de la relativité et de la cosmologie. Des siècles plus tard, ces mystérieux concepts s'éclairent grâce aux travaux d'esprits brillants des XIX^e et XX^e siècles, tels Albert Einstein, Max Planck et Niels Bohr.

Chaque avancée n'est possible que grâce au travail des générations passées. C'est avec ces travaux que l'homme a pu élaborer les technologies nécessaires aux alunissages, aux communications longue distance et au développement de télescopes terrestres et spatiaux. Sondant sans cesse les confins de l'univers, ces derniers repoussent toujours plus loin les limites de nos connaissances. Les découvertes en physique des particules permettent au XXI^e siècle de reconstituer l'univers quantique et de confirmer l'existence d'étranges particules prédites par la théorie. S'accéléralant de manière exponentielle, la science continue de faire de nouvelles découvertes chaque année.

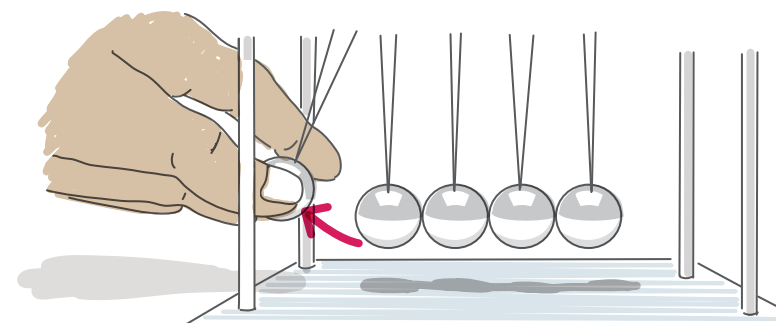
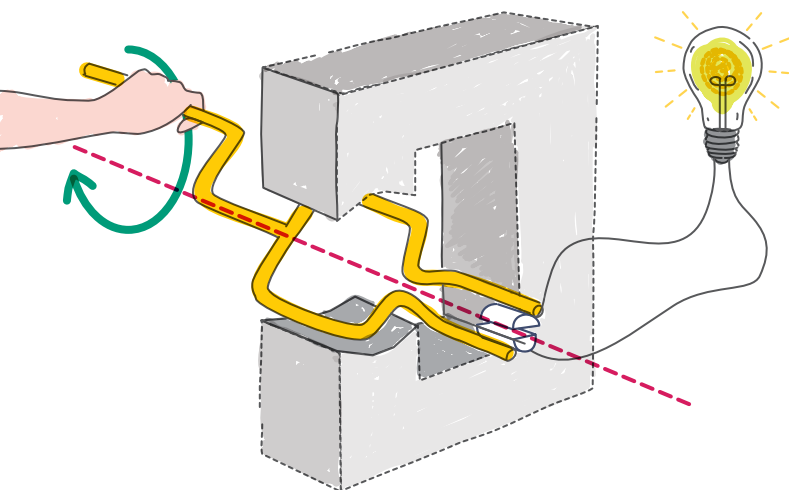


Le noyau, secret du cœur de l'atome, est dévoilé en 1909 par Ernest Rutherford.

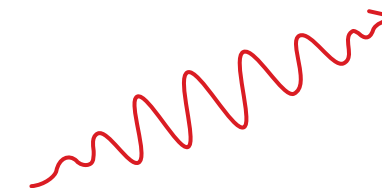


Le trait commun à tous les grands physiciens est la curiosité. La question « comment ça marche ? » cimenter le monde scientifique, et plus des incertitudes sont levées, plus les questions se multiplient. Pour qui partage cette curiosité, le présent ouvrage est une ressource inestimable pour saisir les lois et concepts de base de l'univers. Pour mieux appréhender ces idées souvent complexes, la méthode d'apprentissage visuel proposée présente ces concepts à l'aide d'illustrations et de graphiques détaillés, étayés par un texte clair et riche en informations.

Courant induit lorsqu'on passe un fil conducteur dans un champ magnétique : principe à la base de la production d'électricité.



Le pendule de Newton illustre bien le principe de la conservation de la quantité de mouvement défini dans la première loi de Newton.



Ce volume couvre les sujets enseignés en cours de physique et fournit des bases solides pour s'aventurer plus loin.

Les treize chapitres traitent des domaines spécifiques tels que les forces fondamentales (gravité) et le mouvement (linéaire et de rotation), les lois de conservation de l'énergie régissant l'univers et les champs dans lesquels elles s'appliquent. Ils étudient également en détail l'électricité, l'électromagnétisme (sans lequel le monde moderne ne serait pas où il en est), le comportement des ondes dans tous les milieux, l'univers révélé par l'optique (le Web, par exemple), le pouvoir de la chaleur en thermodynamique et le comportement des fluides, bien

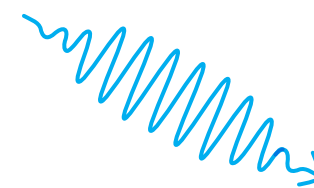
Le moment cinétique d'une patineuse changeant de pose se conserve ; plus elle écarte les bras, moins elle tourne vite.



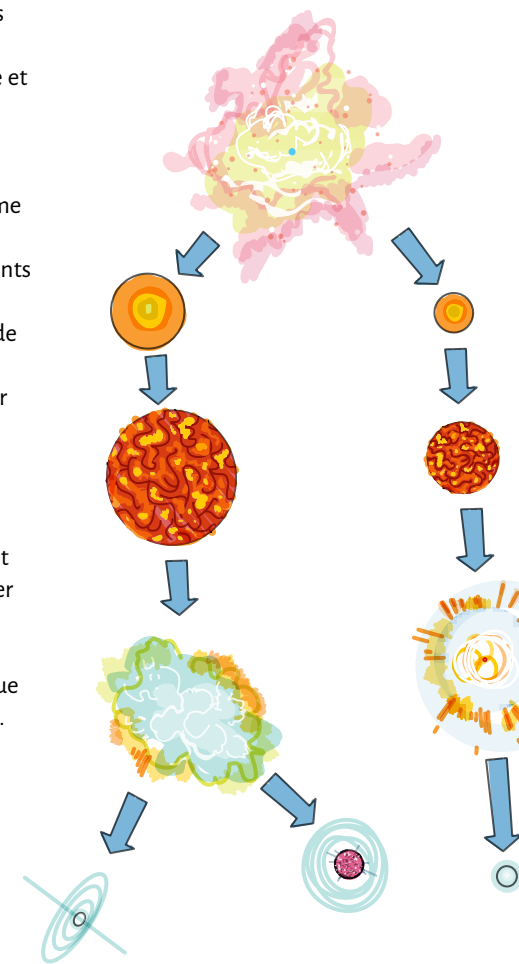
plus complexe que celui des simples liquides.

Les bases acquises, vous pourrez suivre Einstein dans l'univers de la physique du XX^e siècle et vous confronter à la redoutable puissance de l'énergie nucléaire et à l'élégante énigme de la mécanique quantique. Dans le volet sur l'astrophysique, vous découvrirez l'importance extrême de la gravité dans l'immensité du cosmos. Enfin, grâce aux points très précis regroupés dans les récapitulatifs proposés à la fin de chaque chapitre, vous pourrez revoir les notions abordées pour mieux les assimiler.

S'aidant d'explications précises et concises, complétées par des images ciblées, l'ouvrage est structuré de sorte à vous amener peu à peu des bases de la mécanique et des forces aux concepts excitants de la physique et de l'astrophysique modernes.



C'est le début d'un passionnant voyage qui saura attiser votre curiosité, nerf de la découverte. Bonne lecture !

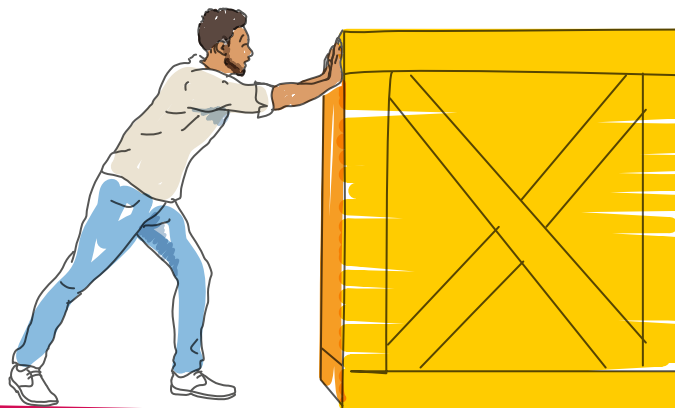


Vie d'une étoile : de la nurserie cosmique à l'étoile à neutrons ou au trou noir en passant par la supernova.

FORCES

On ne peut pas voir les forces, mais elles sont partout et l'on peut en ressentir les effets. Une force peut transmettre une énergie d'un objet à un autre ou simplement maintenir un corps dans une position donnée sans transfert d'énergie. Les forces régissent le mouvement des planètes et lient les atomes pour former des noyaux.

Les forces sont classées dans deux catégories : les forces de contact ou sans contact. Les premières résultent de mécanismes physiques, les secondes d'une action à distance.



QU'EST-CE QU'UNE FORCE ?

L'unité de force reconnue du Système International (SI) est le newton (N). Elle est ainsi nommée en l'honneur du physicien et astronome sir Isaac Newton (1642-1727), qui a donné une définition très simple et scientifiquement exacte du concept de force.

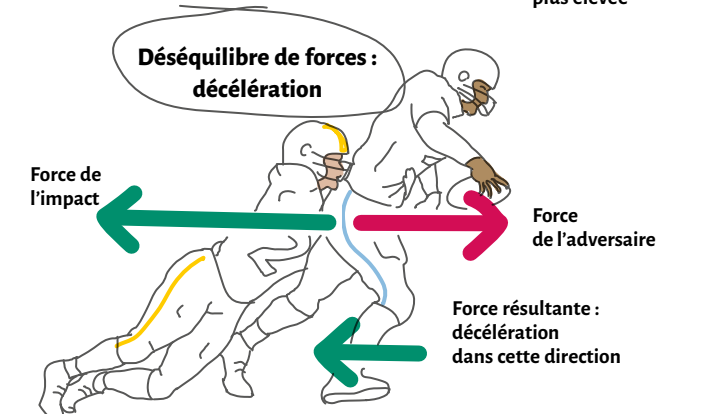
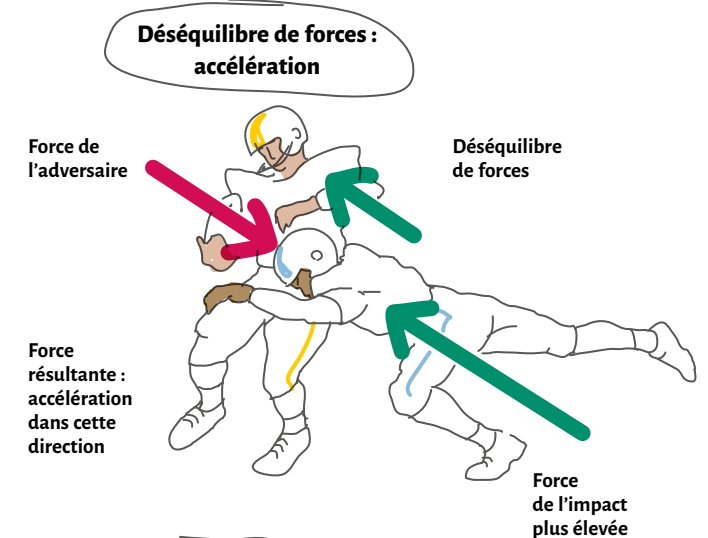
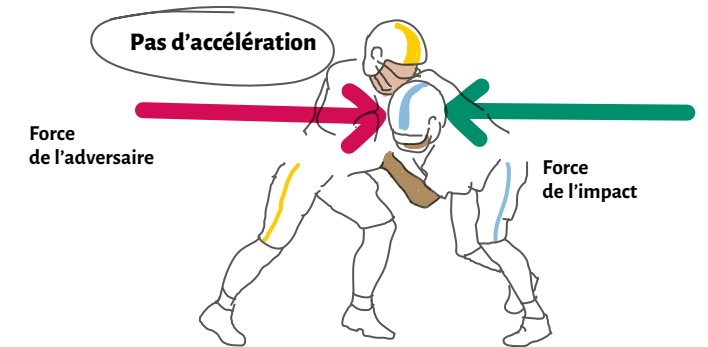
Un objet (appelé « corps » par les physiciens) soumis à des forces dont la somme n'est pas nulle subit une accélération ou une décélération.

Si deux joueurs se percutent avec des forces opposées égales, la force résultante est nulle et il n'y a donc **pas d'accélération**.

On a un **déséquilibre de forces** s'il existe une force résultante dans une direction donnée : le corps accélère ou décélère dans cette direction. De même, si la force résultante est égale à zéro (forces équilibrées), la vitesse du corps (dans une direction donnée) restera inchangée ; il demeurera à l'arrêt (au repos) ou se déplacera à vitesse constante.

Si un joueur percute un adversaire avec une force supérieure à celle imprimée par celui-ci dans la direction opposée, on a un déséquilibre des forces et les deux joueurs vont soit accélérer ou décélérer dans cette direction.

Si une même force est appliquée à un petit et à un grand joueur, le plus grand accélérera moins vite parce qu'il a une masse plus importante. C'est l'effet d'**inertie**.



FORCES DE CONTACT

Les forces de contact résultent de mécanismes physiques dans lesquels la force fournie est au contact du corps concerné. On distingue entre force appliquée (poussée), de traction (tension), de frottement (résistance à l'air), de réaction normale (soutien) et de rappel (ressort).



Appliquée

Traction

Une **force appliquée** ou de poussée peut faire déplacer un corps. Vous poussez par exemple sur une jambe pour avancer en skateboard.

Une équipe de tir à la corde fournit une **force de traction** similaire à une force de poussée, mais en sens contraire. La tension dans la corde résulte de la traction simultanée des deux équipes.

Frottement

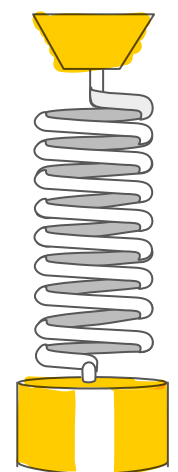


Une **force de frottement** naît de la résistance entre des surfaces pressées l'une contre l'autre. Le frottement s'exerce toujours dans le sens contraire du déplacement et dépend de deux facteurs : la force qui presse les surfaces (souvent le poids) et la nature de ces surfaces (coefficient de frottement). Le coefficient de frottement élevé du caoutchouc permet de prendre des virages en voiture.

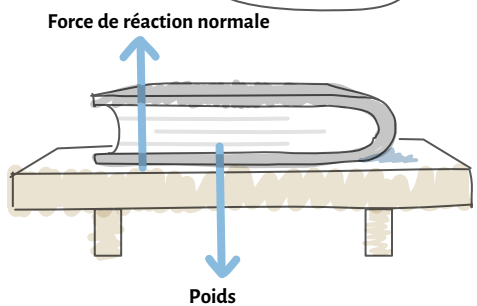
Le frottement peut résulter de la collision de multiples particules d'air avec un corps ; la valeur de cette force, appelée **résistance de l'air**, dépend de la taille du corps et de sa vitesse relative avec l'air.

Types de forces de contact

Rappel



Réaction normale



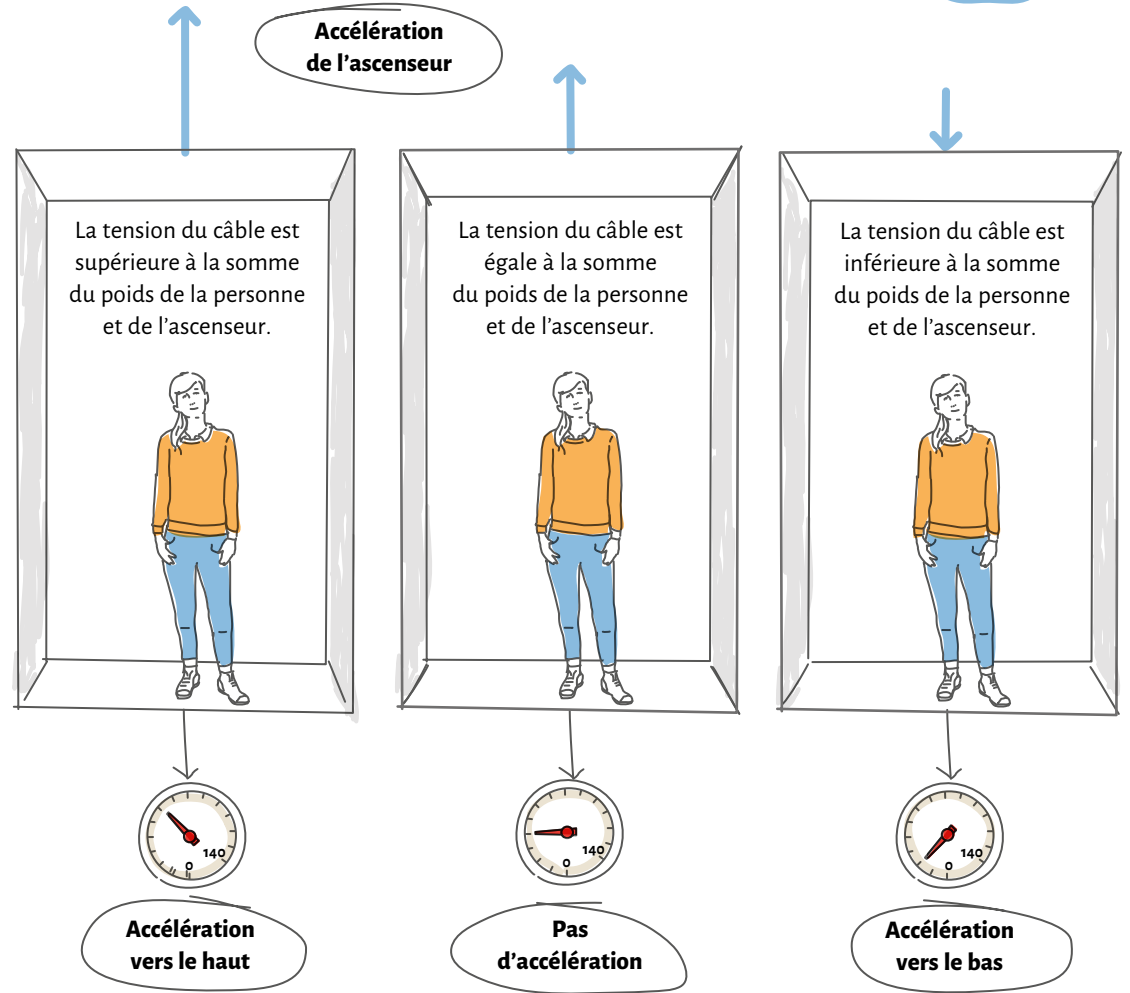
Une **force de réaction normale** est fournie par une surface rigide équilibrant le poids d'un corps, une table soutenant un livre, par exemple.

La **force de rappel** est la force fournie par un matériau élastique qui a été étiré ou comprimé par une force extérieure.

Force de réaction normale

La force de réaction normale empêche un corps de passer à travers une surface. Sur Terre, chaque objet a un **poids** (force liée à la gravité) et accélère vers le bas. Un corps sur une surface rigide immobile subit une force égale opposée à ce poids. Si la masse et donc le poids du corps augmentent, la force de réaction normale augmente également pour le soutenir.

Imaginez que vous êtes dans un ascenseur, debout sur un pèse-personne surveillant votre poids. Lorsque l'ascenseur est à l'arrêt, le poids donné par l'appareil est votre « poids réel ».



Accélération de l'ascenseur

La tension du câble est supérieure à la somme du poids de la personne et de l'ascenseur.

La tension du câble est égale à la somme du poids de la personne et de l'ascenseur.

La tension du câble est inférieure à la somme du poids de la personne et de l'ascenseur.

Accélération vers le haut

Pas d'accélération

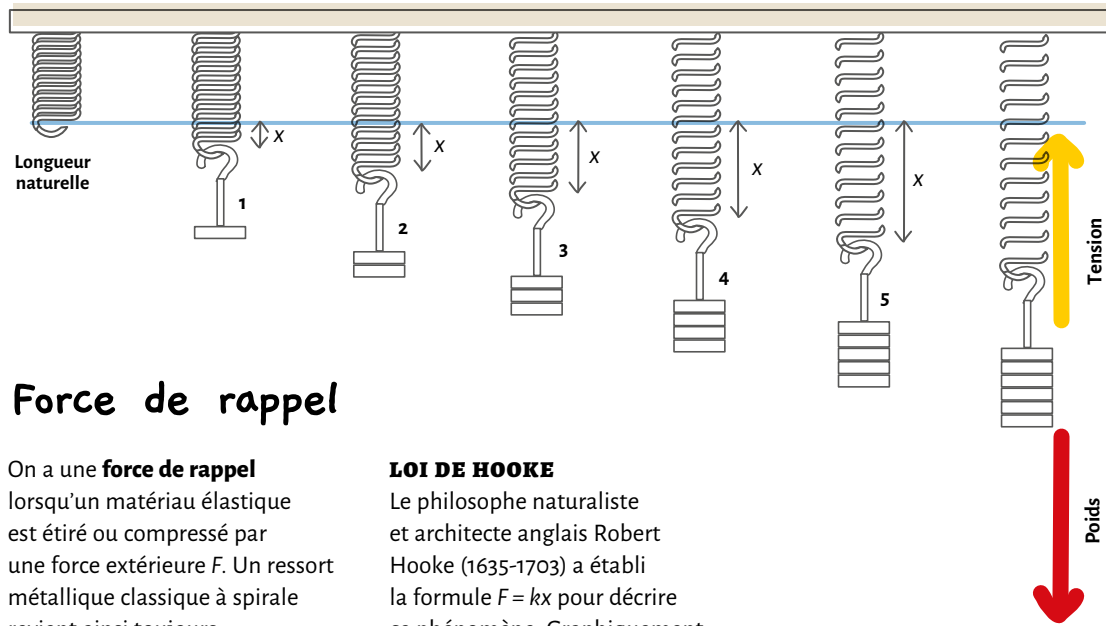
Accélération vers le bas

Le mouvement de l'ascenseur suit la tension dans le câble. Lorsqu'il **accélère** (change de vitesse) vers le haut, le plancher doit soutenir votre poids et fournir une force ascendante pour accélérer votre masse. Dans ce cas, vous sentez plus lourd, ce que confirme le poids indiqué par le pèse-personne.

Lorsque l'ascenseur se déplace à vitesse constante, il n'y a pas d'accélération et le pèse-personne indique votre poids réel.

Lorsque l'ascenseur ralentit (**décélère**), c'est l'inverse du cas à gauche et vous sentez plus léger.

La force que vous sentez dans les pieds varie tout au long du déplacement de l'ascenseur. Elle augmente et diminue au gré de ses variations de vitesse.



Force de rappel

On a une **force de rappel** lorsqu'un matériau élastique est étiré ou comprimé par une force extérieure F . Un ressort métallique classique à spirale revient ainsi toujours à sa longueur naturelle lorsque F cesse. La tension ou force de compression pour retrouver l'état initial est appelée **force de rappel**. La modification de longueur du ressort étiré ou comprimé (x) dépend de deux facteurs : l'intensité de la force appliquée (F) et la raideur du ressort (constante de rappel k).

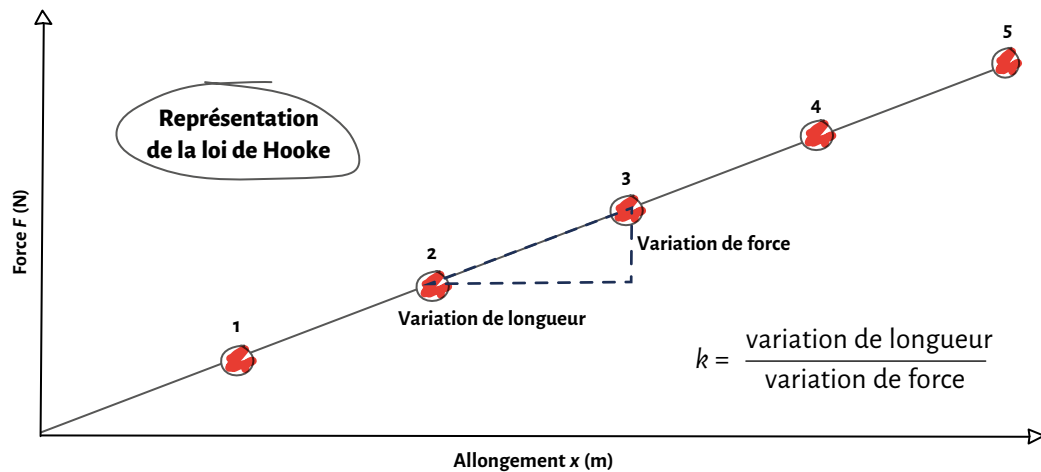
LOI DE HOOKE

Le philosophe naturaliste et architecte anglais Robert Hooke (1635-1703) a établi la formule $F = kx$ pour décrire ce phénomène. Graphiquement, c'est une ligne droite qui part de l'origine et montre qu'une augmentation de la force appliquée entraîne une augmentation uniforme de longueur jusqu'à ce que la limite élastique soit atteinte.

En ce point, le ressort se comporte différemment suivant la tension subie et le matériau qui le compose. La raideur du ressort k est donnée par le **gradient** (pente) de la droite.

La raideur dépend de différents facteurs, comme le type et l'épaisseur du matériau ainsi que le diamètre des spires. En pratique, elle est unique pour chaque ressort et se mesure en newtons par mètre (N/m).

La loi de Hooke ne se limite pas aux seuls systèmes physiques à ressort, elle constitue un bon modèle pour la mécanique vibratoire des atomes au sein d'un matériau et à la physique des ondes. Ces deux systèmes sont régis par l'intensité de la force de rappel par rapport à une position d'équilibre, ce qui les fait osciller.



Vecteurs

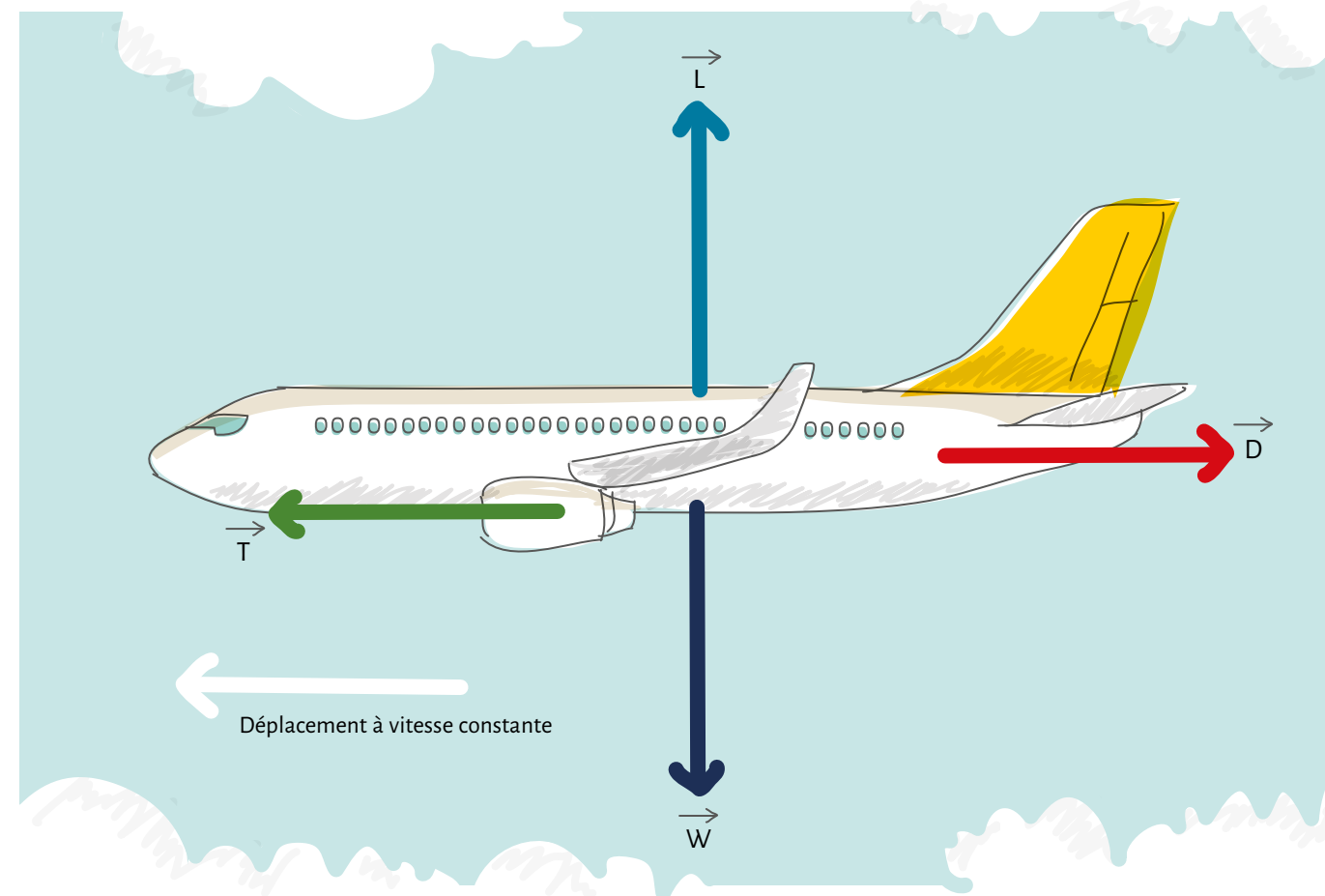
Les physiciens « gèrent » les forces en quantifiant leur valeur et la direction dans laquelle elles agissent. Le déplacement d'un corps sous l'effet d'une force est directement affecté par ces deux paramètres. La méthode internationalement reconnue pour les représenter s'appuie sur l'utilisation de vecteurs.

Les vecteurs sont un moyen efficace de visualiser les forces agissant sur un corps et un outil très utile pour comprendre l'effet de forces multiples

sur le mouvement final d'un corps. On calcule par exemple la force résultante agissant sur un corps en les additionnant.

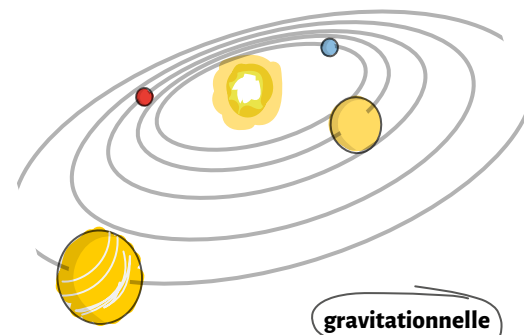
Un **vecteur** est représenté par une flèche partant du point d'application de la force. Sa longueur indique l'intensité de cette force et la direction vers laquelle elle s'applique. À chaque vecteur est associée une lettre, généralement surmontée d'une flèche pointant vers la droite pour l'identifier dans les calculs. Ainsi, le poids est habituellement représenté par \vec{W} .

Souvent, un corps est soumis à plusieurs forces, représentées par plusieurs flèches. Un avion volant à vitesse constante est soumis à plusieurs forces : **poussée** (T) des moteurs, **traînée** (D) liée à la résistance de l'air, poids de l'avion (W) et **portance** (L).



FORCES À DISTANCE

Les forces sans contact (ou à distance) agissent sur un objet sans le toucher. Leur intensité varie fortement avec la distance par rapport à ce corps. Ce sont les forces de gravitation (poids), électrostatique, magnétique et nucléaire.



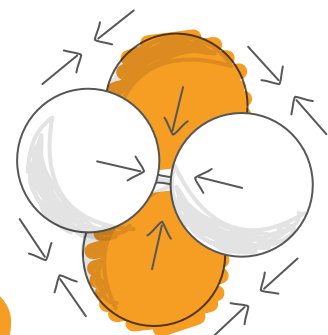
gravitationnelle

La force de **gravitation** correspond à l'interaction s'exerçant entre deux corps quelconques dans l'univers. Liant galaxies et systèmes stellaires, elle confère aux corps leur poids sur les planètes. Toujours attractive, cette force dépend de deux facteurs : les masses des deux corps concernés et la distance qui les sépare. Plus ces masses sont importantes et plus les corps sont proches, plus la force d'attraction est élevée.

Types de forces à distance

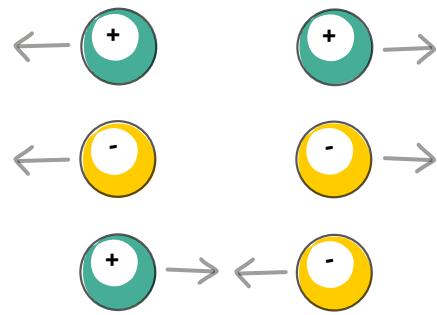
nucléaire

La force **nucléaire** permet aux atomes de se lier pour former des éléments. Cette force gigantesque qui ne s'exerce qu'à d'infimes distances (environ 10^{-15} m) est assez puissante pour surmonter la répulsion électrostatique subie par les protons à ces mêmes distances.

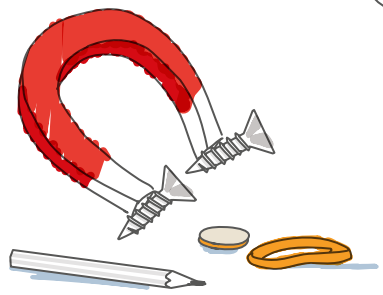


électrostatique

La force **électrostatique** est ressentie uniquement entre particules chargées. Elle exerce une attraction (charges de signes opposés) ou une répulsion (de même signe) et dépend de la valeur des charges et de la distance qui les sépare. Un corps de charge nulle ne subit pas de force électrostatique.



magnétique



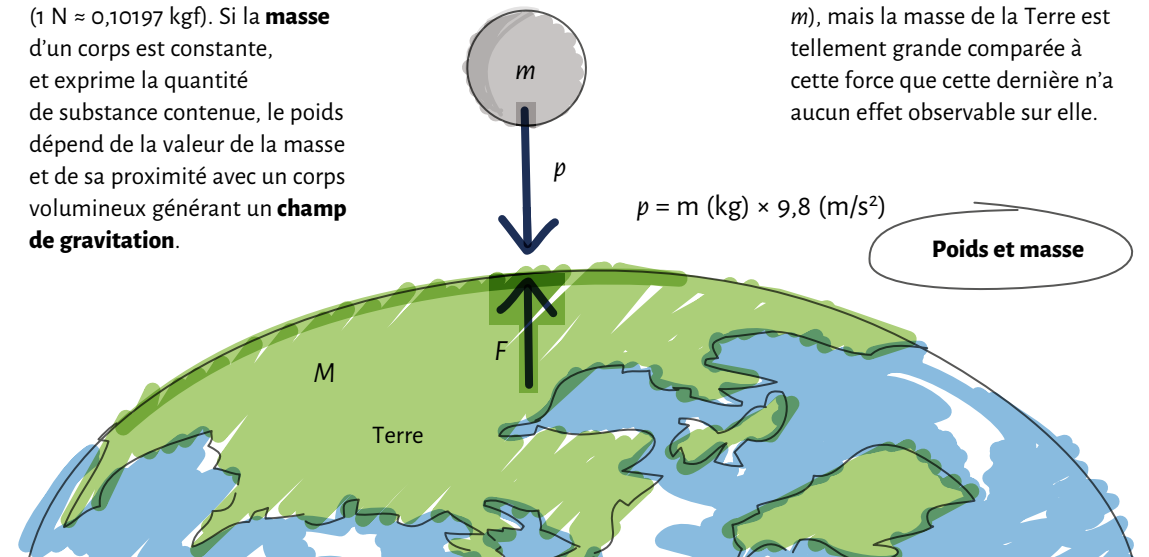
La force **magnétique** exige la présence d'un champ magnétique et n'affecte que certains matériaux (métaux essentiellement). Son intensité dépend du type de matériau et de sa proximité avec le champ magnétique. Elle peut attirer ou repousser les corps entre eux.

Poids

Poids (force due à la gravité) et masse sont deux choses distinctes. Si la masse est mesurée en kilogrammes, le poids, qui est une force, est mesuré en newtons ($1 \text{ N} \approx 0,10197 \text{ kgf}$). Si la **masse** d'un corps est constante, et exprime la quantité de substance contenue, le poids dépend de la valeur de la masse et de sa proximité avec un corps volumineux générant un **champ de gravitation**.

L'intensité du champ de gravité g donne la force en newtons subie par chaque kilogramme de masse. Sur (ou près de) la Terre, chaque

kilogramme a un poids d'environ 9,8 newtons ($g = 9,8 \text{ N/kg}$). En fait, une force d'attraction de même valeur (P et F) agit sur la Terre (masse M) et sur le corps (masse m), mais la masse de la Terre est tellement grande comparée à cette force que cette dernière n'a aucun effet observable sur elle.



$$p = m \text{ (kg)} \times 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

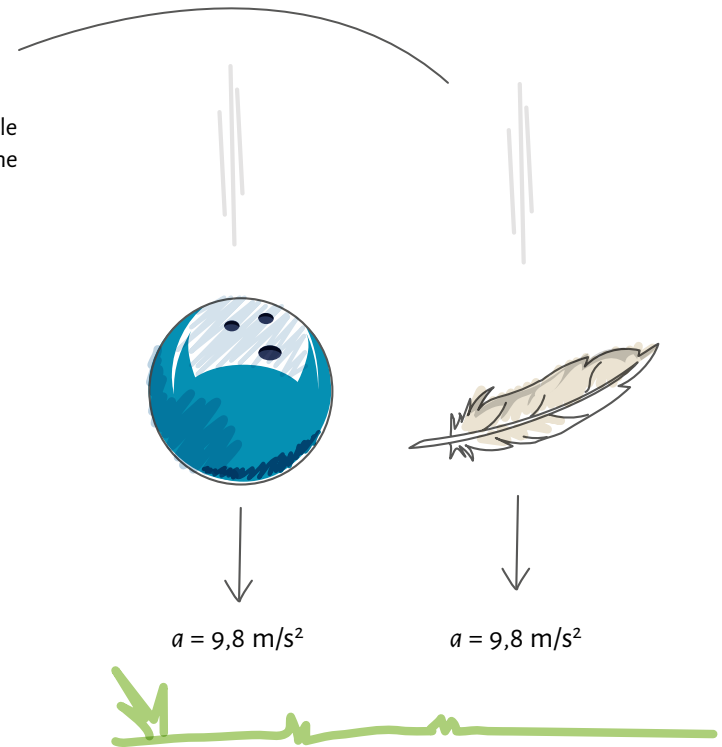
Poids et masse

Quel corps tombe le plus vite ?

Si on laisse tomber un corps, il accélère vers le sol de $9,8 \text{ m/s}^2$ à chaque seconde (m/s^2). Cela s'applique à tout objet, quelle que soit sa masse. Si l'on supprime l'effet de la résistance de l'air, une boule de bowling et une plume lâchées tombent en effet ensemble vers le sol avec une accélération identique.

Ce concept contraire à l'intuition résulte directement de la deuxième loi de Newton (cf. p. 23). La boule de bowling subit une force bien plus élevée que la plume.

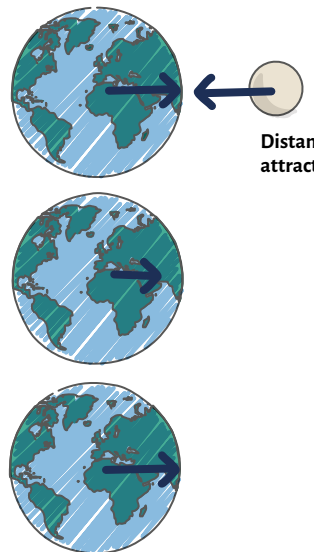
Elle a en fait besoin de cette plus grande force, proportionnelle à sa masse, pour accélérer cette dernière.



Force gravitationnelle

C'est encore à Newton que l'on doit la loi sur la force liée à la **gravité**. Il a établi que l'attraction entre deux masses est proportionnelle au produit de ces masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Pour résumer, l'intensité de la force ressentie entre deux corps augmente considérablement à mesure qu'ils se rapprochent et varie proportionnellement à leurs masses.

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

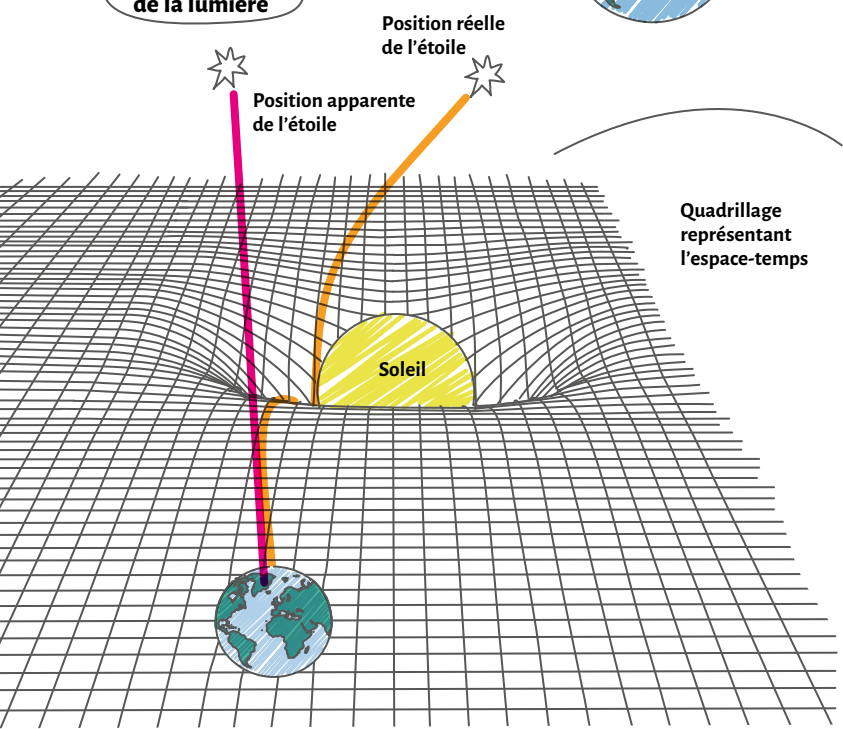


Distance faible, attraction forte

Distance élevée, attraction faible

Masse élevée, attraction plus forte

Déviations de la lumière

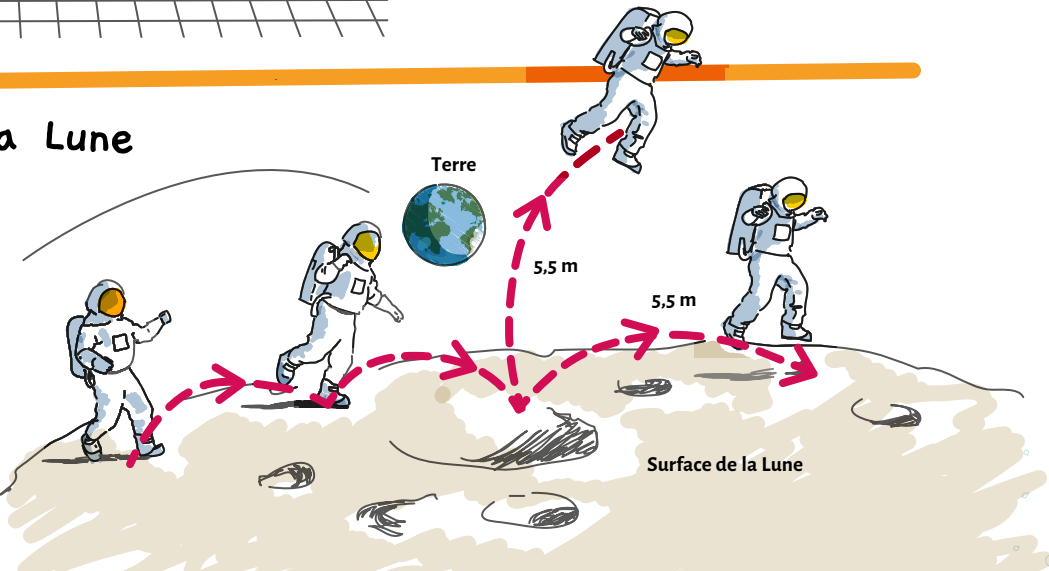


F est l'intensité de la force en N, m_1 et m_2 les masses des corps en kg, r la distance qui les sépare en m et G la **constante de gravitation**. Cette valeur très faible (env. $6,67 \times 10^{-11}$) montre que les forces d'attraction entre deux masses ne sont significatives que si l'une d'entre elles ou les deux sont très élevées (planète ou étoile, par exemple). L'interaction entre de petites masses est si infime que les effets de la gravitation sont quasi indécélables.

La présence de masses importantes provoque localement certains effets sur l'espace-temps. Elle le déforme et va même jusqu'à dévier la lumière.

Des bonds sur la Lune

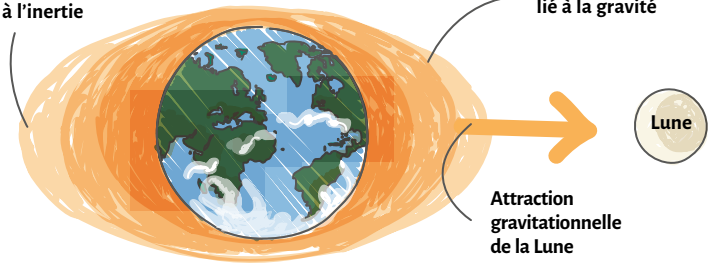
Sur la Lune, la gravité est six fois moins élevée que sur Terre. Si vous pesez 45 kg sur Terre, vous auriez la même masse sur la Lune, mais un poids de seulement 7,7 kg. Si vous sautez à 1 mètre de haut sur Terre, vous pourriez atteindre 5,5 mètres sur la Lune.



La Lune et la Terre exercent l'une sur l'autre des forces égales et opposées entraînant la déformation de tout fluide (dont l'eau).

Gonflement des océans lié à l'inertie

Lune et marées

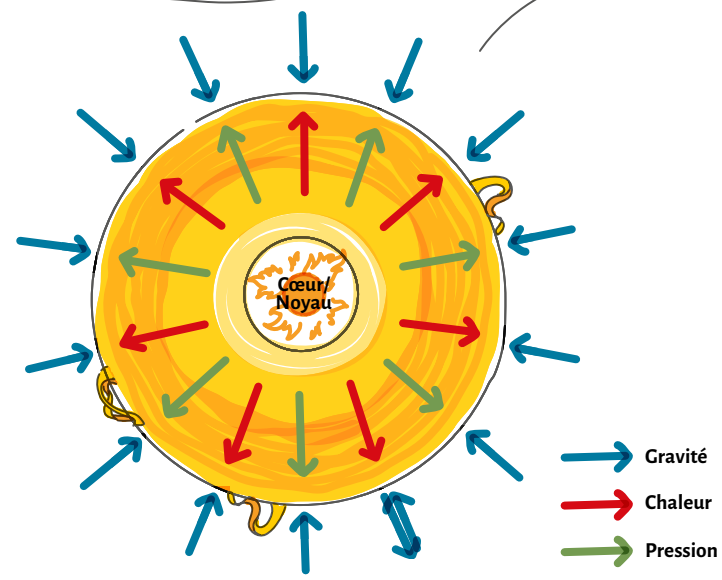


Sur de grandes étendues des océans, la force d'attraction de la Lune (**force de marée**) entraîne un gonflement des surfaces les plus proches d'elle. Sur la face opposée, deux effets coexistent : l'attraction

de la Lune plus faible du fait de l'éloignement plus important et l'inertie de l'eau en mouvement

orbital (liée à la rotation de la Terre). Ces effets créent un autre gonflement. Cela explique les variations de niveau des océans sur chaque face de la Terre.

D'où vient la cohésion des étoiles ?



La fusion de l'hydrogène au cœur d'une étoile libère une énergie énorme, générant une pression vers l'extérieur liée au champ de rayonnement. Celle-ci, couplée à la **pression du gaz**, équilibre la force de gravité inhérente à la masse de l'étoile. Les étoiles petites à moyennes deviennent des sphères stables pour des milliards d'années. Elles sont en **équilibre hydrostatique**. Lorsque les réserves d'hydrogène du cœur s'épuisent, il n'y a plus de production d'énergie ni de pression de rayonnement. L'étoile devient instable. La gravité étant prépondérante, elle entraîne son effondrement.

Les objets sont maintenus au sol sur Terre (et d'autres planètes) par la gravité. Elle permet aux satellites artificiels et naturels d'orbiter autour des planètes et à celles-ci d'orbiter autour des étoiles. Elle assure la cohésion de galaxies à partir de la masse de leurs étoiles et décidera un jour du sort de l'univers tout entier.

La gravité est essentielle à notre existence, mais ses origines restent un mystère. On pense que le *graviton*, particule hypothétique que l'on n'a pas encore pu détecter, serait responsable de la transmission de la gravité.

