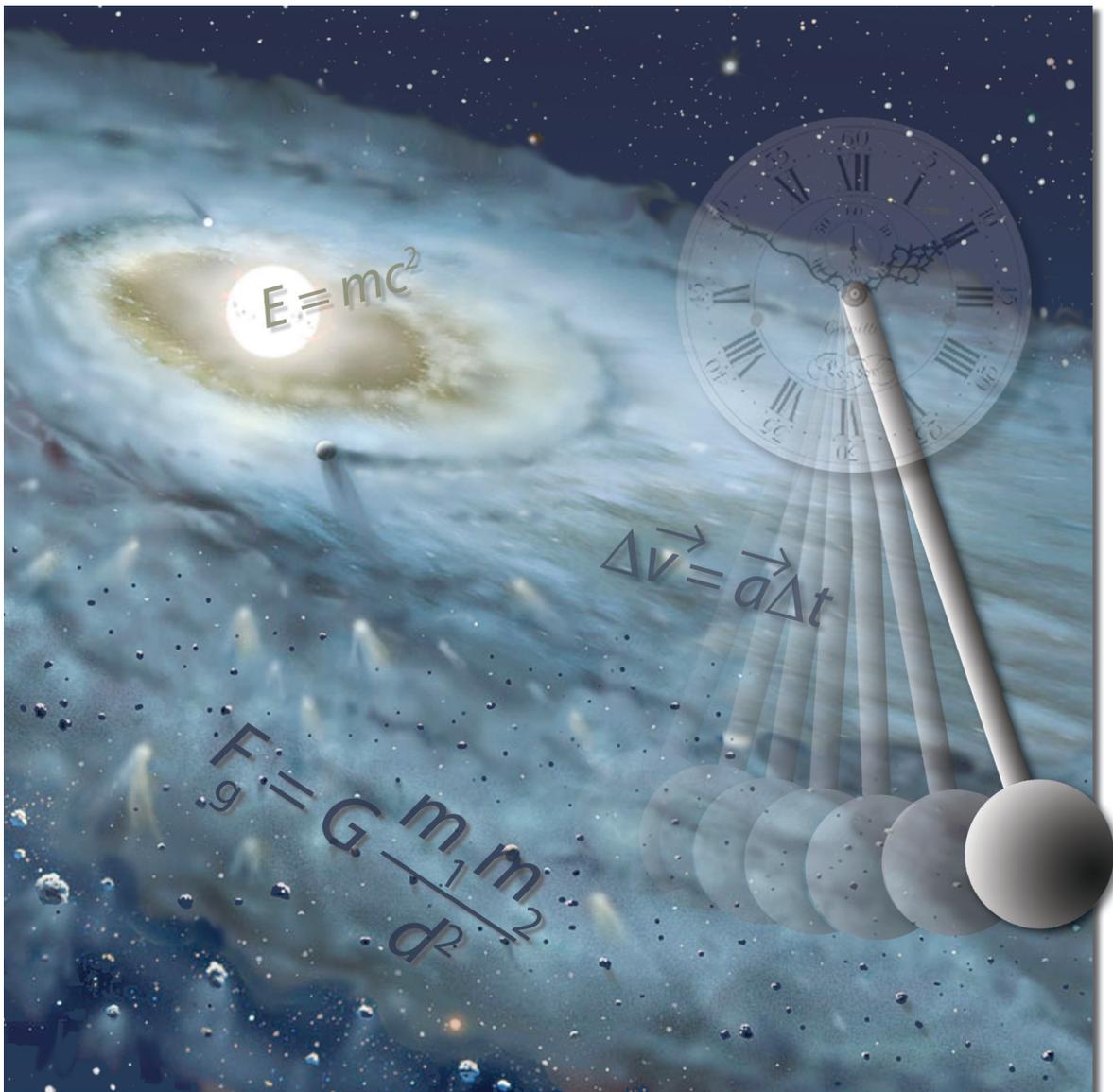


Force et énergie

PHY-5043-2

Guide d'apprentissage



sofad

NOTE

Vous trouverez l'élément suivant à la fin du guide.

- Une fiche de commentaires

FORCE ET ÉNERGIE

PHY-5043-2
GUIDE D'APPRENTISSAGE

Force et énergie est le troisième des trois guides d'apprentissage correspondant aux trois cours du programme d'études Physique 5^e secondaire qui comprend :

Optique

Cinématique et quantité de mouvement

Force et énergie

Le premier guide est accompagné du cahier *Activités expérimentales d'optique* et les deux suivants par *Activités expérimentales de mécanique*. Ces cahiers couvrent le volet « démarche expérimentale » du programme.

FORCE ET ÉNERGIE

Ce guide a été réalisé par la Société de formation à distance des commissions scolaires du Québec (SOFAD).

Chargé de projets	Jean-Simon Labrecque (SOFAD)
Chargée de projets (Édition initiale)	Mireille Moisan (SOFAD)
Rédaction	Régent Bouchard (Interscience)
Illustrations	Gail Weil Brenner (GWB)
Révision de contenu	André Dumas Bernard Tousignant
Révision linguistique	Dominique Chauveau
Mise en pages et infographie	Daniel Rémy (I. D. Graphique inc.)
Lecture d'épreuves	Dominique Chauveau
Première édition	Décembre 2002



Juin 2011

La forme masculine utilisée dans le présent document désigne aussi bien les femmes que les hommes et a pour but d'alléger le texte.

© Société de formation à distance des commissions scolaires du Québec

Tous droits de traduction et d'adaptation, en totalité ou en partie, réservés pour tous pays. Toute reproduction, par procédé mécanique ou électronique, y compris la microreproduction, est interdite sans l'autorisation écrite d'un représentant dûment autorisé de la Société de formation à distance des commissions scolaires du Québec.

Dépôt légal - 2002

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

ISBN 978-2-89493-242-1

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PRÉSENTATION	0.12
--------------------	------

CHAPITRE 1 – DES EFFETS À DISTANCE

1.1 – LES FORCES	1.3
Forces de contact et forces à distance	1.5
Les forces de contact	1.6
Les forces à distance	1.7
Zoom sur le noyau	1.9
De cinq à quatre	1.11
Vers une force unique	1.15
En résumé	1.15
1.2 – QU’EST-CE QU’UNE FORCE?	1.16
Les effets d’une force	1.16
La définition d’une force	1.18
1.3 – JE T’ATTIRE, TU M’ATTIRES, IL L’ATTIRE	1.20
La force des astres	1.21
L’inverse du carré de la distance et la loi de la gravitation universelle	1.22
Les marées	1.28
Quatre marées dans l’océan Atlantique	1.28
Deux marées dans l’océan Pacifique	1.29
Les marées du fleuve Saint-Laurent	1.29
Marées et « Force de Coriolis »	1.30
1.4 – LA PESANTEUR, UN CAS PARTICULIER	1.30
Activité expérimentale 1 – La force gravitationnelle	1.31
À un rayon terrestre	1.31
La valeur de g , une constante pas si constante	1.33
En latitude	1.34
En altitude	1.35
La Station spatiale internationale	1.36
L’état d’impesanteur	1.38
La recherche en microgravité	1.39
L’envers de la médaille	1.39
Destination Mars	1.40
Masse et poids	1.42
Un pèse-personne interplanétaire	1.44

Table des matières

Les trous noirs	1.44
Mots clés du chapitre	1.47
Résumé	1.47
Exercices de synthèse	1.49
CHAPITRE 2 – À LA RECHERCHE DE L'ÉQUILIBRE, DE GALILÉE À NEWTON	2.1
2.1 – LES FORCES	2.3
L'aspect vectoriel d'une force	2.3
Quantité scalaire et quantité vectorielle	2.4
Représentation	2.5
L'addition vectorielle	2.9
Objets soumis à plusieurs forces	2.12
Le centre de gravité	2.14
2.2 – L'ÉQUILIBRE DE TRANSLATION	2.16
Les conditions d'équilibre	2.17
Au repos	2.17
En mouvement	2.17
La première loi de Newton	2.18
L'expérience virtuelle de Galilée	2.19
L'équilibre de translation	2.20
Méthode du polygone	2.22
Méthode du parallélogramme	2.23
La force équilibrante	2.29
L'équilibre, un outil de travail	2.32
2.3 – PLUS VITE ! MOINS VITE!	2.38
La deuxième loi de Newton	2.39
Activité expérimentale 2 – La deuxième loi de Newton	2.41
Application de la deuxième loi de Newton	2.42
L'impulsion et la quantité de mouvement	2.48
La deuxième loi de Newton et le mouvement	2.53
Les équations du mouvement	2.53
Applications de la deuxième loi de Newton	2.54
2.4 – ACTION-RÉACTION	2.59
La troisième loi de Newton	2.60
Le vol à réaction	2.64
Mots clés du chapitre	2.70
Résumé	2.70
Exercices de synthèse	2.72

CHAPITRE 3 – DE L'ÉNERGIE AU TRAVAIL	3.1
3.1 – AU TRAVAIL!	3.3
Le travail	3.5
L'équation du travail	3.5
Le travail, une quantité scalaire	3.6
Analyse graphique	3.9
Travailler, oui mais pourquoi?	3.11
Travailler pour glisser	3.12
Travailler pour soulever	3.13
Travailler pour accélérer	3.17
Travailler pour déformer, la loi de Hooke	3.19
Activité expérimentale 3 – Le ressort	3.21
La constante de rappel	3.21
Ressorts de tous genres	3.23
Le travail pour déformer	3.24
3.2 – L'ÉNERGIE MÉCANIQUE	3.27
Formes d'énergie	3.27
De l'énergie grâce à la position	3.28
L'énergie potentielle gravitationnelle	3.28
Énergie potentielle élastique	3.30
De l'énergie grâce au mouvement	3.32
3.3 – TRANSFERT ET CONSERVATION	3.35
La conservation d'énergie	3.37
Un exemple de la loi de la conservation de l'énergie : le pendule	3.39
Analyse de l'énergie du pendule	3.40
3.4 – LA CONSERVATION D'ÉNERGIE, UN OUTIL INDISPENSABLE	3.45
Mots clés du chapitre	3.49
Résumé	3.49
Exercices de synthèse	3.51
CHAPITRE 4 – LA RÉSISTANCE AU MOUVEMENT	4.1
4.1 – LE FROTTEMENT, UNE FORCE QUI RÉSISTE	4.3
Qu'est-ce que le frottement?	4.3
Le vecteur \vec{F}_{fr}	4.4
4.2 – LES FACTEURS DU FROTTEMENT	4.6
Activité expérimentale 4 – Le frottement statique	4.6
4.3 – SURFACES SOLIDES EN CONTACT	4.9
Le frottement statique et le frottement cinétique	4.9
Les coefficients de frottement	4.11

Table des matières

Calcul du coefficient de frottement	4.12
4.4 – L’AIR, UN MILIEU RÉSISTANT	4.18
Une question de vitesse	4.19
Une chute pas si libre	4.23
L’aérodynamique	4.27
L’aérodynamique sur terre	4.28
L’aérodynamique dans les airs	4.29
La voile	4.33
Le Frisbee®	4.35
La balle courbe	4.36
Mots clés du chapitre	4.38
Résumé	4.38
Exercices de synthèse	4.40
CHAPITRE 5 – ET POURTANT, IL FLOTTE!	5.1
5.1 – METTEZ-Y DE LA PRESSION!	5.3
La pression	5.3
La pression dans un fluide	5.6
La masse volumique	5.7
Mesure de la pression, le manomètre	5.13
La pression atmosphérique	5.15
L’expérience de Magdebourg	5.22
Le principe de Pascal	5.22
5.2 – LE PRINCIPE D’ARCHIMÈDE	5.27
Activité expérimentale 5 – La poussée d’Archimède	5.28
La poussée d’Archimède	5.29
Objets flottants identifiés	5.32
Eurêka!	5.38
5.3 – LA POUSSÉE D’ARCHIMÈDE ET LA TECHNOLOGIE	5.42
Avec les poissons	5.42
Avec les oiseaux	5.43
Le dirigeable	5.45
Mots clés du chapitre	5.47
Résumé	5.47
Exercices de synthèse	5.49

CHAPITRE 6 – LES MACHINES, UNE RÉUSSITE DE L'HUMANITÉ	6.1
6.1 – LES MACHINES	6.3
Le levier	6.5
Activité expérimentale 6 – Le levier	6.6
La loi des leviers	6.6
Les trois types de leviers	6.15
La roue	6.21
Le treuil	6.23
La poulie	6.25
Le palan	6.29
Le plan incliné	6.30
La vis	6.35
Les machines composées	6.37
6.2 – LA TRANSMISSION DE LA FORCE ET DU MOUVEMENT	6.40
Une transmission directe	6.40
Pour plus de mordant	6.43
L'avantage mécanique d'un engrenage	6.44
Une transmission assistée	6.47
6.3 – TRAVAIL, ÉNERGIE, RENDEMENT ET PUISSANCE	6.48
Travail et énergie, un retour	6.48
Le rendement d'une machine	6.49
La puissance d'une machine	6.53
6.4 – MACHINES, HISTOIRE ET SOCIÉTÉ	6.54
Mots clés du chapitre	6.57
Résumé	6.57
Exercices de synthèse	6.60
CONCLUSION	C.1
ÉPREUVE D'AUTOÉVALUATION	C.5
CORRIGÉ DES EXERCICES	C.33
ANNEXE A – SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS, FORMULES ET CONSTANTES	C.105
Grandeurs, unités et symboles	C.105
Formules	C.106
Constantes	C.107
Multiples et sous-multiples des unités du SI	C.107
ANNEXE B – RAPPORT ET PROPORTION	C.108
Rapport	C.108
Proportion	C.108

Table des matières

ANNEXE C – RELATION DE PROPORTIONNALITÉ	C.110
Relation directement proportionnelle	C.110
Relation inversement proportionnelle	C.111
Relation inversement proportionnelle au carré	C.112
ANNEXE D – NOTATION SCIENTIFIQUE	C.113
ANNEXE E – LOI DES EXPOSANTS	C.114
ANNEXE F – TRANSFORMATION DES FORMULES	C.115
ANNEXE G – ADDITION ET SOUSTRACTION DE FRACTIONS	C.116
ANNEXE H – THÉORÈME DE PYTHAGORE	C.118
ANNEXE I – RAPPORTS TRIGONOMÉTRIQUES	C.120
Définition des rapports trigonométriques	C.120
Évaluation des rapports trigonométriques à l'aide de la calculatrice	C.120
Calcul de l'angle à partir de la valeur d'un rapport trigonométrique	C.121
Exemples de calculs à l'aide des rapports trigonométriques	C.122
ANNEXE J – CALCUL DE TEMPS	C.125
Les conversions	C.125
Des secondes à traduire en minutes ou en heures	C.125
Des minutes aux heures	C.126
Des décimales aux minutes et aux secondes	C.126
Additionner des temps	C.127
Soustraire des temps	C.128
ANNEXE K – LISTE DES FIGURES	C.130
BIBLIOGRAPHIE	C.136
VOCABULAIRE	C.137
INDEX	C.145

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PRÉSENTATION

La Société de formation à distance des commissions scolaires du Québec (SOFAD) vous souhaite la bienvenue au cours *Force et énergie*. Ce cours fait partie du programme *Physique 5^e secondaire* qui comprend les trois cours suivants :

PHY-5041-2 *Optique*

PHY-5042-2 *Cinématique et quantité de mouvement*

PHY-5043-2 *Force et énergie*

Le programme d'études de physique comporte trois volets : le contenu notionnel, la démarche expérimentale et la perspective histoire-technologie-société. Nous abordons le volet de la démarche expérimentale dans deux cahiers portant spécifiquement sur les activités expérimentales. Le contenu notionnel et la perspective histoire-technologie-société sont examinés dans trois guides d'apprentissage correspondant aux trois cours du programme qui doivent être suivis obligatoirement dans l'ordre.

Le guide d'apprentissage *Force et énergie* est le dernier d'une série de trois. Il se divise en six chapitres. Ce guide doit être utilisé avec le cahier *Activités expérimentales de mécanique*. Les références à ce cahier sont données dans le guide au moment opportun.

Le cours *Force et énergie* a pour objectif général d'améliorer la compréhension de la dynamique ainsi que des aspects techniques et des changements sociaux associés au développement de la dynamique.

CONSIGNES D'UTILISATION

Le présent guide d'apprentissage constitue votre principal instrument de travail pour le cours *Force et énergie*. Il a été conçu de manière à tenir compte le plus possible des conditions et des particularités des élèves adultes travaillant en apprentissage individualisé ou en formation à distance.

Chacun des chapitres présente des situations d'apprentissage diverses (textes, tableaux, illustrations, exercices, etc.) permettant de maîtriser les différents objectifs. De plus, à la fin de chacun des chapitres se trouve une liste des mots clés du chapitre, un résumé ainsi que des exercices de synthèse.

La conclusion du guide vous propose une synthèse de l'ensemble des cours du programme suivie d'une épreuve d'autoévaluation. Elle regroupe aussi le corrigé de cette épreuve, celui des exercices de chacun des chapitres ainsi que celui des exercices de synthèse. Elle présente également des annexes, une bibliographie que vous pourrez consulter afin d'approfondir vos apprentissages, un vocabulaire comprenant la définition des mots clés et un index.

LES ACTIVITÉS D'APPRENTISSAGE

Le présent guide comprend une partie théorique ainsi que des activités pratiques sous forme d'exercices accompagnés d'un corrigé.

Pour mener à bien l'étude de chacun des chapitres, commencez par faire un survol rapide de l'ensemble des sections afin d'en examiner le contenu et les principales parties. Puis, lisez attentivement la théorie :

- surlignez les points importants ;
- prenez des notes dans les marges ;
- cherchez les mots nouveaux dans un dictionnaire ;
- résumez les passages importants dans votre cahier de notes ;
- portez attention aux figures ;
- notez vos questions, si vous ne comprenez pas une idée.

LES EXERCICES

Les exercices sont accompagnés d'un corrigé qui se trouve à la fin du guide, sur des feuilles de couleur.

- Faites tous les exercices proposés.
- Lisez attentivement les directives et les questions avant d'inscrire votre réponse.
- Faites tous les exercices de votre mieux, sans consulter le corrigé. Relisez les questions et vos réponses et modifiez ces dernières, s'il y a lieu. Ensuite, reprenez vos réponses en les comparant avec celles du corrigé et essayez de comprendre vos erreurs, le cas échéant.
- Afin de mieux vous préparer à l'évaluation finale, complétez l'étude de votre chapitre avant d'entreprendre les exercices de synthèse, puis faites ces exercices sans consulter le texte du guide.

L'ÉPREUVE D'AUTOÉVALUATION

L'épreuve d'autoévaluation est une étape de préparation à l'évaluation finale. Avant de vous y attaquer, vous devrez compléter votre étude : relisez votre cahier de notes et les définitions des mots clés des chapitres, mettez-les en relation avec les objectifs du cours cités au début de chacun des chapitres. Assurez-vous de bien comprendre le sens de ces objectifs. Faites ensuite l'épreuve d'autoévaluation sans consulter le texte du guide ni le corrigé. Puis, comparez vos réponses avec celles du corrigé et complétez votre étude au besoin.

LES ANNEXES

Les annexes regroupent des renseignements utiles à votre cheminement ainsi que quelques rappels de notions préalables. L'annexe A « Système international d'unités, formules et constantes » présente une synthèse des formules et symboles utilisés dans le guide. Vous trouverez la liste complète des annexes à la table des matières.

LE MATÉRIEL

Ayez sous la main tout le matériel dont vous aurez besoin.

- Matériel didactique : votre guide accompagné d'un cahier de notes où vous consignerez en résumé les notions importantes à retenir en relation avec la liste des objectifs donnée au début de chacun des chapitres. Dans certaines situations, vous devrez aussi utiliser le cahier *Force et énergie*.
- Matériel de référence : un dictionnaire.
- Matériel divers : une calculatrice, un crayon à la mine pour inscrire vos réponses et vos notes dans votre guide, un stylo-bille de couleur pour corriger vos réponses, un surligneur (ou un crayon-feutre de couleur pâle) pour souligner les idées importantes, une règle, une gomme à effacer, etc.

ÉVALUATION

Si vous désirez obtenir des unités rattachées à un diplôme d'études secondaires, vous devez obtenir une note d'au moins 60 % à une évaluation finale qui a lieu dans un centre d'éducation des adultes.

L'évaluation pour le cours *Force et énergie* se divise en deux parties.

L'une des parties est une épreuve écrite d'une durée maximale de 120 minutes. Vous y trouverez des items à réponse choisie, à réponse courte ou à développement. Elle compte pour 70 % de la note finale et porte sur l'étude des objectifs de ce guide. L'utilisation de la calculatrice est permise.

L'autre partie est réservée spécifiquement à l'évaluation de la démarche expérimentale. Il s'agit d'une épreuve à la fois pratique et écrite d'une durée maximale de 90 minutes. Cette épreuve compte pour 30 % de la note finale et porte sur les objectifs étudiés dans la section C du cahier *Activités expérimentales de mécanique*. Vous y trouverez des items à réponse courte et des items à développement.

AUX ÉLÈVES INSCRITS EN FORMATION À DISTANCE

LE RYTHME DE TRAVAIL

Voici quelques suggestions qui vous aideront à organiser votre temps d'étude.

- Établissez un horaire d'étude en tenant compte de vos dispositions et de vos besoins, ainsi que de vos obligations familiales, professionnelles et autres.
- Essayez de consacrer quelques heures par semaine à l'étude, de préférence en blocs de deux heures chaque fois.
- Respectez autant que possible l'horaire que vous avez choisi.

VOTRE TUTEUR

Votre tuteur est la personne qui vous soutient dans votre démarche : il demeure à votre disposition pour répondre à vos questions, corriger et annoter vos devoirs.

En fait, c'est la personne-ressource à qui vous faites appel en cas de besoin. Si ses heures de disponibilité et ses coordonnées ne vous ont pas été transmises avec ce guide, elles le seront bientôt. N'hésitez pas à la consulter si vous éprouvez des difficultés avec la théorie ou les exercices, ou si vous avez besoin d'encouragement pour poursuivre votre étude. Notez vos questions par écrit et communiquez avec elle pendant ses heures de disponibilité et, au besoin, écrivez-lui.

Votre tuteur vous guide tout au long de votre apprentissage et vous fournit les conseils, les critiques et les commentaires susceptibles d'assurer le succès de votre projet de formation.

LES DEVOIRS

Le présent guide est vendu avec trois devoirs uniquement pour les élèves de la formation à distance. Chacun des devoirs contient aussi des questions relatives à la démarche expérimentale étudiée dans la section C du cahier *Activités expérimentales de mécanique*. Ces devoirs devront être complétés à la fin des chapitres 2, 4 et 6

Les devoirs indiquent à votre tuteur que vous comprenez bien la matière et que vous êtes en mesure de poursuivre votre apprentissage. Si tel n'est pas le cas, il le précisera sur votre devoir en consignant des commentaires et des suggestions pour vous aider à vous remettre sur la bonne voie. Il importe donc que vous preniez connaissance des corrections et des annotations apportées à vos devoirs.

Les devoirs ressemblent à l'épreuve finale qui se déroule sous la surveillance d'un responsable et sans notes de cours. C'est donc à votre avantage de faire les devoirs sans consulter votre guide d'apprentissage et de profiter des corrections de votre tuteur pour ajuster votre tir. C'est une excellente façon de se préparer à l'épreuve d'évaluation finale.

Attendez toujours d'avoir reçu la correction d'un devoir avant d'envoyer le devoir suivant.

FORCE ET ÉNERGIE

Dans le guide précédent, *Cinématique et quantité de mouvement*, vous vous êtes attardé à l'étude de la *cinématique*, cette partie de la mécanique qui traite de la description mathématique des mouvements. Dans le cours *Force et énergie*, nous nous préoccupons plutôt des causes du mouvement, c'est-à-dire des forces qui engendrent ou modifient les mouvements. La partie de la mécanique qui étudie les relations entre les forces et les mouvements s'appelle la *dynamique*. Si la dynamique étudie les causes du mouvement, la cinématique, quant à elle, en étudie les effets.

Dans le premier cours de physique, *Optique*, nous vous avons présenté une étude de la lumière et de sa propagation en présence de miroirs, de lentilles ou de prismes. Il s'est terminé par une analyse de la nature de la lumière et des couleurs.

Le deuxième cours, *Cinématique et quantité de mouvement*, a traité de la perception du mouvement et de la notion de vecteur fort utile pour décrire le mouvement. Une attention particulière a été apportée à l'étude du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré à l'aide d'équations et de graphiques. Il a été aussi question de l'analyse du mouvement des projectiles qui se déroule dans un plan contrairement aux mouvements rectilignes dont la trajectoire est linéaire. Finalement, la quantité de mouvement a fait l'objet du dernier chapitre. Cette quantité caractérise les objets en mouvement selon leur masse et leur vitesse. Dans un système fermé, la valeur totale de la quantité de mouvement reste constante. L'étude de la quantité de mouvement ouvre la porte de la dynamique, centrée sur le concept de force dans le présent cours *Force et énergie*. Voyons maintenant de façon sommaire le contenu de ce cours.

Le premier chapitre aborde la notion de force de façon concrète. Nous sommes continuellement soumis à l'action de plusieurs forces et nous en appliquons nous-même souvent inconsciemment. Lorsque vous tenez un livre dans vos mains, vous exercez une force sur lui, sinon il tomberait par terre. Il s'agit là d'une force de contact. Par contre, si vous tombez en bas d'une échelle, c'est une force à distance qui vous fait chuter. Plus précisément, c'est la force d'attraction de la Terre exercée sur vous. Vous verrez qu'il y a plusieurs types de forces qui s'exercent à distance mais dont la portée varie. Après avoir défini ce qu'est une force, nous traiterons d'un type de force à distance : la force de gravitation universelle, celle qui régit entre autres la chute des corps et le mouvement des planètes autour du Soleil. Finalement, vous verrez que votre poids n'est rien d'autre que le résultat de l'attraction entre la Terre et vous. De plus, vous aurez aussi l'occasion de vous familiariser avec l'utilisation du dynamomètre, un instrument servant à mesurer des forces et le poids d'objets.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des trois lois de Newton sur le mouvement. Ces trois lois ainsi que celle de la gravitation universelle furent consignées dans son traité de mécanique *Principia Mathematica*, publié en 1687, et qui s'avère un des ouvrages les plus importants dans l'histoire de l'humanité. Il sera aussi question de l'aspect vectoriel d'une force, des conditions d'équilibre d'un objet, de la résultante de plusieurs forces agissant sur un objet et de sa contrepartie, la force équilibrante. La notion d'équilibre constitue un outil mathématique de base pour les ingénieurs et les architectes. Vous verrez que la quantité de mouvement, étudiée dans le cours précédent, est une notion très utile lorsque nous voulons établir une relation entre force et mouvement. Finalement, vous aurez l'occasion d'appliquer les notions théoriques dans une variété de problèmes numériques et de vérifier expérimentalement la deuxième loi de Newton.

L'énergie et le travail mécanique font partie du troisième chapitre. À n'en pas douter, vous êtes familier avec la notion de travail musculaire. Mais qu'en est-il de celle du travail mécanique? Comme vous le verrez aussi, les notions de travail mécanique et d'énergie sont intimement liées. Dans ce chapitre, nous définirons les notions fondamentales que sont le travail et l'énergie et nous suivrons l'énergie lors de ses nombreuses transformations. Vous vous rendrez compte que l'énergie est une quantité qui est conservée lors d'une interaction au même titre que la quantité de mouvement. Finalement, vous aurez l'occasion d'apprécier la valeur de la loi de la conservation de l'énergie dans de nombreux problèmes numériques impliquant des transferts d'énergie. Et dans une activité expérimentale, vous établirez la relation entre la force de rappel d'un ressort et son allongement (loi de Hooke).

Dans le quatrième chapitre, il sera question de la résistance au mouvement, en l'occurrence les forces de frottement. Certaines personnes perçoivent la présence de forces de frottement comme inutiles et tous les moyens sont nécessaires pour les éliminer. Comme vous le verrez, cela n'est vrai qu'en partie seulement. Nous examinerons les facteurs qui contribuent au frottement et nous ferons la distinction entre la force de frottement statique et la force de frottement dynamique. Finalement, nous ferons l'étude d'un milieu résistant particulier : l'air. Il sera alors question d'aérodynamique, partie de la physique qui étudie les phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air où il baigne. Pourquoi les véhicules moteurs d'aujourd'hui ont-ils des formes aérodynamiques et pourquoi les avions parviennent-ils à se maintenir en vol? Voilà autant de questions auxquelles vous trouverez réponse dans ce chapitre. Dans une activité expérimentale, vous aurez à déterminer les facteurs qui contribuent sur le frottement de deux surfaces, et le coefficient de frottement statique entre elles.

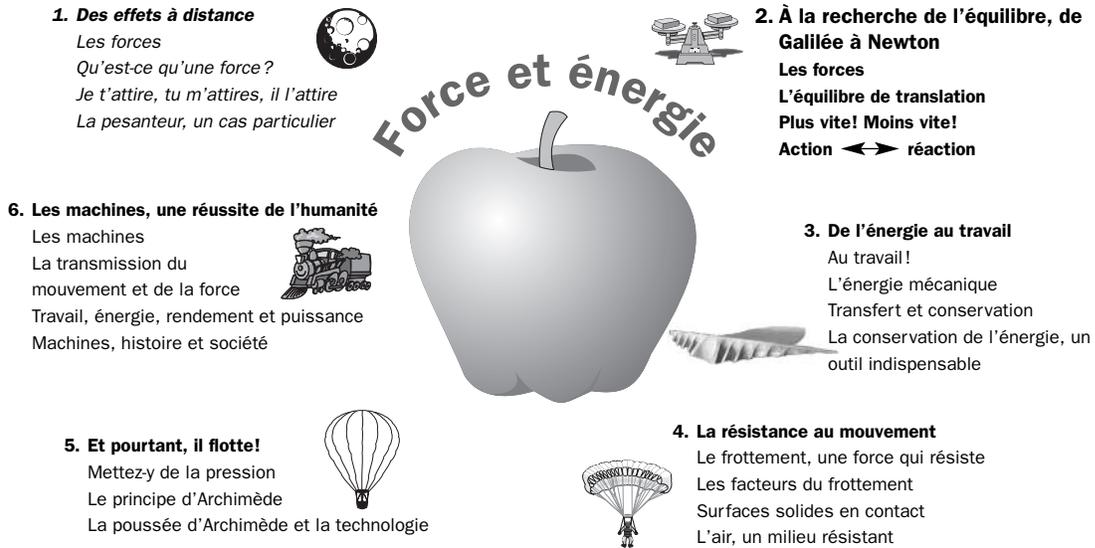
Le cinquième chapitre est consacré à la pression. Peut-être pensez-vous à la pression atmosphérique, artérielle, à celle de l'eau dans un tuyau d'arrosage ou à celle des skis sur la neige? Tous ces exemples ont un point commun : une poussée s'exerce, une force est appliquée sur une surface. Force et surface sont les deux facteurs à considérer lorsque nous parlons de pression. La force peut tout aussi bien être exercée par un solide que par un fluide (liquide ou gaz). Une attention particulière sera accordée à la détermination de la pression hydrostatique, celle exercée par l'eau et par d'autres liquides. Ce qui permettra ensuite de faire l'étude du principe de Pascal et de celui d'Archimède ainsi que des nombreuses applications qui leur sont associées. Vous aurez aussi à déterminer expérimentalement les facteurs qui influent sur la poussée vers la haut que subit un corps plongé dans un liquide (poussée d'Archimède).

Enfin, le sixième et dernier chapitre est consacré aux machines simples, une réussite pour l'humanité pourrions-nous dire. Depuis la préhistoire, l'humanité n'a cessé de diversifier et d'améliorer ses outils. À la base de ces outils, nous trouvons les machines. Déjà au II^e siècle, cinq machines de base étaient cataloguées les machines simples : le levier, la roue, la poulie, le plan incliné et la vis. Vous connaissez déjà ces machines. Dans ce chapitre, vous étudierez chacune d'elles en mettant l'accent sur leur principe de fonctionnement ainsi que sur l'avantage qu'elles procurent. Et dans une activité expérimentale, vous aurez à induire la loi des leviers.

Le sixième chapitre complété, une brève conclusion met un terme à ce guide. Elle est suivie d'une épreuve d'autoévaluation qui aidera à mieux vous préparer à l'épreuve finale du ministère de l'Éducation.

La présentation générale de ce guide est semblable à celle du précédent. Chaque chapitre commence par une liste d'énoncés d'objectifs, suivie d'une table des matières schématique qui le situe dans l'ensemble du cours. Le contenu de chaque chapitre y est résumé en quelques points. À titre d'exemple, nous avons reproduit ci-dessous la table schématique qui apparaît au début du chapitre 2. Observez que le contenu de ce chapitre est mis en évidence par des caractères gras, en contraste avec celui des chapitres complétés (chapitre 1), présenté en italique, et celui des chapitres à venir (chapitres 3 à 6), inscrit en caractères ordinaires.

Table des matières schématique apparaissant au début du chapitre 2

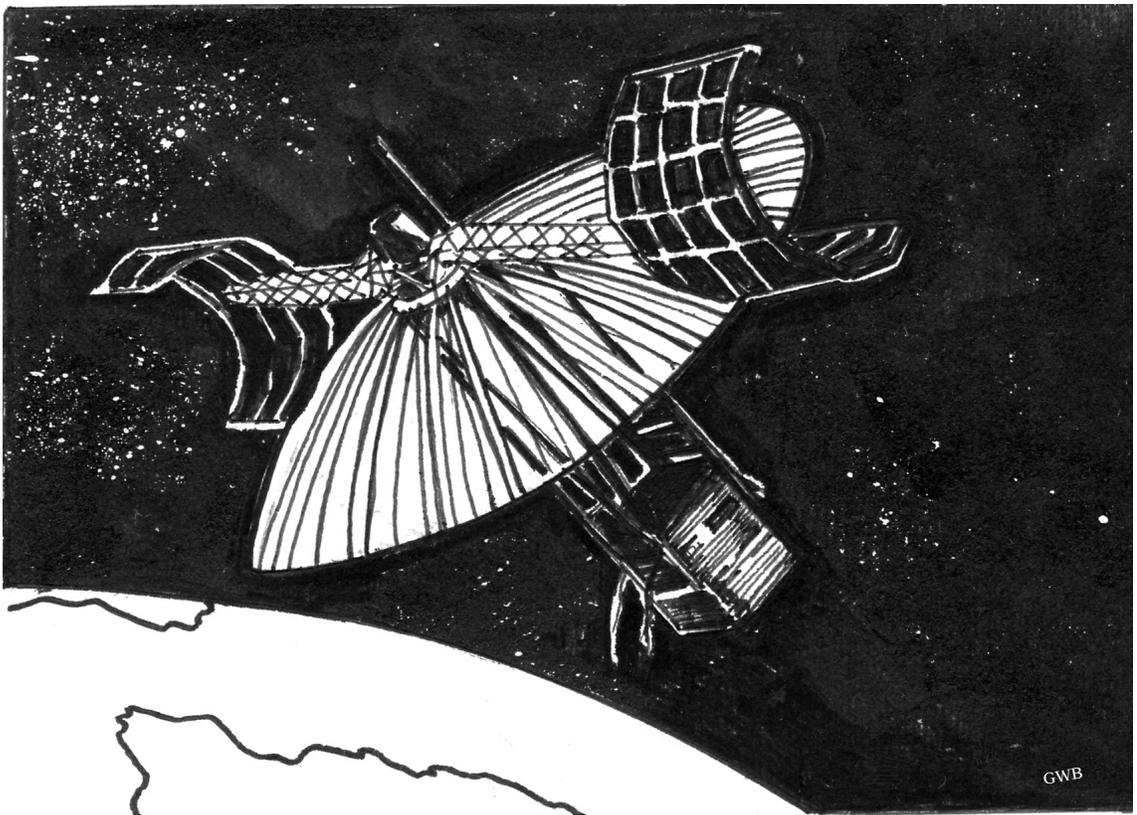


Nous vous suggérons de consulter régulièrement cette table des matières pour mieux savoir où vous en êtes dans la progression du cours. Utilisez-la aussi pour repérer rapidement des notions vues et à venir.

Vous êtes maintenant bien outillé pour parcourir ce guide. Il reste à vous souhaiter de maintenir une cadence soutenue pendant votre formation et de prendre plaisir à découvrir des phénomènes physiques par satisfaction personnelle mais aussi pour acquérir une meilleure appréhension de notre planète et de l'Univers.

CHAPITRE 1

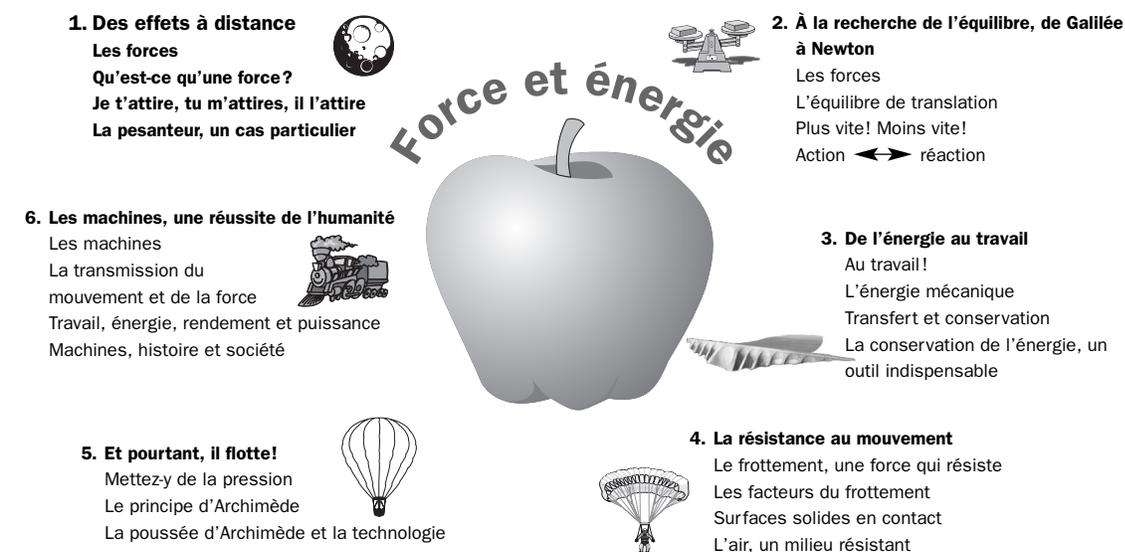
DES EFFETS À DISTANCE



Objectifs¹

Au terme de ce chapitre, vous serez en mesure :

- 1.1 d'associer les forces fondamentales aux échelles où elles dominent.
- 1.2 de décrire sommairement l'orientation de la recherche actuelle en physique quant aux forces fondamentales.
- 1.3 de distinguer la force à distance de la force de contact.
- 1.4 de définir le concept de force.
- 1.5 de définir les conséquences de l'application d'une force sur un corps.
- 2.1 de décrire les effets de l'attraction gravitationnelle.
- 2.2 de représenter graphiquement le vecteur force gravitationnelle dans diverses situations.
- 2.3 de décrire, à l'aide d'exemples, le fonctionnement du dynamomètre.
- 2.4 d'établir expérimentalement, à l'aide d'un dynamomètre, la relation qui existe entre la masse et la force gravitationnelle.
- 2.5 de distinguer la masse du poids.
- 2.6 d'expliquer les différences d'intensité du champ gravitationnel observées en divers points du globe.
- 2.7 de décrire des recherches et des applications techniques possibles en l'absence de gravité.
- 2.8 de comparer la force gravitationnelle à la force électrique.
- 2.9 de décrire des phénomènes naturels relatifs à l'attraction gravitationnelle.
- 2.10 de décrire, à l'aide d'exemples, des étapes importantes de l'évolution des connaissances sur la force de gravité.
- 2.11 de résoudre des problèmes portant sur la force gravitationnelle et ses manifestations.



1. Extrait du programme d'étude, Physique 5^e secondaire, Août 1998, Québec.

Grâce aux techniques d’animation, nous pouvons visionner de plus en plus, sur nos écrans, des films dans lesquels des objets traversent les murs, des personnages atterrissent en vol plané sur leurs adversaires, des véhicules contournent des édifices à dix mètres du sol, etc. Bien sûr, ces scènes sont le résultat de trucages. Mais pourquoi disons-nous que ce sont des trucages? Si nous avions pu, avant les frères Wright², projeter un film montrant un avion en vol, nous aurions conclu au trucage. À l’époque, nous n’avions pas encore maîtrisé les forces qui font qu’un avion vole. Nous concluons au trucage lorsque nous savons que la technologie ne nous a pas encore permis de maîtriser les forces qui causent l’effet observé.

Dans ce chapitre, il sera question de forces. Nous étudierons les forces de contact et les forces à distance, dont la gravitation. Nous verrons comment cette gravitation est responsable du mouvement des astres et du poids des objets. Nous aborderons virtuellement, bien sûr, d’autres planètes pour vérifier si notre poids y serait le même que sur Terre. Nous verrons comment il se fait que les astronautes en orbite autour de la Terre sont en état d’impesanteur et quels sont les effets de ce phénomène.

1.1 – LES FORCES

Vous avez réglé votre réveil à 6 h. Vous vous êtes couché tard et vous trouvez particulièrement difficile de vous arracher du lit ce matin. Mais est-ce que vous faites réellement plus d’effort que d’habitude? Non. L’effort que vous devez fournir pour vous lever est le même chaque matin.

Exercice 1.1

a) Pourquoi devez-vous forcer pour vous lever?

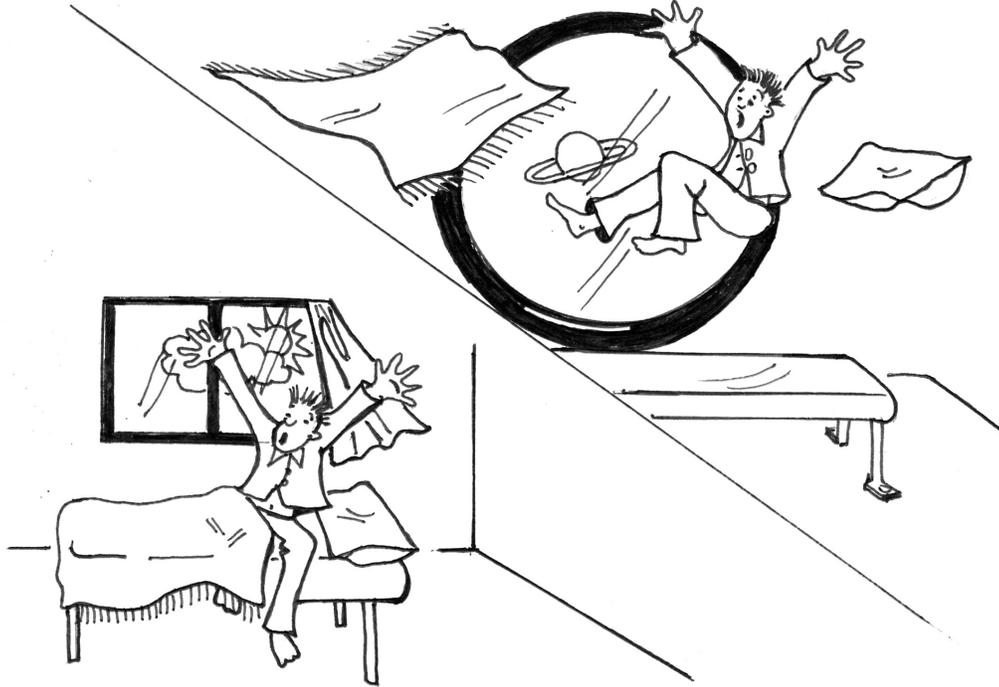
b) Si vous étiez en service sur la Station spatiale internationale, devriez-vous forcer pour vous lever? Pourquoi?

2. Les frères Wilbur et Orville Wright ont réussi, le 17 décembre 1903 à Kitty Hawk (É.-U.), le premier vol propulsé d’un appareil plus lourd que l’air.

Figure 1.1 – La difficulté à se lever n’est pas la même partout.

a) Sur terre :

b) En état d’impesanteur :



a) Dur, dur de se lever!

b) Debout ou couché, c’est facile!

Vous êtes continuellement soumis à l’action de plusieurs forces.

Vous en appliquez vous-même, souvent inconsciemment.

Nous définirons formellement le mot force à la section 1.2 mais, pour l’instant, voyons quelques forces familières.

Supposons qu’en ce moment, vous soyez assis sur une chaise et que vous teniez ce guide dans vos mains.



Exercice 1.2

Pouvez-vous nommer une force exercée sur vous en ce moment?

La chaise exerce sur vous une force dirigée vers le haut (figure 1.2a). En effet, si nous retirions rapidement la chaise vous vous retrouveriez sur le plancher. La chaise vous supporte.

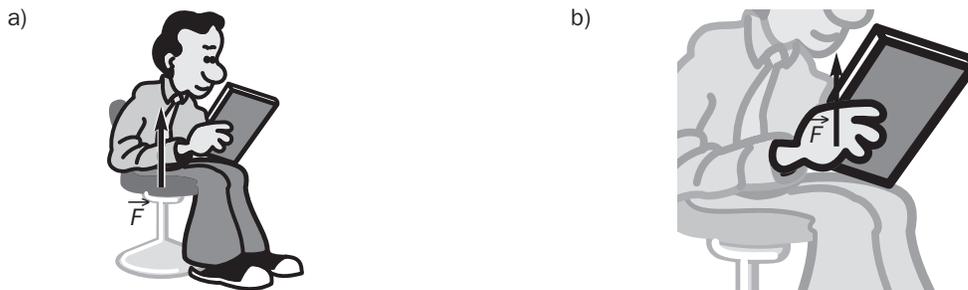
Mais pourquoi tomberiez-vous si nous retirions la chaise? Parce que la Terre vous attire vers le bas. C'est ce que nous nommons la force de gravitation ou, plus communément, le **poids***. Nous reviendrons sur ce sujet à la section 1.4.

? **Exercice 1.3**

Pouvez-vous nommer une force que vous exercez en ce moment?

Vous exercez une force dirigée vers le haut sur le guide que vous tenez (figure 1.2b). Cette force annule la force de gravitation exercée par la Terre sur le guide.

Figure 1.2 – Des forces



a) La chaise vous supporte en exerçant sur vous une force dirigée vers le haut.

b) Vous supportez le cahier en exerçant une force dirigée vers le haut.

FORCES DE CONTACT ET FORCES À DISTANCE

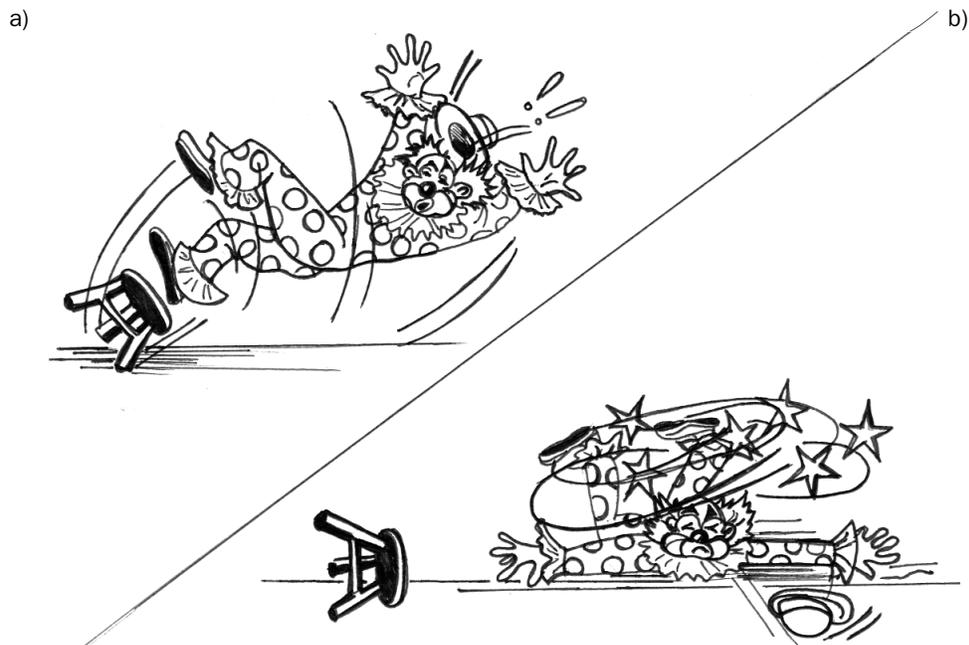
Les forces que nous venons de mentionner peuvent être divisées en deux catégories : les forces de contact et les forces à distance. Dans le cas d'une force à distance, l'effet se fait sentir même si les objets sont éloignés l'un de l'autre. La force exercée par la chaise sur vous et celle que vous exercez sur le guide sont des forces de contact. Ces forces existent parce que les objets se touchent.

Les forces exercées par la Terre sur vous et sur le guide sont des forces à distance. En effet, ni le guide, ni vous n'avez besoin d'être en contact avec la Terre pour subir sa force d'attraction. Celle-ci s'exerce aussi sur les avions, sur les satellites artificiels et sur la Lune.

La situation suivante illustre la différence entre une force à distance et une force de contact.

* Les mots qui apparaissent en gras sont définis dans la section vocabulaire page C.137 à la fin de ce guide.

Figure 1.3 – Une force à distance... et une force de contact!



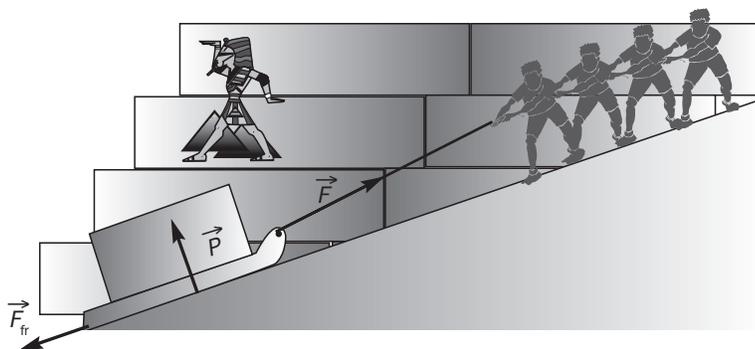
a) La gravitation terrestre, une force à distance, est responsable de la chute des corps.

b) La résistance du sol, lors de l'impact, est une force de contact.

Les forces de contact

Les forces de contact sont connues depuis toujours. Par exemple, lorsque vous poussez ou tirez, vous savez qui exerce la force et sur quoi elle est exercée.

Figure 1.4 – Des forces de contact



\vec{F} est la force que les ouvriers exercent sur le bloc par l'entremise du câble.

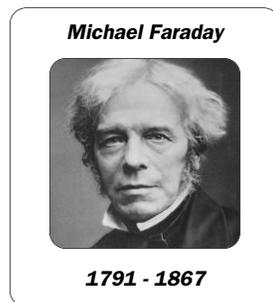
\vec{F}_{fr} est la force de frottement exercée entre le traîneau et le sol.

\vec{P} est la poussée du plan sur le traîneau.

Les forces à distance

Les forces de contact sont facilement admises depuis longtemps, car nous pouvons aisément identifier leur source et leur effet. Par exemple, lorsque vous déplacez un meuble, la source de la force c'est vous et l'effet, c'est le déplacement du meuble. Il en va tout autrement des forces à distance. Lorsque vous observez l'aiguille d'une boussole qui pivote et qui vient s'aligner sur les lignes de force du champ magnétique terrestre, l'effet est évident mais pas la cause. Si vous ne connaissiez rien du magnétisme, vous ne pourriez pas expliquer la cause du mouvement de l'aiguille.

Ce n'est qu'au XVII^e siècle que nous avons commencé à admettre qu'une force pouvait s'exercer entre deux corps sans qu'ils se touchent. Même Newton, le père de la loi de la **gravitation universelle**³ (1687), n'était pas à l'aise de proposer qu'il existait une force attractive entre deux objets qui n'étaient pas en contact.

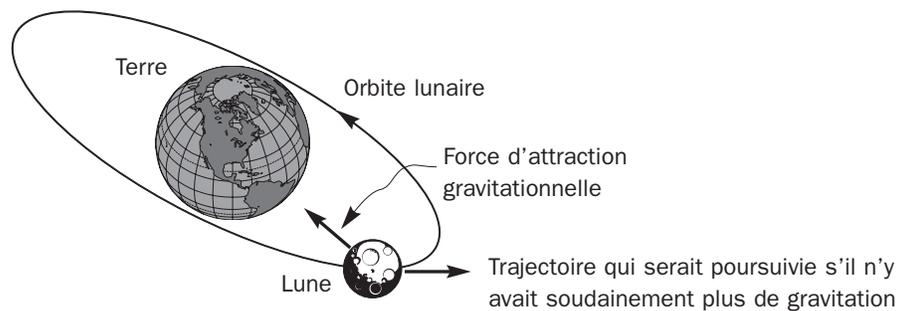


Collection Edgar Fahs Smith
Bibliothèque de l'Université
de Pennsylvanie

C'est le physicien britannique Michael Faraday qui, en 1846, a développé l'idée de **champ de forces** pour expliquer l'action à distance. Un corps subit une force à distance lorsqu'il est situé dans le champ de force produit par un autre corps. Rappelez-vous les forces d'attraction et de répulsion en électrostatique. Un champ de force n'a rien de matériel. C'est une portion d'espace dans laquelle une force se fait sentir. La figure 1.5 montre trois exemples de champs de force.

Figure 1.5 – Des champs de force

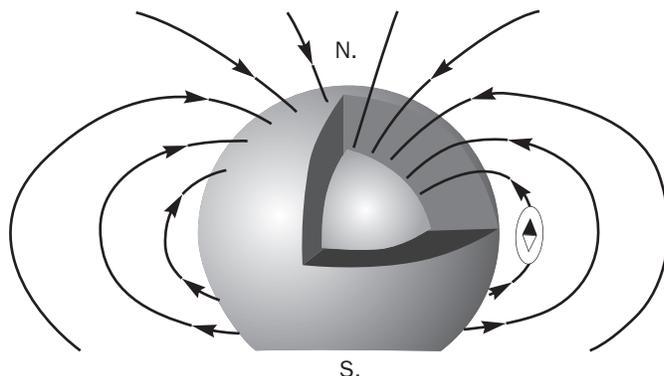
a) La Lune est située dans le champ gravitationnel de la Terre.



La Terre exerce sur la Lune la force d'attraction indispensable à sa trajectoire orbitale.

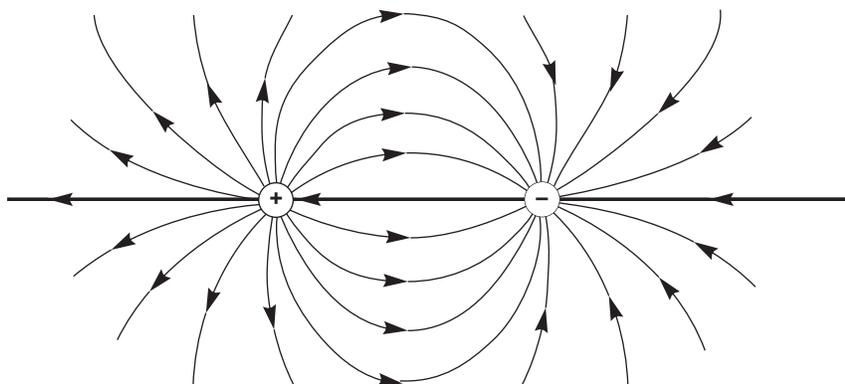
3. Newton a proposé la loi de la gravitation universelle pour expliquer le mouvement des planètes en orbite autour du Soleil.

b) L'aiguille d'une boussole est influencée par le champ magnétique terrestre.



La boussole s'aligne sur le champ magnétique terrestre.

c) Des charges électriques sont entourées d'un champ électrique.



Des charges opposées engendrent un champ électrique et s'attirent.

Nous venons de mentionner trois types de champs qui vous sont familiers.

Ces champs impliquent l'existence de forces :

1. La **force gravitationnelle** exercée par un objet sur un autre objet;
2. La **force magnétique** exercée par un aimant sur une substance ferromagnétique⁴;
3. La **force électrique** exercée par un corps chargé.

4. Une substance ferromagnétique a la propriété d'être attirée par un aimant. Le fer, le nickel et le cobalt sont des substances ferromagnétiques.

? **Exercice 1.4**

Donnez un exemple courant de chacune des forces à distance mentionnées plus haut en vous référant à un domaine de l'industrie où elle est mise à contribution.

1. Force gravitationnelle

2. Force magnétique

3. Force électrique

Les trois forces dont vous venez de donner des exemples font partie de votre quotidien :

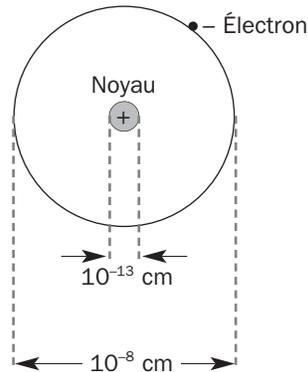
1. La **force gravitationnelle** est responsable du poids des objets et de leur chute. C'est la force de gravitation qui maintient la Terre dans sa course autour du Soleil. Plus prosaïquement, c'est aussi elle qui vous oblige à fournir un effort pour soulever un objet et qui vous plaque au sol quand vous trébuchez.
2. La **force magnétique** est celle des aimants. La porte de votre frigo connaît bien cette force. Ce sont des aimants qui maintiennent la porte fermée. L'aiguille d'une boussole est un aimant influencé par le champ magnétique terrestre.
3. La **force électrique** est responsable de la foudre, du courant électrique et des vêtements qui collent au sortir de la sècheuse. Elle fait la joie des fabricants de paratonnerres, de piles électriques et d'assouplisseurs de tissus.

Les trois forces que nous venons de mentionner sont connues depuis le XVIII^e siècle. Nous aborderons maintenant une autre force à distance qui est connue depuis beaucoup moins longtemps, la force nucléaire.

ZOOM SUR LE NOYAU

Il y a une autre force à distance, tout aussi présente mais moins perceptible, c'est la force nucléaire. Revenons au modèle d'atome que nous avons vu dans le cadre du cours de Sciences physiques, plus précisément dans le chapitre 2.2 du cahier : *Le nucléaire : de l'énergie dans la matière*. Le modèle de Rutherford propose un noyau positif entouré d'électrons négatifs en orbite. Le noyau est formé de protons positifs et de neutrons neutres.

Figure 1.6 – Le modèle atomique de Rutherford



La presque totalité de la masse de l'atome est concentrée dans son noyau. La force électrique entre le noyau (+) et les électrons (-) maintient ces derniers en orbite.

Comme l'a démontré Ernest Rutherford, c'est la force d'attraction électrique entre le noyau (+) et les électrons (-) qui maintient ces derniers en orbite.

Qu'un proton (+) attire un électron (-) et que cette force assure la cohésion de l'atome, très bien. Mais qu'est-ce qui assure la cohésion du noyau?

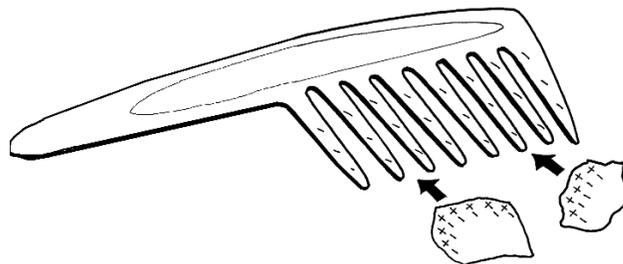
Nous sommes en présence de particules positives qui se repoussent. Si la force électrique était la seule force en jeu, le noyau devrait se disloquer et l'atome ne pourrait donc pas exister. Si vous avez objecté que la force d'attraction gravitationnelle entre les particules nucléaires (du noyau) pourrait compenser la **force électrique** répulsive, détrompez-vous. Nous verrons plus loin que la force électrique est 10^{36} fois supérieure à la force gravitationnelle!

Vous pouvez d'ailleurs démontrer expérimentalement que la force électrique est de beaucoup supérieure à la force de gravitation.



Exercice 1.5

Frottez votre peigne dans vos cheveux ou sur votre chandail, puis approchez-le de petits morceaux de papier.



a) Qu'observez-vous?

b) Quelles sont les deux forces appliquées aux morceaux de papier?

c) Laquelle des forces l'emporte sur l'autre?

Si le peigne soulève des morceaux de papier, c'est que la force électrique exercée vers le haut, sur les morceaux de papier, est supérieure à la force gravitationnelle exercée vers le bas.

Revenons au noyau. Il doit donc exister une force, bien plus grande que la force électrique, qui assure la cohésion des particules nucléaires. C'est la force nucléaire. En fait, il existe deux types de forces nucléaires: la **force nucléaire forte**, celle qui maintient les particules nucléaires (protons et neutrons) ensemble et la **force nucléaire faible**, celle qui se fait sentir dans certains cas de désintégration.

Dans le cadre du cours *Le nucléaire: de l'énergie dans la matière* (SCP-4010-2) vous avez vu qu'à cause de leur grande dimension, certains noyaux (l'uranium, le radium, le polonium, etc.) subissent spontanément des désintégrations, car la grande distance entre les particules nucléaires les placent à la limite de la portée des forces nucléaires. C'est ce qui explique le phénomène de la radioactivité.

Nous voilà donc avec cinq forces à distance :

- gravitationnelle;
- magnétique;
- électrique;
- nucléaire forte;
- nucléaire faible.

DE CINQ À QUATRE

Le brillant physicien britannique James Clerk Maxwell a démontré, en 1873, que la force électrique et la force magnétique pouvaient être considérées comme deux aspects d'une même force, la **force électromagnétique**.

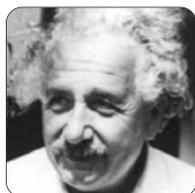
En unifiant électricité et magnétisme, Maxwell a ouvert la voie à une nouvelle technologie, celle des ondes électromagnétiques. L'ère des communications était née. En effet, les ondes radio, TV, radar, sont toutes des ondes électromagnétiques.

À l'instar de Maxwell, Albert Einstein, le père de la théorie de la relativité, s'est attaqué à la tâche de fusionner deux des quatre forces à distance : la force électromagnétique et la force gravitationnelle. Il n'a pas vécu suffisamment longtemps pour mener à bien ses travaux.



Albert Einstein

Albert Einstein



1879 - 1955

*Permission accordée par les Archives
Albert Einstein, Université Hebrew
de Jérusalem, Israël.*

Né en Allemagne en 1879, Albert Einstein est mort à Princeton, New Jersey, en 1955. Fuyant le régime nazi, il s'était installé aux États-Unis en 1933.

Albert Einstein est né à Ulm, une ville industrielle du sud de l'Allemagne. À dix-sept ans, il a été admis à l'École polytechnique fédérale de Zurich en Suisse. En 1902, il est engagé au Bureau des inventions techniques de Berne à titre d'ingénieur. Il est rentré en Allemagne en 1913, où il a accepté un poste à l'Université de Berlin.

Inquiet de la montée du nazisme, il a quitté définitivement l'Allemagne en 1933 et a accepté un poste à l'Université de Princeton au New Jersey (É.-U.).

C'est en 1905 qu'il a publié sa théorie de la relativité restreinte suivie, dix ans plus tard, de sa théorie de la relativité générale. Il y démontre que l'écoulement du temps n'est pas uniforme mais qu'il est fonction de la vitesse relative de l'observateur. Le temps, mesuré par un observateur au repos, s'écoule plus lentement dans un système en mouvement. En effet, une horloge placée dans un avion retarde par rapport à une horloge demeurée au sol.

Ce retard est cependant à peine perceptible, et il faudrait atteindre des vitesses de l'ordre de 10 % de la vitesse de la lumière ($\sim 10^7$ m/s) pour obtenir des écarts de temps significatifs.

Einstein fut l'un des scientifiques qui ont le plus marqué leur époque. Nous nous souviendrons de sa lettre au président Roosevelt pressant celui-ci d'accélérer le développement de la bombe atomique (auquel lui-même n'a pas participé). Nous craignons, à l'époque, que l'Allemagne nazie ne soit en mesure de développer sa propre arme atomique.

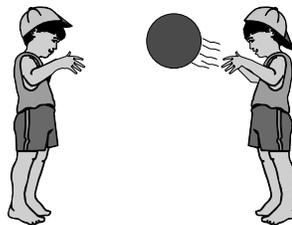
Einstein a reçu le prix Nobel de physique en 1921 pour sa contribution à l'explication de l'effet photoélectrique. Ce phénomène est l'émission d'électrons causée par l'éclairement d'une surface métallique. Il est utilisé pour activer l'ouverture et la fermeture des portes automatiques actionnées par un « œil magique ». Un rayon lumineux vient frapper une cellule photoélectrique, des électrons sont alors émis et le courant obtenu maintient la porte fermée. Lorsque le rayon lumineux est intercepté, la cellule photoélectrique cesse d'émettre des électrons et la porte s'ouvre automatiquement.

À la fin du XX^e siècle, les physiciens identifient donc quatre forces fondamentales :

- gravitationnelle;
- électromagnétique;
- nucléaire faible;
- nucléaire forte.

Des théories modernes tentent d'expliquer l'action de ces forces. Le siècle dernier a vu naître l'électrodynamique quantique, une théorie qui propose que les forces s'exercent entre les particules grâce à l'échange de « messagers ». Ces messagers sont des particules à très courte durée de vie, appelées particules d'interaction, lesquelles seraient responsables de cette interaction, un peu comme un ballon que s'échangeraient deux enfants.

Figure 1.7 – L'interaction



L'interaction entre les deux enfants s'établit grâce au ballon qu'ils échangent.

Ces particules messagères ont été identifiées pour trois des quatre forces : électromagnétique, nucléaire forte et nucléaire faible. Dans le cas de la gravitation, nous avons supposé l'existence d'une particule que nous avons nommée graviton. Cependant, personne n'a encore pu en confirmer l'existence.

Le tableau de la figure 1.8 présente les quatre forces fondamentales.

Figure 1.8 – Les quatre forces fondamentales

Interaction	Force relative approximative par rapport à la force gravitationnelle	Portée de la force	Particules échangées
Gravitationnelle	1	Infinie	Graviton ?
Nucléaire faible	10^{29}	10^{-18} m	Bosons
Électromagnétique	10^{36}	Infinie	Photons
Nucléaire forte	10^{38}	10^{-15} m	Gluons

Nous remarquons que les forces nucléaires, bien qu'étant considérables, sont confinées au noyau à cause de leur faible portée. Au contraire, la force gravitationnelle, bien qu'étant de loin la plus faible, possède une portée beaucoup plus grande, ce qui explique sa prédominance à l'échelle planétaire.

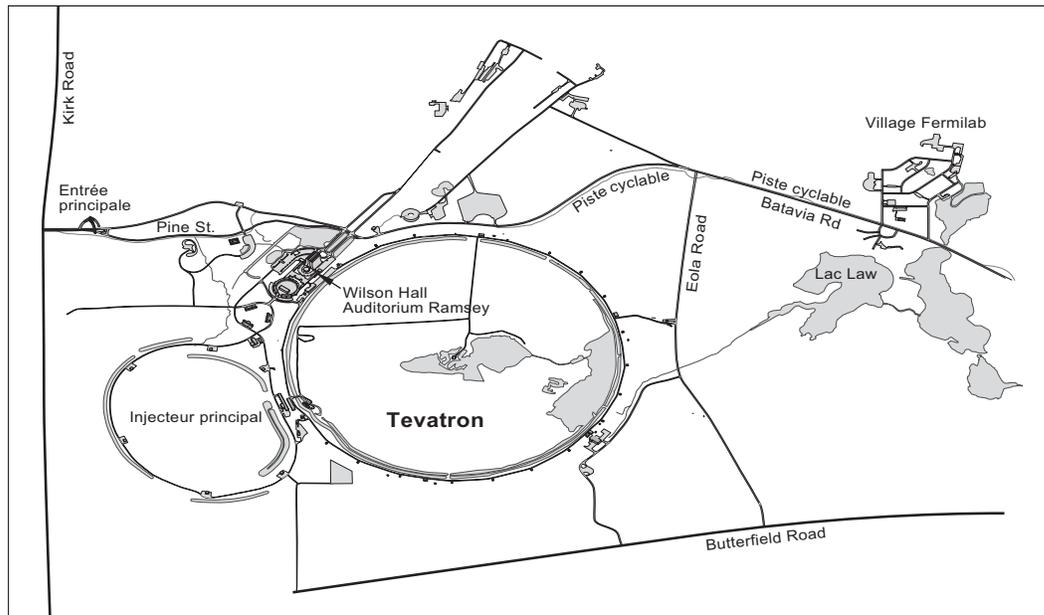


Des outils performants mais coûteux

La recherche sur les particules subatomiques, dont les particules d'interaction, nécessite l'utilisation d'accélérateurs de plus en plus puissants. Ces énormes machines accélèrent des particules chargées (protons, électrons) à des vitesses approchant la vitesse de la lumière, leur conférant ainsi l'énergie nécessaire pour briser les noyaux atomiques afin d'en étudier la composition.

L'illustration suivante montre le *Tevatron* du *Fermi National Accelerator Laboratory* de Chicago, un des plus puissants accélérateurs au monde. Son anneau possède un diamètre de 2 km.

Le Tevatron du Fermilab à Batavia, en banlieue de Chicago (Illinois)



Carte : Daniel Rémy

VERS UNE FORCE UNIQUE

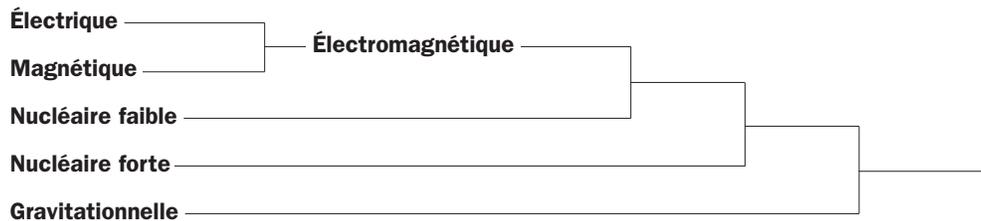
Nous avons récemment démontré que la force nucléaire faible et la force électromagnétique avaient suffisamment de caractéristiques communes pour les considérer comme étant deux variantes d'une même force.

Selon le *modèle standard* de la physique des particules, la force nucléaire forte pourrait être associée aux deux précédentes.

Seule la force gravitationnelle résiste encore à l'assimilation.

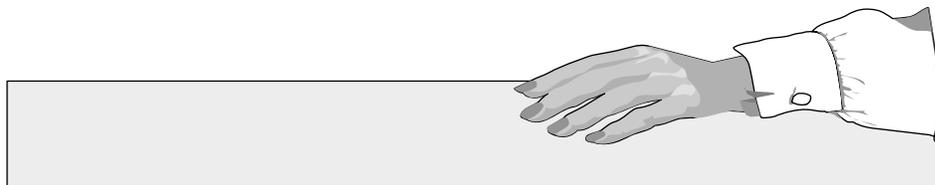
En résumé

Les étapes vers l'unification des forces



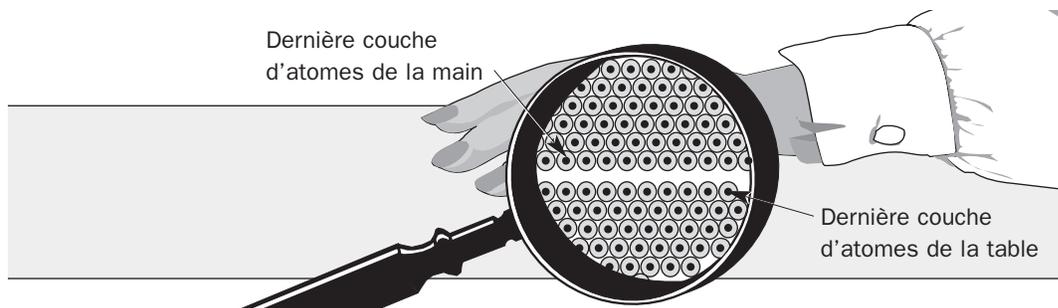
Les forces de contact, des forces à distance

Qu'arrive-t-il lorsque vous appuyez votre main sur la table ? Vous exercez une force de contact sur la table, direz-vous.



Vous croyez que vous exercez une force de contact puisque votre main est en contact avec la table.

Mais regardons-y de plus près. Où finit votre main et où commence la table ? Où se fait le contact entre la main et la table ?



La force de répulsion entre votre main et la table est, en dernière analyse, causée par la répulsion entre les électrons périphériques des atomes de la table et ceux de votre main. Il s'agit d'une force de répulsion électrique entre des particules chargées négativement, donc d'une force à distance!

Dans le cadre de ce cours, nous étudierons une seule force à distance, la force gravitationnelle. Mais avant d'entamer l'étude de la gravitation, nous définirons ce qu'est une force, puisque nous ne l'avons pas encore fait.

1.2 – QU'EST-CE QU'UNE FORCE ?

Jusqu'ici, nous avons vu plusieurs exemples de forces, des forces de contact et des forces à distance. Allons maintenant au-delà des cas particuliers et définissons le concept de force.

LES EFFETS D'UNE FORCE

Supposons que vous êtes dans une maison que l'on prétend hantée.

Figure 1.9 – Une « maison hantée »



Vous êtes dans une pièce sombre et, soudain, un meuble se met en mouvement.

Figure 1.10 – Ce meuble peut-il bouger tout seul ?



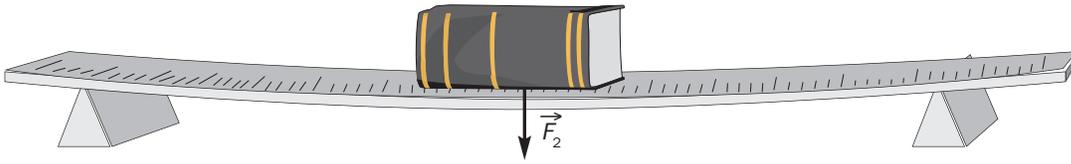
Exercice 1.6

Que pouvez-vous conclure, sans l'ombre d'un doute, à propos de la cause de ce mouvement?

En l'absence de tout autre renseignement, la seule conclusion que vous puissiez tirer de votre observation est qu'une force a été appliquée sur le meuble pour le mettre en mouvement. La nature de la force est ici d'intérêt secondaire. Les objets ne se mettent pas en mouvement et ne s'arrêtent pas tout seuls. Ils ne changent pas de direction tout seuls non plus. Une force doit être appliquée, quelle que soit cette force, connue ou non, expliquée ou non.

Le même raisonnement pourrait s'appliquer à une règle d'un mètre supportée à ses extrémités. Si vous déposez un dictionnaire au centre de la règle, celle-ci se courbera vers le bas.

Figure 1.11 – L'effet de la pesanteur



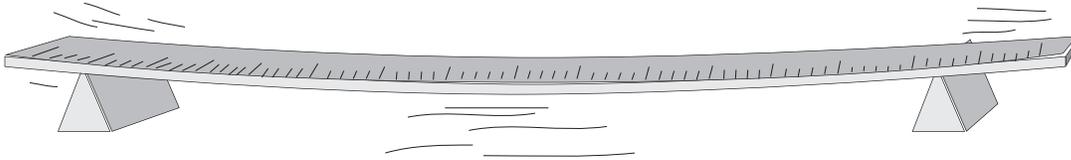
La règle ploie sous le poids du dictionnaire.

Quelle est la cause de la déformation de la règle? C'est l'action de la **gravité**, c'est-à-dire la force de gravitation exercée sur le dictionnaire. La Terre exerce une force d'attraction sur le dictionnaire; celui-ci fait plier la règle.



Exercice 1.7

Mais supposons que vous voyiez la règle se déformer « toute seule ».



Que pourriez-vous conclure?

Ici encore, la seule conclusion possible est qu'une force a été appliquée sur la règle. Les objets ne se déforment pas tout seuls. Ces deux exemples constituent, en quelque sorte, la base de la définition d'une force.

LA DÉFINITION D'UNE FORCE

Une force n'est pas définie pour elle-même mais pour ses effets. Les effets dont nous venons de parler peuvent se résumer à deux grandes catégories : déformation et variation du mouvement. La force se définit comme suit : « Une force est toute cause capable de déformer un corps ou d'en modifier l'état de repos ou de mouvement. »

Elle est représentée par la lettre F et s'exprime en **newtons** (N) en l'honneur du grand physicien anglais Sir Isaac Newton.



Isaac Newton

Isaac Newton



1642 - 1727

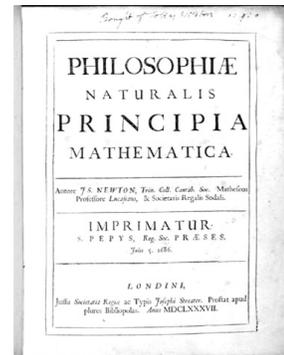
Copyright Réunion des musées Nationaux / Art Resource, NY
Académie des Sciences, Paris, France

Isaac Newton est né en 1642 (année de la fondation de Montréal) à Woolsthorpe, un village du Lincolnshire en Angleterre. Étant peu doué pour le travail manuel, il a fait des études.

Il a été étudiant, puis professeur à l'Université de Cambridge. À 29 ans, il a publié sa théorie de la lumière et des couleurs. Il y donne la preuve que la lumière blanche est la synthèse des couleurs du spectre, du rouge au violet. Newton y propose également sa théorie corpusculaire de la lumière. Il soutenait que la lumière était faite de petits grains, s'opposant ainsi au physicien néerlandais Christian Huygens, qui prétendait, de son côté, que la lumière était une onde. On a depuis démontré qu'ils avaient tous deux raison et que la lumière possède à la fois certaines propriétés d'une onde et d'autres d'une particule.

À 45 ans, il a publié, sous le titre de *Principia mathematica*, un traité de mécanique qui allait s'avérer un des ouvrages les plus importants dans l'histoire de l'humanité. Cette publication renferme, entre autres, ses trois lois du mouvement et sa **loi de la gravitation universelle**.

Isaac Newton racontera plus tard que c'est en observant la chute d'une pomme que lui est venue l'idée d'associer le mouvement de la Lune et la chute des corps.



Exercice 1.8

Dans les cinq situations suivantes, identifiez la force responsable de l'action. Précisez s'il s'agit d'une force de contact ou d'une force à distance et, dans le dernier cas, nommez-la en choisissant parmi les quatre forces fondamentales.

a) La Lune tourne autour de la Terre.

b) Une rondelle de hockey est déviée derrière le gardien par un bâton.

c) Un proton est maintenu dans le noyau d'un atome.

d) Un noyau d'hydrogène repousse un autre noyau d'hydrogène.

e) Vous réchauffez vos mains en les frottant l'une contre l'autre.

1.3 – JE T'ATTIRE, TU M'ATTIRES, IL L'ATTIRE

À la section précédente, nous avons vu que la force gravitationnelle est l'une des quatre forces fondamentales. Mais comment en sommes-nous venu à identifier cette force? Revenons d'abord à la définition d'une force :

« Toute cause capable de déformer un corps ou d'en modifier l'état de repos ou de mouvement. »

Voici deux cas de modification d'un mouvement :

Un objet qui accélère (dont la vitesse varie) est nécessairement soumis à une force. Pensez à une voiture de Formule 1 au départ d'un Grand Prix (figure 1.12a).

Un objet qui se déplace sur une orbite circulaire est également soumis à une force. Pensez à une pierre que vous feriez tourner au bout d'une corde dans un plan horizontal. L'action de la corde sur la pierre est nécessaire à son changement continu de direction (figure 1.12b). Si la corde cède, la pierre continue en ligne droite.

Figure 1.12 – Une force peut modifier un mouvement

a) Un mouvement rectiligne

b) Un mouvement circulaire



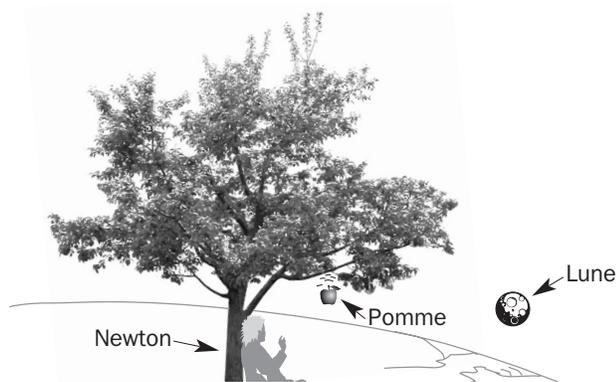
a) La force de traction modifie la vitesse de l'auto.

b) La force modifie la direction de la pierre. Si la corde cédait, la pierre continuerait en ligne droite, tangentiellement au cercle décrit.

LA FORCE DES ASTRES

Reportons-nous en Angleterre au XVII^e siècle. D'une part, Newton sait qu'un objet que nous laissons tomber est accéléré vers le bas. D'autre part, il sait que la Lune tourne autour de la Terre.

Figure 1.13 – Un questionnement crucial

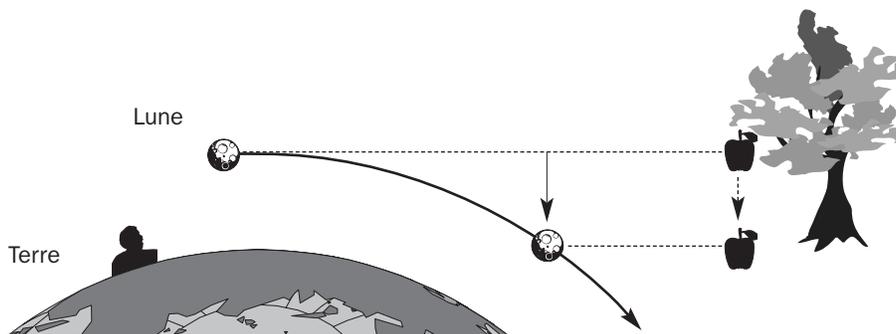


« Y a-t-il un lien entre la chute de cette pomme et le mouvement de la Lune ? »

Dans les deux cas, une force doit nécessairement être appliquée. Jusque-là, la chute des objets et le mouvement circulaire des astres étaient considérés comme des phénomènes totalement indépendants. Isaac Newton constate qu'ils ne le sont pas.

Nous pouvons considérer que la Lune est continuellement en train de « tomber » sous l'effet de l'attraction terrestre.

Figure 1.14 – La Lune en orbite



Sous l'effet de la gravitation terrestre, la Lune « tombe » par rapport à une trajectoire rectiligne.

Isaac Newton propose que la pomme et la Lune subissent une force de même nature. Mais quelle est cette force?

Newton fait valoir que c'est la seule présence de la Terre qui fait tomber la pomme et tourner la Lune. La Terre attire donc la pomme et la Lune. De son côté, la Lune attire la Terre, comme en fait foi le phénomène des marées dont nous reparlerons plus loin.

Si la Lune attire la Terre, elle attire aussi la pomme. Mais si la Terre attire la Lune, la pomme attire, elle aussi, la Lune avec une force beaucoup plus petite mais tout aussi réelle. En fait, tous les corps attirent tous les autres corps, des plus petits jusqu'aux plus grands, des électrons jusqu'aux galaxies.



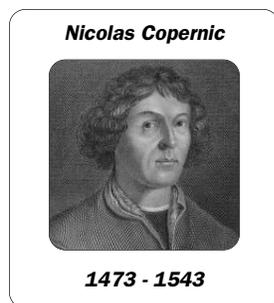
Exercice 1.9

Selon vous, quels facteurs déterminent la grandeur de la force d'attraction entre deux corps? C'est la question que se posaient les scientifiques au XVII^e siècle.

L'INVERSE DU CARRÉ DE LA DISTANCE ET LA LOI DE LA GRAVITATION UNIVERSELLE

Au XVII^e siècle, l'astronomie connaît un essor considérable. Le modèle héliocentrique de Copernic est confirmé par l'observation des planètes dans leur course autour du Soleil.

Au Moyen Âge, on pensait que la Terre était immobile et qu'elle constituait le centre de l'Univers. Ce modèle de l'Univers (modèle géocentrique) avait été élaboré par l'astronome grec Claude Ptolémée, au II^e siècle.



*Collection Edgar Fahs Smith
Bibliothèque de l'Université
de Pennsylvanie*

L'astronome polonais Nicolas Copernic a proposé un modèle de l'Univers dans lequel le Soleil en occupait le centre (modèle héliocentrique), la Terre étant en orbite autour de cet astre.

Cent ans plus tard, l'astronome allemand Johannes Kepler (1571-1630) et le physicien italien Galilée (1564-1642) ont confirmé la thèse de Copernic. Kepler a démontré que les planètes tournent autour du Soleil sur des orbites elliptiques. Galilée a été le premier à observer les planètes à l'aide d'une lunette astronomique. Il a démontré, par ailleurs, qu'un corps en mouvement autre que rectiligne uniforme (en ligne droite et à

vitesse constante) doit nécessairement subir une force. Les planètes subissent donc une force, mais comment varie cette force et quelle en est la nature?

Ismaël Boulliau



1605 - 1694

En 1645, l'astronome français Ismaël Boulliau avait émis l'hypothèse que cette force était inversement proportionnelle⁵ au carré de la distance qui sépare une planète du Soleil, mais sans pouvoir le démontrer. Newton s'est penché sur ce problème en 1666.

En comparant, pour un même intervalle de temps, la « distance de chute » de la Lune à celle d'un objet à la surface de la Terre ainsi que leur distance respective du centre de la Terre, Newton a démontré que la force d'attraction exercée sur une planète est inversement proportionnelle au carré de la distance qui la sépare du centre autour duquel elle est en orbite.

Plus tard, Robert Hooke, un compatriote de Newton, a suggéré, mais sans le démontrer, qu'un mouvement elliptique comme celui des planètes était le résultat d'une force de type « inverse du carré de la distance ».

Edmund Halley



1656 - 1742

Courtoisie de la National Portrait Gallery, Londres

À l'instigation de l'astronome Edmund Halley, celui qui a donné son nom à la comète de Halley, Newton a publié, en 1687, son œuvre majeure *Principia mathematica*, qui contient la plus grande partie de ses travaux sur la mécanique céleste, dont sa loi de la gravitation universelle :

« Tous les corps attirent tous les autres corps avec une force qui est directement proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. »

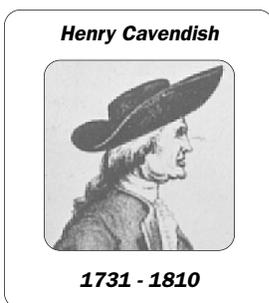
Mathématiquement, cette relation peut s'écrire comme suit :

$$F_g \propto \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad \text{où } \propto \text{ symbolise une proportionnalité}$$

La force d'attraction gravitationnelle (F_g) est directement proportionnelle au produit des masses ($m_1 m_2$) et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare ($1/d^2$).

Mais la relation $F_g \propto \frac{m_1 m_2}{d^2}$ n'est pas une équation. Pour établir une équation, il faut introduire un facteur de proportionnalité, une constante qui précisera la relation. Tant que la constante n'est pas connue, nous ne pouvons rien calculer.

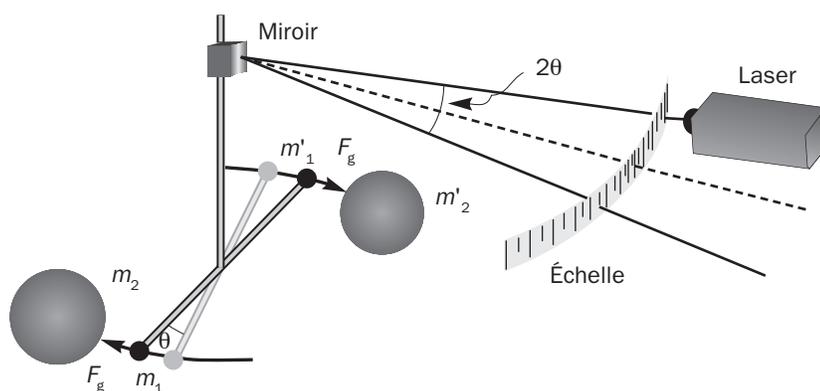
5. Voir l'annexe «Relation de proportionnalité» sur la distinction entre une proportion directe et une proportion inverse.



Collection Edgar Fahs Smith
Bibliothèque de l'Université
de Pennsylvanie

En 1798, le physicien anglais Henry Cavendish, successeur de Newton à la chaire de physique de l'Université de Cambridge, a réussi, à l'aide d'une balance à torsion, à mesurer en laboratoire la force d'attraction entre deux sphères.

Figure 1.15 – Une balance à torsion moderne



Il s'agit d'une tige supportant deux petites sphères et pouvant tourner dans un plan horizontal lorsqu'elle est suspendue à un fil d'acier. Un faisceau lumineux vient frapper le centre d'un miroir fixé à la tige. Deux grosses sphères fixes sont placées près des petites sphères. L'attraction entre les sphères $m_1 m_2$ et $m_1' m_2'$ provoque une faible rotation du miroir.

Comme vous l'avez vu dans le chapitre 2 du guide d'apprentissage *Optique*, la rotation d'un miroir provoque une rotation deux fois plus prononcée du rayon réfléchi. La déflexion du rayon réfléchi peut être mesurée sur un écran circulaire placé loin du miroir. Il est ainsi possible de calculer l'angle de rotation de la tige. En connaissant l'angle de rotation, nous pouvons calculer la force d'attraction F_g entre les sphères m_1 et m_2 .

En connaissant F_g , m_1 , m_2 et d , nous pouvons calculer la valeur de la constante de proportionnalité qui relie F_g et $\frac{m_1 m_2}{d^2}$ dans la relation de Newton :

$$F_g \propto \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Nous obtenons cette constante en multipliant F_g par d^2 et en divisant par le produit $m_1 m_2$. Cette constante de proportionnalité se nomme « constante gravitationnelle ». Elle est symbolisée par la lettre G .

Ainsi :

$$G = \frac{F_g d^2}{m_1 m_2}$$

Expérimentalement, deux masses de 1,00 kg distantes de 1,00 m s'attirent avec une force de $6,67 \times 10^{-11}$ N. Donc :

$$G = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \times (1\text{m})^2}{1,00 \text{ kg} \times 1,00 \text{ kg}}$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$$

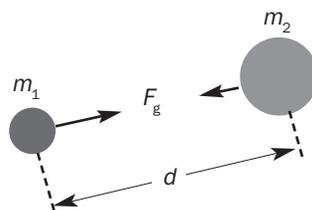
Cette constante, appelée **constante gravitationnelle**, est valide pour n'importe quelle paire d'objets.

Elle sert à calculer aussi bien la force d'attraction entre deux protons qu'entre deux planètes ou... entre deux personnes!

Connaissant la valeur de G , nous pouvons maintenant écrire :

$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$	<p>où F_g est la force d'attraction gravitationnelle en newtons (N);</p> <p>m_1 et m_2 sont les masses respectives des deux corps en interaction en kilogrammes (kg);</p> <p>G est la constante gravitationnelle ($6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$);</p> <p>et d est la distance en mètres (m), mesurée à partir du centre des corps.</p>
-------------------------------	---

Figure 1.16 – L'attraction entre deux corps



Exemple

Voyons comment calculer la force d'attraction gravitationnelle entre deux personnes.

Supposons deux personnes distantes de 2,0 m, ayant des masses respectives de 60 kg et de 70 kg.

La force d'attraction gravitationnelle entre ces deux personnes est :

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \text{ où } G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}; m_1 = 60 \text{ kg}; m_2 = 70 \text{ kg}; d = 2,0 \text{ m}$$

$$F_g = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \times 60 \text{ kg} \times 70 \text{ kg}}{\text{kg}^2 (2,0 \text{ m})^2} = 7,0 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Bien sûr, la force gravitationnelle est infime à l'échelle humaine, mais elle est énorme à l'échelle planétaire à cause de la grandeur des masses en jeu. À l'échelle atomique, elle est négligeable, car les masses sont infimes.



Exercice 1.10

Calculez la force d'attraction gravitationnelle entre la Terre et la Lune, sachant que la masse de la Terre est de $5,98 \times 10^{24}$ kg; la masse de la Lune, de $7,35 \times 10^{22}$ kg, et que la distance qui les sépare est de $3,8 \times 10^5$ km.



Exercice 1.11

Calculez la force d'attraction gravitationnelle entre deux protons distants de $1,0 \times 10^{-15}$ m, sachant que la masse d'un proton est de $1,67 \times 10^{-27}$ kg.



Exercice 1.12

Connaissez-vous une autre force dont la grandeur est inversement proportionnelle au carré de la distance ? Comment nommez-vous cette force ? Rappelez-vous la force d'attraction entre deux sphères portant des charges de signes contraires. Quel nom porte la loi qui régit cette force et quelle est son expression mathématique (sa formule)?

Donc, plus les corps sont massifs et plus ils sont rapprochés, plus ils s'attirent. Si la distance entre deux corps double, la force d'attraction sera quatre fois plus faible; si la distance triple, elle sera neuf fois plus faible et ainsi de suite.

Si la masse d'un des deux corps double et si la distance est réduite de moitié, la force sera huit fois plus grande :

$$\frac{m_1 \times 2m_2}{(d/2)^2} = \frac{2m_1m_2}{d^2/4} = \frac{8m_1m_2}{d^2}$$



Exercice 1.13

Qu'advient-il de la force d'attraction entre deux corps de masses m_1 et m_2 séparés par une distance d :

a) si nous triplons la distance?

b) si nous réduisons la distance au quart de sa valeur initiale?

c) si nous doublons la valeur des deux masses et si nous réduisons la distance au tiers de sa valeur initiale?

d) si nous quadruplons la valeur de tous les paramètres?

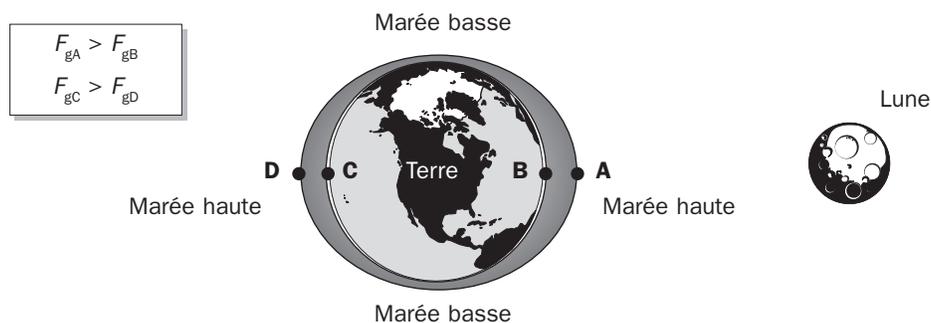
LES MARÉES

Nous avons vu que c'est en établissant un parallèle entre la chute d'un objet sur la Terre et le mouvement de la Lune autour de la Terre que Newton en est venu à formuler sa grande loi de la gravitation universelle.

Cela lui a permis d'expliquer le phénomène des marées dont personne, jusque-là, n'avait pu identifier la cause.

C'est l'effet attractif combiné de la Lune et du Soleil sur la surface de la Terre qui provoque les **marées**. À cause du mouvement relatif de ces trois astres, le processus est très complexe. C'est la Lune qui a l'effet le plus déterminant à cause de sa proximité. La figure 1.17 montre l'effet de l'attraction de la Lune sur l'eau des océans.

Figure 1.17 – Les marées



L'attraction de la Lune provoque des marées chaque jour.

Lorsque la Lune est approximativement au-dessus du point A, elle provoque les deux renflements illustrés (de façon très exagérée) sur la figure 1.17. Les points A, B, C et D sont à des distances différentes de la Lune et subissent donc des forces de grandeurs différentes : $F_{gA} > F_{gB}$ et $F_{gC} > F_{gD}$. Le point A s'éloigne du point B et le point C s'éloigne du point D.

Quatre marées dans l'océan Atlantique

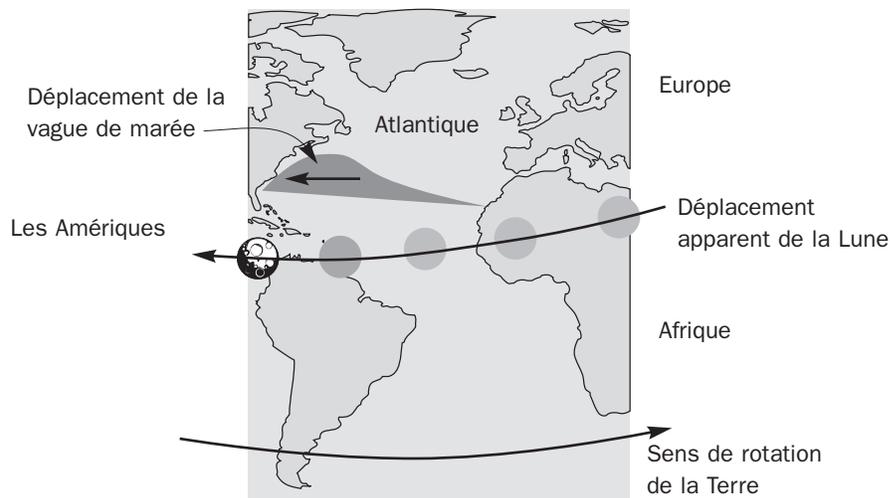
Les côtes de l'Atlantique subissent quatre marées toutes les 25 heures : deux hautes et deux basses. Chacune dure en moyenne 6 h 15 min.

La Lune ne revient au-dessus du même point de la surface de la Terre qu'à des intervalles de 25 heures approximativement.

Lors de son passage apparent d'est en ouest au-dessus de l'Atlantique (c'est la Terre qui tourne d'ouest en est), la Lune attire les eaux qui se soulèvent et provoquent ainsi une vague qui se dirige vers l'Amérique (figure 1.18). Cette vague prend environ 6 heures

à traverser l'Atlantique. Elle touche les côtes de l'Amérique (marée haute en Amérique, marée basse en Europe et en Afrique) et retourne vers l'Europe et l'Afrique, un autre voyage d'environ 6 heures (marée basse en Amérique, marée haute en Europe et en Afrique). Cette même vague a le temps de revenir (encore environ 6 heures) vers l'Amérique après réflexion (deuxième marée haute en Amérique), puis de retourner de nouveau vers l'Europe et l'Afrique (deuxième marée basse en Amérique) (un autre 6 heures). Lorsque ce mouvement est complété, la Lune se retrouve de nouveau au-dessus de l'Atlantique et le phénomène des marées se répète.

Figure 1.18 – Marées dans l'océan Atlantique



L'attraction de la Lune provoque quatre marées dans l'océan Atlantique.

Deux marées dans l'océan Pacifique

L'océan Pacifique étant beaucoup plus large que l'océan Atlantique, la vague qui touche ses côtes (l'Asie) n'a pas le temps nécessaire (25 heures) pour retourner sur les côtes ouest de l'Amérique après sa réflexion. La Lune revient au-dessus du point d'origine avant que cette vague ne soit complètement de retour. Il n'y a donc qu'une marée haute et qu'une marée basse dans l'océan Pacifique.

Les marées du fleuve Saint-Laurent

Lorsque la vague provoquée par l'attraction de la Lune sur les eaux de l'océan Atlantique atteint les côtes des provinces maritimes, elle s'engouffre d'abord dans le golfe, puis dans le fleuve où elle n'a qu'un espace réduit pour poursuivre sa course. Plus l'espace est réduit, plus la vague tendra à se soulever. C'est pour cette raison que

les marées sont très grandes en amplitude dans la rivière Saguenay (15 m maximum) et même à Québec (10 m maximum) tandis qu'à Rimouski, elle atteint rarement 4 m.

Il est évident que son amplitude décroît en remontant le fleuve à cause des pertes d'énergie sur les rives.

L'estuaire (là où il y a des marées) du fleuve Saint-Laurent commence près de Sorel, puisque les marées se font sentir jusqu'à cet endroit.

Marées et « Force de Coriolis »

Si nous nous informions sur le temps de marées aux Services Hydrographiques du Canada, nous aurions un résultat semblable à ce qui suit.

Marées devant Québec, le 30 mars 2002			
Basse	Haute	Basse	Haute
6 h 30	9 h 45	18 h 45	22 h 05

Nous remarquons que les durées des marées basses et des marées hautes ne sont pas égales. En effet, lorsque la vague se dirige vers l'Europe (vers l'est), elle voyage moins rapidement que lorsqu'elle vient vers l'Amérique. La marée descend donc plus longtemps (durée \approx 9 heures). Ensuite, la marée monte pendant environ 3 h 15 min.

Nous pouvons expliquer ce phénomène par le concept de « **Force de Coriolis** ». En effet, la rotation de la Terre se faisant d'ouest en est, l'inertie de la vague qui « monte » à grande vitesse dans le fleuve Saint-Laurent doit être arrêtée par cette « Force de Coriolis ». Nous pourrions imaginer que cette vague vient « s'appuyer » sur un mur situé à l'ouest, qui « tente » de la repousser vers l'est, ce qui nécessite un certain temps pour « arrêter » la vague et « l'accélérer » vers l'est.

1.4 – LA PESANTEUR, UN CAS PARTICULIER

À l'instar de Newton, nous verrons que votre poids n'est rien d'autre que le résultat de l'attraction gravitationnelle entre la Terre et vous.

Activité expérimentale 1 – La force gravitationnelle



Cette activité vous permettra de faire la distinction entre la masse et le poids d'un objet. La masse d'un objet se mesure avec une balance à plateaux et son poids, à l'aide d'un dynamomètre. Mais quelle relation existe-t-il entre la masse d'un objet et son poids? Quelle est la cause du poids d'un objet?

Au regard du rapport de laboratoire, vous aurez à effectuer le travail préparatoire à toute expérience, exécuter méticuleusement les manipulations indiquées et analyser les résultats. Auparavant, la discussion et la conclusion, parties finales d'un rapport de laboratoire, avaient été rédigées pour vous. Cette fois nous vous demandons de les rédiger. Pour savoir quoi écrire dans ces parties, référez-vous aux dernières pages de l'activité expérimentale 1.

Prévoyez environ 15 minutes pour les manipulations. Tous les détails nécessaires pour réaliser cette activité sont donnés dans la section C du cahier *Activités expérimentales de physique*. Bon travail!

Vous avez établi expérimentalement la relation qui existe à la surface de la Terre entre le poids d'un objet (exprimé en newtons) et sa masse (exprimée en kilogrammes). Vous avez constaté que la valeur du rapport F_g/m est la même pour tous les objets. Nous reviendrons sur la distinction entre la masse et le poids un peu plus loin.

Voyons maintenant comment cette même valeur peut être déduite à partir de la loi de la gravitation universelle.

À UN RAYON TERRESTRE

La **loi de la gravitation universelle** stipule que : « Tous les corps attirent tous les autres corps... » or, la terre est un corps et vous possédez un corps.



Exercice 1.14

a) La Terre attire-t-elle votre corps?

b) Votre corps attire-t-il la Terre?

c) Comment nommez-vous familièrement la force que la Terre exerce sur votre corps?



Exercice 1.15

La force d'attraction que la Terre exerce sur vous est-elle plus grande que celle que vous exercez sur la Terre? Justifiez votre réponse.

Voyons comment calculer cette force en appliquant l'équation de la gravitation universelle.

Équation générale :
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Dans le cas particulier de la force d'attraction entre la Terre et vous :

m_T , la masse de la Terre est de $5,98 \times 10^{24}$ kg

m , votre masse, est de _____ kg

La distance qui vous sépare du centre de la Terre équivaut au rayon terrestre :

$$r_T = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$$

La force d'attraction entre la Terre et vous est de :

$$F_g = G \frac{m_T m}{(r_T)^2}$$
$$F_g = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2}{\text{kg}^2} \times \frac{5,98 \times 10^{24} \text{ kg} \times m}{(6,38 \times 10^6 \text{ m})^2}$$

Dans l'équation précédente, la valeur de G est une constante universelle et les valeurs de m_T et de r_T sont des constantes terrestres.

L'expression $G \frac{m_T}{(r_T)^2}$ constitue donc une constante terrestre applicable à tous les objets à la surface de la Terre alors que la valeur de m varie d'un objet à l'autre, d'une personne à l'autre.

? Exercice 1.16

À l'aide de votre calculatrice, calculez la valeur de cette constante terrestre. N'oubliez pas d'indiquer les unités de mesure. Cette constante représente l'intensité du champ gravitationnel et elle est symbolisée par la lettre g .

$$g = G \frac{m_T}{(r_T)^2} = \text{-----} = \text{-----}$$

En substituant $G \frac{m_T}{(r_T)^2}$ par g dans l'équation de la gravitation nous obtenons : $F_g = gm$ ou encore $F_g = mg$ où F_g représente le poids (N), m la masse (kg) et g , la constante gravitationnelle terrestre (N/kg). Cette équation est la même que celle à laquelle vous êtes arrivé expérimentalement.

Pour calculer le poids d'un objet à partir de sa masse, nous appliquons l'équation :

$$F_g = mg$$

Pour connaître le poids d'un objet dont nous connaissons déjà la masse, il suffit de multiplier la masse par la constante gravitationnelle terrestre qui est de 9,8 N/kg.

Par exemple, le poids d'un objet dont la masse est de 5,0 kg est :

$$F_g = mg$$

$$F_g = 5,0 \text{ kg} \times 9,8 \text{ N/kg} = 49 \text{ N}$$

? Exercice 1.17

Quel est votre poids?

La valeur que vous avez calculée est celle de votre poids sur la Terre. Nous verrons plus tard que votre poids serait différent sur une autre planète.

LA VALEUR DE g , UNE CONSTANTE PAS SI CONSTANTE

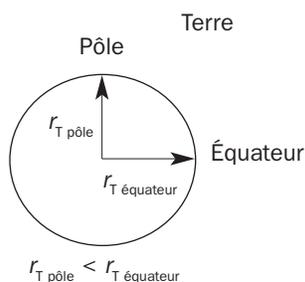
La valeur de g varie selon la position que nous occupons.

En latitude

Dans la relation $g = G \frac{m_T}{r_T^2}$, nous avons utilisé comme valeur de r_T : $6,38 \times 10^6$ m.

Or, comme nous le savons, la Terre est légèrement aplatie aux pôles à cause de l'effet centrifuge dû à sa rotation autour de l'axe polaire. Le rayon de la Terre est donc un peu plus court aux pôles qu'à l'équateur.

Figure 1.19 – La Terre n'est pas une sphère parfaite



Le rayon terrestre est un peu plus petit aux pôles qu'à l'équateur.

Si vous êtes au pôle, vous êtes donc légèrement plus près du centre de la Terre que si vous étiez à l'équateur.

$$r_{T \text{ pôle}} < r_{T \text{ équateur}}$$

Ainsi, quand dans l'équation $g = G \frac{m_T}{r_T^2}$, la valeur de r_T diminue, la valeur de g augmente.

La valeur de g étant légèrement plus grande aux pôles qu'à l'équateur, vous pèserez davantage aux pôles qu'à l'équateur. Le tableau suivant donne la valeur de g à quelques latitudes⁶.

Figure 1.20 – Variation de la valeur de g en latitude

Ville	Latitude	g (N/kg)
Inuvik	68° N.	9,82
Montréal	45° N.	9,81
Panama	9° N.	9,78

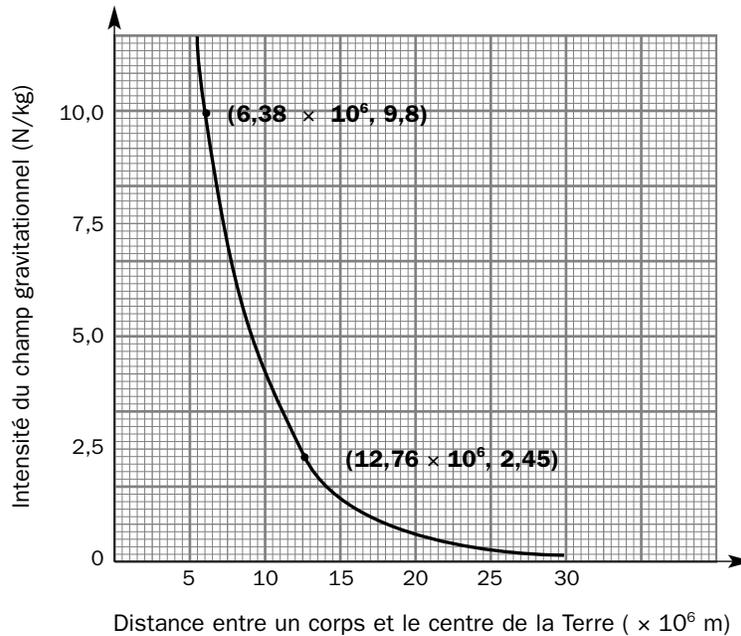
6. La latitude est la coordonnée horizontale d'un point sur la surface de la Terre. La coordonnée verticale est la longitude. La latitude 0° correspond à l'équateur; la latitude 90°, aux pôles. Montréal est approximativement à mi-chemin entre l'équateur et le pôle Nord.

En altitude

Plus nous nous éloignons de la surface de la Terre, plus la valeur de r_T (qui en fait représente la distance entre un objet et le centre de la Terre) augmente. La grandeur de g étant inversement proportionnelle au carré de r_T ($g \propto 1/r_T^2$), plus nous nous éloignons de la Terre, plus g diminue (figure 1.21).

Figure 1.21 – La valeur de g diminue avec l'altitude

Intensité du champ gravitationnel en fonction de la distance entre un corps et le centre de la Terre



À la surface de la Terre g_T vaut 9,8 N/kg. Nous remarquons que l'intensité du champ gravitationnel (g) varie proportionnellement avec l'inverse du carré de la distance ($1/d^2$). Par exemple, un corps situé à une altitude équivalant à un rayon terrestre serait soumis à un g de $g_T/4$, puisqu'il serait à une distance deux fois plus grande qu'à la surface. À une altitude équivalant à un rayon terrestre, le poids est quatre fois moindre qu'au sol.



Exercice 1.18

Quelle serait la valeur de g à une altitude de trois rayons terrestres?

? Exercice 1.19

Quel serait le poids d'un astronaute de 70 kg à une altitude de $1,28 \times 10^7$ m?

La Station spatiale internationale

La figure 1.22 montre ce à quoi ressemblera la Station spatiale internationale lorsque le montage sera complété.

Figure 1.22 – La Station spatiale internationale



L'Agence spatiale canadienne y contribue notamment en ayant conçu le bras canadien, cette grue de l'espace capable de déplacer des masses imposantes avec une précision étonnante.

Source : NASA

? Exercice 1.20

La figure suivante représente notre planète dessinée à l'échelle : $1 \text{ cm} \cong 2\,000 \text{ km}$



Tracez l'orbite de la Station spatiale internationale en respectant l'échelle indiquée, sachant que cette orbite est circulaire et qu'elle se trouve à une altitude de 400 km.

? Exercice 1.21

D'après le graphique de la figure 1.21, quelle est la valeur de g à cette altitude?

? Exercice 1.22

Quel est le poids d'une astronaute de 55 kg à cette altitude?

L'ÉTAT D'IMPESANTEUR

Vous vous rendez compte que les occupants de la station orbitale sont beaucoup plus près de la Terre que plusieurs ne l'imaginent. À cette altitude, la valeur de g est environ 80 % de sa valeur au sol.

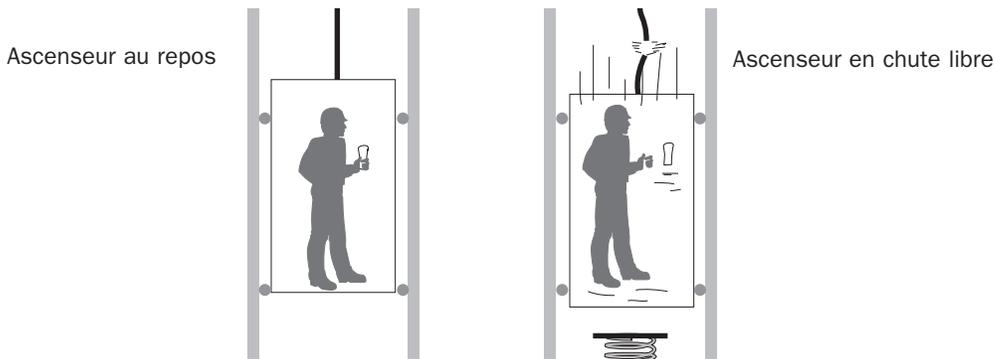
Alors pourquoi ces personnes sont-elles en état d'**impesanteur**⁷?

Nous avons vu, à la section 1.1, que Newton avait associé la chute des corps au mouvement orbital de la Lune. Nous pouvons considérer un satellite, naturel (la Lune) ou artificiel (une navette ou une station orbitale), comme étant continuellement en train de tomber vers la Terre. Or, tout objet en chute libre est nécessairement en état d'impesanteur.

Supposons que vous êtes dans un ascenseur dont le câble vient de se rompre et qu'il n'y a pas de système de sécurité. Négligez la résistance de l'air et... l'arrivée au sol!

Vous êtes en chute libre, de même que tous les objets qui se trouvent dans l'ascenseur.

Figure 1.23 – L'état d'impesanteur



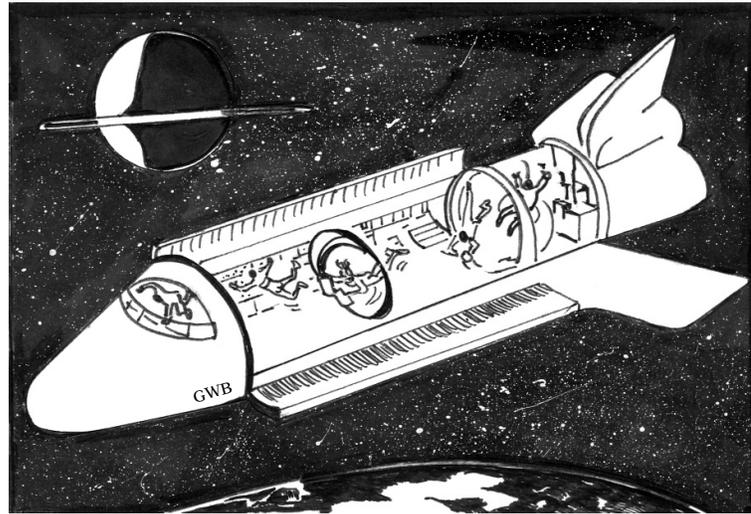
La personne et le verre tombent simultanément.

La figure 1.23 montre que, si vous tenez un verre d'eau et que vous le lâchiez pendant votre chute, le verre et son contenu continueront leur chute en même temps que vous, que vous teniez le verre ou non. Donc, le verre semblera « flotter » tout comme vous, d'ailleurs, par rapport à la cabine de l'ascenseur. Les objets conservent leur poids car ils sont soumis à la gravitation. C'est parce qu'ils tombent ensemble qu'ils semblent n'avoir aucun poids. C'est l'**impesanteur**.

Il en va de même pour les occupants d'une station orbitale. La station et tout ce qu'elle contient sont en chute libre. C'est pourquoi tout et tous « flottent » dans la cabine.

7. Le mot *impesanteur* est préférable à celui d'*apesanteur*.

Figure 1.24 – L'état d'impesanteur en orbite



Tous les occupants tombent en même temps que le vaisseau orbital.

La recherche en microgravité

L'absence des effets de la pesanteur en orbite ouvre un nouveau champ de recherche sur les matériaux. En effet, la cristallisation ne s'effectue pas de la même façon que sur la Terre lorsque la gravité n'agit pas. Nous pouvons obtenir, à partir d'une même substance, des cristaux ayant des propriétés différentes. Nous pourrions ainsi produire de nouvelles molécules, notamment dans le domaine pharmaceutique.

L'envers de la médaille

Bien qu'il soit agréable de « flotter » en état d'**impesanteur**, un séjour prolongé dans l'espace entraîne de sérieuses complications. La gravité joue un rôle important dans la distribution du sang dans l'organisme et dans le processus de la circulation sanguine. En impesanteur, le sang a tendance à s'accumuler dans la région thoracique et une diminution du nombre de globules rouges a été remarquée. L'absence d'effort pour soulever les objets provoque une atrophie musculaire. Après un long séjour dans l'espace, un astronaute peine à marcher à son retour sur Terre. Nous avons aussi constaté que les os perdaient leur calcium et devenaient plus friables. La colonne vertébrale, n'étant plus comprimée par le poids du corps, peut s'allonger de 5 cm, causant ainsi des maux de dos. Cela explique pourquoi les astronautes en orbite sont soumis à des programmes de conditionnement physique adaptés à l'espace.

Depuis les premières expériences en orbite de l'astronaute Marc Garneau (aujourd'hui président de l'agence spatiale canadienne) en 1984, la recherche sur l'impact physiologique des séjours dans l'espace est devenue une des spécialités canadienne.

DESTINATION MARS

Depuis que nous savons que la Terre et Mars sont voisines dans leur course autour du Soleil, la « planète rouge » n'a pas cessé de nous intriguer. Y a-t-il de la vie sur Mars? Sinon, y a-t-il déjà eu de la vie? La surface de la planète porte des marques de la présence d'eau. Y a-t-il ou y a-t-il déjà eu de l'eau sur Mars? Autant de questions auxquelles les sondes que nous y avons envoyées ne nous ont pas encore permis de répondre de façon satisfaisante. Il faudrait aller vérifier sur place.



Mars, si près mais si loin

À l'échelle de notre système solaire, Mars est de l'autre côté de la rue. Cependant, un voyage vers Mars (aller-retour bien entendu) est une aventure que nous ne sommes pas encore prêts à tenter. La NASA a pour projet d'organiser cette mission qui pourrait avoir lieu dès 2014.

Notre voisine présente des caractéristiques qui ne sont pas tellement éloignées de celles de la Terre. Son diamètre mesure environ la moitié de celui de la Terre; sa masse est le dixième; sa densité est de 4,0 contre 5,5 pour la Terre. Le jour martien est de 24,5 h. Cependant, son atmosphère est fort différent du nôtre et comporte 95 % de gaz carbonique (CO₂).

Un voyage aller-retour prendrait entre deux et trois ans, avec toutes les complications découlant d'un séjour prolongé en impesanteur.

Le départ devrait obligatoirement s'effectuer à partir de la station orbitale, car la quantité de vivres et de matériel qu'il faudrait apporter rendrait impossible un départ à partir de la surface de la Terre.

Si vous faisiez partie de la première mission vers Mars, pendant votre voyage, vous auriez tout le loisir de vous interroger sur ce qui vous attend, notamment sur la **gravité** à la surface de la planète.

Figure 1.25 – En direction de Mars



Source : NASA



? Exercice 1.23

La masse de votre vaisseau spatial sera-t-elle la même sur Mars que sur la Terre? Précisez votre réponse.

? Exercice 1.24

Le poids de votre vaisseau sera-t-il le même sur Mars que sur la Terre? Précisez votre réponse.

? Exercice 1.25

Sachant que la masse de la planète Mars est de $6,42 \times 10^{23}$ kg et que son rayon est de $3,38 \times 10^6$ m, quelle est la valeur de la constante gravitationnelle g_M à la surface de Mars?

? Exercice 1.26

Quel sera votre poids sur Mars, si votre masse est de 65 kg?

? Exercice 1.27

Vous débarquez sur une planète dont la masse et le rayon sont tous deux le double de ceux de la Terre.

a) Quelle est la valeur de g sur cette planète?

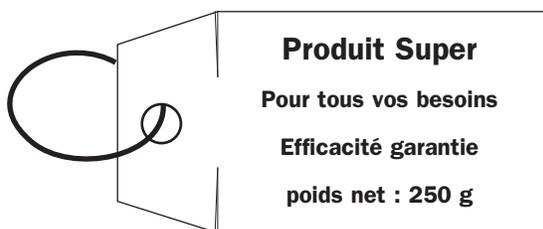
b) Quel y serait votre poids, si votre masse est de 60 kg?

MASSE ET POIDS

Revenons sur Terre et terminons ce premier chapitre en établissant une distinction entre deux concepts qui sont souvent confondus : la masse d'un corps et son poids.

? Exercice 1.28

Voici l'étiquette d'un produit offert dans un magasin à grande surface. Trouvez l'erreur.



Comme nous le voyons, les notions de **masse** et de **poids** sont confondues. Nous devrions lire sur l'étiquette : masse nette au lieu de poids net. Le tableau suivant présente les distinctions entre la masse d'un objet et son poids.

Figure 1.26 – Distinction entre masse et poids

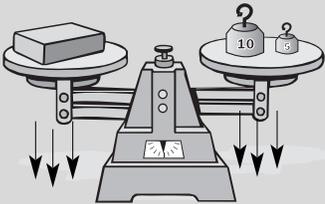
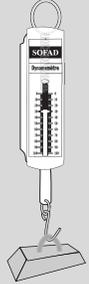
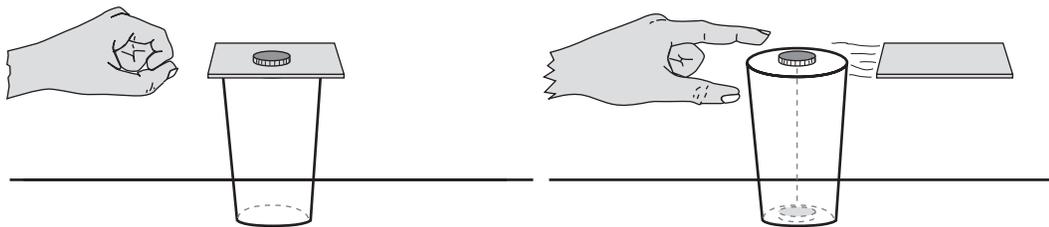
	Masse Symbole : m Unité : le kilogramme (kg)	Poids Symbole : F_g Unité : le newton (N)
Définition	Mesure associée à la quantité de matière qui compose un corps. C'est une mesure de l'inertie d'un corps.	Force gravitationnelle exercée par une planète sur un corps situé dans son champ de gravitation.
Mesure	<p>La masse se mesure par comparaison avec des masses de référence à l'aide d'une balance.</p>  <p>Nous déposons des masses marquées sur le plateau de droite jusqu'à ce que l'aiguille indique zéro. L'objet possède alors la même masse que celle des masses marquées.</p>	<p>Le poids se mesure à l'aide d'un dynamomètre, un appareil servant à mesurer les forces grâce à l'allongement d'un ressort homogène.</p>  <p>Un dynamomètre mesure le poids des objets. Le poids d'un objet se mesure en newtons (N).</p>
Variation	La masse d'un corps est invariable, quel que soit le lieu où il se trouve.	Le poids d'un corps dépend de l'intensité du champ gravitationnel de la planète dans le voisinage de laquelle il se trouve.

Figure 1.27 – Inertie d'un objet au repos



L'inertie est la propriété d'un corps de tendre à conserver son état d'équilibre. Un corps au repos tend à demeurer au repos. Un corps en mouvement tend à conserver son mouvement. Ici, l'inertie de la pièce de monnaie permet de projeter le carton d'une simple chiquenaude.

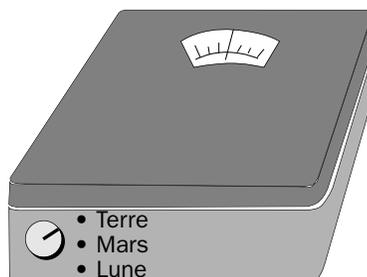


Votre balance n'en est pas une

La « balance » sur laquelle vous vous pesez à la maison est en réalité un **dynamomètre**. Ce sont des ressorts qui sont à la base du fonctionnement de l'appareil. Graduée en kilogrammes en conformité avec le système international d'unités, il indique votre masse, mais il mesure votre poids. Sur une autre planète il vous donnerait une fausse indication.

Un pèse-personne conçu pour un usage à la grandeur du système solaire devrait comporter plusieurs échelles, chacune élaborée à partir de la valeur de g de la planète.

Un pèse-personne interplanétaire



LES TROUS NOIRS

Tout voyageur de l'espace se doit d'être prudent et d'éviter le voisinage des **trous noirs**; ils frappent l'imagination par les conditions extrêmes qui y règnent.

Mais d'abord, qu'est-ce qu'un trou noir? C'est une étoile d'au moins deux masses solaires⁸ qui, au terme de sa vie, se contracte sur elle-même en une masse si compacte que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

En effet, près d'un trou noir, la vitesse théorique d'échappement est supérieure à la vitesse de la lumière⁹. Comme la lumière ne peut s'en échapper, cette région de l'espace nous paraît noire. Il y a une telle concentration de matière que la gravitation y est sans commune mesure avec les valeurs qui nous sont familières. Tout ce qui s'approche d'un trou noir : lumière, planète, astronaute, y est irrémédiablement attiré et aspiré.

8. La masse du Soleil est de $1,99 \times 10^{30}$ kg.

9. La vitesse d'échappement est le résultat d'un calcul. Aucun objet ne peut atteindre la vitesse de la lumière ($3,0 \times 10^8$ m/s).



La dimension d'un trou noir

L'astronome allemand Karl Schwarzschild a proposé, en 1916, une équation simple permettant de calculer le rayon d'un trou noir.

$$R_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

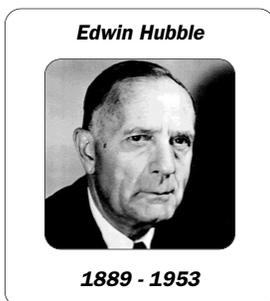
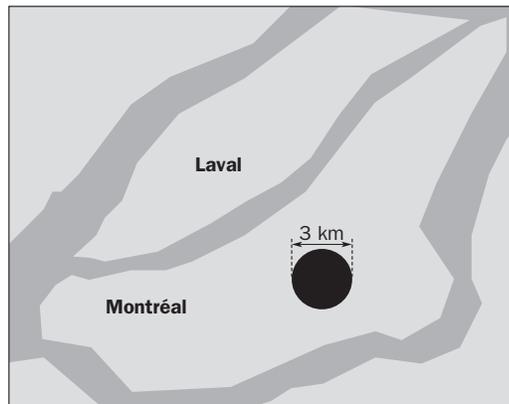
où R_s est le rayon de Schwarzschild (m);
 G est la constante de gravitation universelle : $G = \frac{6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2}{\text{kg}^2}$;
 m est la masse de l'étoile;
 et c est la vitesse de la lumière dans le vide : $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

À titre d'exemple, calculons le rayon d'un trou noir formé par une étoile de deux masses solaires, sachant que la masse du Soleil est de $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$.

$$R_s = \frac{2Gm}{c^2} = \frac{2 \times 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 \times 1,99 \times 10^{30} \text{ kg} \times 2}{\text{kg}^2 (3,0 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 5,9 \times 10^3 \text{ m}$$

$$R_s = 5,9 \text{ km}$$

Dimension relative d'un trou noir de 3 km de diamètre en comparaison à celle de l'Île de Montréal



Le télescope Hubble, nommé ainsi en l'honneur de l'astronome Edwin Hubble, a repéré un trou noir au centre de la galaxie NGC 7052 à 191 millions d'années-lumière. Sa masse est estimée à 300 millions de fois celle du Soleil.

© 1999 Studentlitteratur AB,
Jonny Österman & Carl Nordling



Stephen Hawking

Stephen Hawking



1942 - (...)

© www.hawking.org.uk

Le physicien britannique, Stephen Hawking, est une figure dominante en physique théorique. Malgré un handicap majeur causé par une maladie dégénérative qui le confine à une chaise roulante, Stephen Hawking est une sommité en physique des particules et en cosmologie. Dans cette dernière discipline, il s'intéresse particulièrement à l'étude des trous noirs.

Stephen Hawking est né en 1942 à Oxford, une ville universitaire et industrielle anglaise au nord-ouest de Londres. Il a étudié à l'Université d'Oxford, puis à l'Université de Cambridge, les deux plus prestigieuses universités d'Angleterre.

À 21 ans, il a appris qu'il souffrait d'une maladie dégénérative, la sclérose amyotrophique latérale, et qu'il lui restait peu de temps à vivre. Refusant de se laisser abattre, il s'est lancé dans l'étude de la cosmologie et, plus spécialement, dans celle des trous noirs.

Malgré son lourd handicap, Stephen Hawking est aujourd'hui une figure dominante dans le monde de la physique. Le poste qu'il occupe à l'Université de Cambridge le place dans le sillon de ses illustres prédécesseurs, notamment Newton, Cavendish, Thomson et Rutherford.



Le concept de force, les forces de contact et les forces à distance ont suscité beaucoup de discussions dans ce chapitre. Les forces de contact sont facilement admises car nous pouvons facilement identifier leur source et leur effet. Il en va tout autrement des forces à distance : gravitationnelle, nucléaire et électromagnétique. La loi de gravitation universelle de Newton permet d'expliquer le déplacement des planètes autour du Soleil, les marées, la pesanteur, l'impesanteur. Vous avez aussi appris que les notions de poids et de masse sont différentes. Dans le prochain chapitre, il sera question des trois lois de Newton et de l'effet de l'application d'une ou de plusieurs forces sur un objet. Vous verrez ce qui arrive lorsque ces forces s'équilibrent et lorsqu'elles ne s'équilibrent pas.



MOTS CLÉS DU CHAPITRE

Champ de forces	Constante gravitationnelle
Force	Force électrique
Force électromagnétique	Force gravitationnelle
Force magnétique	Force nucléaire
Gravitation	Gravité
Impesanteur	Intensité du champ gravitationnel
Kilogramme	
Loi de la gravitation universelle	
Masse	
Newton	
Pesanteur	Poids
Unification des forces	



RÉSUMÉ

Nous pouvons classer les forces en deux grandes catégories : les forces de contact et les forces à distance.

Les quatre forces fondamentales sont :

- la **force gravitationnelle**
- la **force nucléaire faible**
- la **force électromagnétique**
- la **force nucléaire forte**

Une force est toute cause capable de déformer un corps ou d'en modifier l'état de repos ou de mouvement.

Tous les corps matériels s'attirent. Le mérite d'avoir identifié les facteurs responsables de l'attraction gravitationnelle entre les corps revient au physicien anglais Sir Isaac Newton. Il a énoncé, en 1687, sa **loi de la gravitation universelle** : « Tous les corps attirent tous les autres corps avec une force qui est directement proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. »

Le **poids** d'un objet est un cas particulier de la gravitation universelle. Nous pouvons calculer le poids d'un objet en multipliant sa masse par l'intensité du champ gravitationnel dans lequel il se trouve.

Il est important de bien distinguer la **masse** d'un objet, associée à la quantité de matière qui la compose et son poids, la force d'attraction gravitationnelle qu'il subit.

Une capsule en orbite autour d'une planète est continuellement en train de « tomber » vers cette planète par rapport à la trajectoire rectiligne qu'elle aurait en son absence. Tous les objets à l'intérieur de cette capsule tombent en même temps et semblent donc n'avoir aucun poids. C'est l'état d'**impesanteur**.

L'état prolongé d'impesanteur affecte l'organisme humain, notamment la circulation sanguine, l'ossature et la musculature. L'étude des phénomènes observés en impesanteur constitue un nouveau champ de recherche.

L'intensité du champ gravitationnel varie d'une planète à une autre. Elle dépend de la masse de la planète et de son rayon. Les **trous noirs** sont des cas extrêmes des effets de la **gravitation**.



EXERCICES DE SYNTHÈSE



Exercice 1.29

Vous observez qu'une bille qui roule sur un plan horizontal change brusquement de direction. Que pouvez-vous conclure sur la cause de ce changement de direction?



Exercice 1.30

Qu'ont en commun la force électromagnétique et la force gravitationnelle?



Exercice 1.31

Si la distance qui sépare deux corps double, qu'advient-il de la force d'attraction gravitationnelle entre ces deux corps?



Exercice 1.32

Calculez la grandeur de la force d'attraction gravitationnelle entre deux pommes de 100 g, étant situées à 50 cm l'une de l'autre.

? Exercice 1.33

Newton a-t-il déjà calculé la grandeur de la force d'attraction entre la Terre et la Lune? Précisez votre réponse.

? Exercice 1.34

Nommez deux conséquences observables de la force d'attraction gravitationnelle entre la Terre et la Lune?

? Exercice 1.35

Expliquez brièvement l'état d'impesanteur ressentie par les passagers d'une navette spatiale en orbite autour de la Terre.

? Exercice 1.36

Avant de partir pour une mission vers la Lune, une astronaute monte sur la balance¹⁰ du cabinet de son médecin. Celle-ci indique 56 kg. Sachant que l'intensité du champ gravitationnel sur la Lune est 6 fois moindre que sur la Terre :

a) Qu'indiquerait cette même balance sur la Lune? _____

b) Quel sera le poids de cette astronaute sur la Lune? _____

Exercice 1.37

Quel serait le poids d'une personne de 60 kg sur une planète ayant une masse trois fois supérieure à celle de la Terre et un diamètre, deux fois plus grand que celui de la Terre?

10. Les cabinets de médecine sont souvent équipés de « vraies » balances, munies d'un curseur. Ces balances mesurent directement votre masse, contrairement aux pèse-personnes qui se trouvent dans les salles de bain (voir page 1.44).



Exercice 1.38

Laquelle, parmi les données suivantes, est erronée? Précisez votre réponse.

Longueur : 264 mm
Largeur : 118 mm
Hauteur : 86 mm
Poids : 675 g
