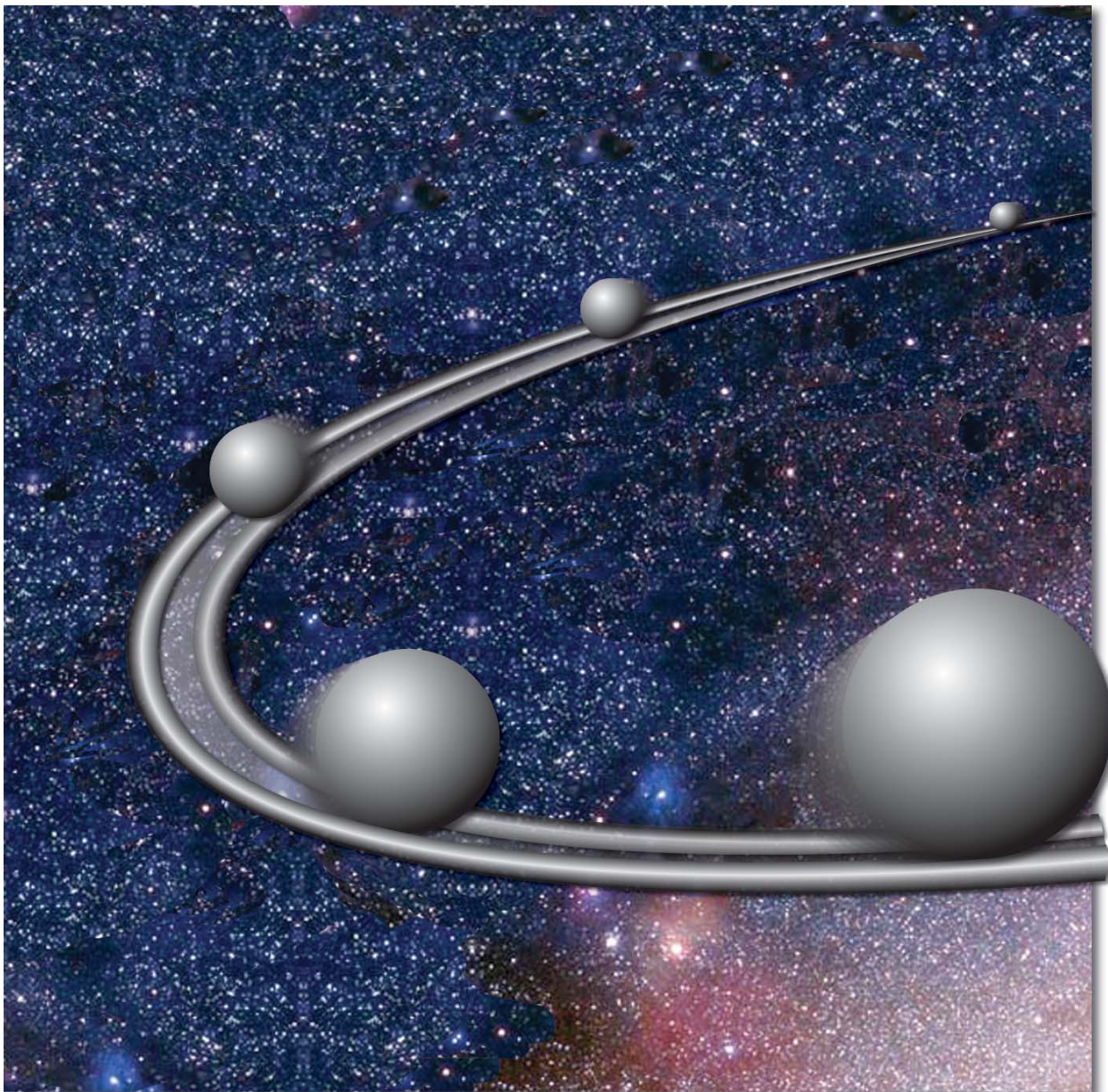


Cinématique et quantité de mouvement

PHY-5042-2

Guide d'apprentissage



sofad

NOTE

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

- Une fiche de commentaires

CINÉMATIQUE ET QUANTITÉ DE MOUVEMENT

PHY-5042-2
GUIDE D'APPRENTISSAGE

Cinématique et quantité de mouvement est le deuxième 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, du cahier *Activités expérimentales de mécanique*. Ces cahiers couvrent le volet « démarche expérimentale » du programme.

CINÉMATIQUE ET QUANTITÉ DE MOUVEMENT

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

Chargé de projets	Alain Pednault
Chargé de projets (éditions antérieures)	Jean-Simon Labrecque
Chargée de projets (édition initiale)	Mireille Moisan
Coordination	Céline Tremblay (FormaScience)
Rédaction	André Dumas (Chapitre 1) André Manoli (Chapitres 2 à 5) Suzie Asselin (Chapitre 6)
Soutien à la rédaction	Céline Tremblay (FormaScience)
Illustrations	Gail Weil Brenner (GWB)
Révision de contenu	Céline Tremblay (FormaScience) André Dumas
Révision linguistique	Dominique Chauveau
Mise en pages et infographie	Daniel Rémy (I. D. Graphique inc.)
Lecture d'épreuves	Dominique Chauveau
Mise à l'essai	Centre l'avenir à Mascouche Yves Brisson (Enseignant) Nancy Beauchamp (Élève) Martin Bolduc (Élève) Nicolas Cloutier (Élève)
Première édition	Juin 2002



Mars 2012

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 978-2-89493-230-8

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PRÉSENTATION	0.12
CONSIGNES D'UTILISATION	0.12
Les activités d'apprentissage	0.13
Les exercices	0.13
L'épreuve d'autoévaluation	0.14
Les annexes	0.14
Le matériel	0.14
ÉVALUATION	0.14
AUX ÉLÈVES INSCRITS EN FORMATION À DISTANCE	0.15
Le rythme de travail	0.15
Votre tuteur	0.15
Les devoirs	0.16
CINÉMATIQUE ET QUANTITÉ DE MOUVEMENT	0.17

CHAPITRE 1 – LA TRAJECTOIRE	1.1
1.1 – LA MÉCANIQUE : UN VASTE MONDE À EXPLORER	1.3
Des parcours de forme variée	1.5
Le mouvement, d'hier à aujourd'hui	1.9
1.2 – LA PERCEPTION DU MOUVEMENT	1.19
Une question de point de vue	1.19
Une question de sens	1.30
Effet Doppler	1.31
Mots clés du chapitre	1.43
Résumé	1.43
Exercices de synthèse	1.45

CHAPITRE 2 – LE DÉPLACEMENT	2.1
2.1 – LA DISTANCE PARCOURUE ET LE DÉPLACEMENT	2.3
La distance, ça a de l'importance	2.4
Question d'échelle!	2.7
Le déplacement, ça a du sens	2.11
2.2 – LES VECTEURS	2.19
Pareils, pas pareils?	2.20
Comme une flèche!	2.22
Donne-moi tes coordonnées... cartésiennes	2.27
Nous allons en ligne droite	2.33

Table des matières

2.3 – L'ADDITION DE VECTEURS	2.34
Méthode du polygone	2.40
Méthode du parallélogramme	2.45
Méthode des composantes	2.49
Décomposition d'un vecteur	2.50
Addition des composantes	2.54
Mots clés du chapitre	2.60
Résumé	2.60
Exercices de synthèse	2.63
Aux élèves inscrits en formation à distance	2.68
CHAPITRE 3 – LA VITESSE	3.1
3.1 – LA VITESSE : DÉFINITIONS ET INTERPRÉTATION	3.3
Où est-il à chaque instant?	3.5
Activité 3.1 – Suivi à la trace : trajectoire et graphique position-temps	3.6
À quelle vitesse roule-t-il?	3.15
Une vitesse qui a du sens	3.20
Un déplacement à deux vitesses : question de repère	3.26
3.2 – LE MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME	3.38
En ligne droite	3.39
Pente, vitesse et aire	3.46
Une équation qui dit tout	3.55
3.3 – LA MESURE DE LA VITESSE	3.63
Petit train va loin : principe de base	3.63
Activité 3.2 – Tchou! Tchou!	3.63
De la précision, s.v.p.	3.66
La cellule photoélectrique	3.67
Le stroboscope	3.69
L'enregistreur à étincelles	3.72
Activité expérimentale 1 – L'étude du mouvement rectiligne uniforme	3.74
À quelle vitesse roulez-vous?	3.74
Son et lumière : des vitesses vertigineuses	3.76
La vitesse du son	3.76
La vitesse de la lumière	3.78
3.4 – LA VITESSE ET LA VIE : LES MOYENS DE TRANSPORT	3.83
Le passé lointain	3.84
Le XIX ^e siècle et la révolution industrielle	3.85
Le XX ^e siècle	3.89
En ce début du XXI ^e siècle... ..	3.93

Mots clés du chapitre	3.95
Résumé	3.95
Exercices de synthèse	3.98
CHAPITRE 4 – L’ACCÉLÉRATION	4.1
4.1 – L’ACCÉLÉRATION : UNE VITESSE QUI VARIE	4.3
Sur une pente descendante...	4.3
Activité 4.1 – De plus en plus vite...	4.5
La vitesse du moment	4.10
Une accélération... de combien?	4.15
L’accélération, ça a du sens	4.21
Mouvement rectiligne	4.21
L’accélération est négative	4.25
Changement d’orientation	4.29
4.2 – LE MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ	4.31
Des graphiques aux équations	4.31
Activité expérimentale 2 – Le mouvement rectiligne uniformément accéléré	4.40
Une autre équation	4.41
Un cas particulier : $\vec{a} = 0$	4.46
4.3 – LA CHUTE LIBRE	4.48
Activité 4.2 – La chute d’un porte-clés	4.49
L’accélération gravitationnelle ou g	4.49
Une chute amortie	4.58
Activité 4.3 – Une facture qui s’envole...	4.58
Tomber sur la Lune	4.63
Mots clés du chapitre	4.66
Résumé	4.66
Exercices de synthèse	4.69
Aux élèves inscrits en formation à distance	4.74
CHAPITRE 5 – LES PROJECTILES	5.1
5.1 – LE MOUVEMENT D’UN PROJECTILE	5.3
Une trajectoire non rectiligne	5.5
Activité 5.1 – Tout ce qui monte redescend...	5.6
Un mouvement à la fois horizontal et vertical	5.9
Activité 5.2 – Mouvement vertical et mouvement horizontal	5.10
Les équations	5.17
La vitesse instantanée	5.21

Table des matières

5.2 – LES APPLICATIONS	5.25
L'angle de tir	5.26
Portée maximale	5.38
Une mise en orbite	5.39
Mots clés du chapitre	5.43
Résumé	5.43
Exercices de synthèse	5.45
CHAPITRE 6 – LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT	6.1
6.1 – QU'EST-CE QUE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT?	6.3
Des transferts de mouvement...	6.3
Une quantité orientée	6.8
Activité expérimentale 3 – La conservation de la quantité de mouvement	6.9
6.2 – LE PRINCIPE DE CONSERVATION	6.10
Des collisions rebondissantes	6.13
Rebondir à deux dimensions	6.16
Des collisions qui s'accrochent	6.23
6.3 – LA CONQUÊTE DE L'ESPACE	6.28
Propulsion d'une fusée	6.29
Largage d'étages	6.30
La correction de trajectoire d'un satellite	6.32
Mots clés du chapitre	6.35
Résumé	6.35
Exercices de synthèse	6.37
Aux élèves inscrits en formation à distance	6.44
CONCLUSION GÉNÉRALE	C.1
ÉPREUVE D'AUTOÉVALUATION	C.5
CORRIGÉ	C.23
ANNEXE A – SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS, FORMULES ET CONSTANTES	C.129
Grandeurs, unités et symboles	C.129
Formules et constantes	C.130
Multiples et sous-multiples des unités du SI	C.130
ANNEXE B – RAPPORT ET PROPORTION	C.132
Rapport	C.132
Proportion	C.132
ANNEXE C – NOTATION SCIENTIFIQUE	C.134
ANNEXE D – LOI DES EXPOSANTS	C.135
ANNEXE E – THÉORÈME DE PYTHAGORE	C.136

ANNEXE F – RELATION DE PROPORTIONNALITÉ	C.138
Relation directement proportionnelle	C.138
Relation inversement proportionnelle	C.139
Relation inversement proportionnelle au carré	C.140
ANNEXE G – CALCUL DE TEMPS	C.141
Les conversions	C.141
Des secondes à traduire en minutes ou en heures	C.141
Des minutes aux heures	C.142
Des décimales aux minutes et aux secondes	C.142
Additionner des temps	C.143
Soustraire des temps	C.144
ANNEXE H – RÉOLUTION D'ÉQUATIONS DU SECOND DEGRÉ	C.146
ANNEXE I – NOTIONS DE GÉOMÉTRIE	C.147
La mesure et la construction d'un angle	C.147
Mesure d'un angle à l'aide d'un rapporteur	C.147
Construction d'un angle à l'aide d'un rapporteur	C.148
La construction d'une perpendiculaire	C.148
Diverses caractéristiques des angles	C.149
La somme des angles d'un triangle	C.150
ANNEXE J – LISTE DES FIGURES	C.152
BIBLIOGRAPHIE	C.156
Livres	C.156
Sites Web	C.156
VOCABULAIRE	C.157
INDEX	C.165

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PRÉSENTATION

La Société de formation à distance des commissions scolaires du Québec (SOFAD) vous souhaite la bienvenue au cours *Cinématique et quantité de mouvement*. 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 *Cinématique et quantité de mouvement* est le deuxième d'une série de trois. Il se divise en six chapitres correspondant aux six objectifs terminaux du programme¹. 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 *Cinématique et quantité de mouvement* a pour objectif général d'améliorer la compréhension de la cinématique et de la quantité de mouvement ainsi que des aspects techniques et des changements sociaux associés au développement de la mécanique.

CONSIGNES D'UTILISATION

Le présent guide d'apprentissage constitue votre principal instrument de travail pour le cours *Cinématique et quantité de mouvement*. 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.

1. Vous trouverez, au début de chacun des chapitres, l'énoncé de l'objectif terminal ainsi que des objectifs intermédiaires qui y correspondent.

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 :

- soulignez 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 *Activités expérimentales de mécanique*.
- 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 *Cinématique et quantité de mouvement* 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 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 B 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 s'accompagne de trois devoirs uniquement lors d'une inscription en formation à distance. Chacun des devoirs contient aussi des questions relatives à la démarche expérimentale étudiée dans la section B 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.

CINÉMATIQUE ET QUANTITÉ DE MOUVEMENT

Lorsque nous entendons parler de mécanique, il nous vient spontanément à l'esprit l'automobile, le garage, les réparations coûteuses, les moteurs, les mains sales et d'autres idées semblables. Avec raison, car l'automobile occupe une place importante dans notre quotidien et elle est souvent indispensable à nos déplacements. En physique, la mécanique ne se limite cependant pas à notre véhicule de transport préféré; elle prend un sens plus large et concerne la description des mouvements et leur relation avec les actions qui les provoquent ou les influencent. Le terme « mécanique » vient du mot grec *mêkhanê* qui signifie « machine ».

La mécanique constitue donc la branche de la physique qui étudie les mouvements. Elle s'intéresse surtout à leur description quantitative par l'utilisation de graphiques et d'équations. C'est l'objet de la cinématique, du mot grec *kinêmaticos* qui veut dire « mobilité ». Cette science permet, par exemple, d'analyser après coup le comportement des automobiles dans une course, de prédire la position des planètes dans le ciel pour les jours, les mois ou les années à venir, ou encore de déterminer le temps qu'il faut pour se rendre de Chicoutimi à Québec, ou de Rivière-du-Loup à Gaspé.

La physique mécanique s'attarde aussi aux causes, c'est-à-dire aux forces qui engendrent les mouvements ou changent leur cours. Comment déplacer un objet immobile ou en équilibre? Pourquoi la Terre tourne-t-elle autour du Soleil? Comment utiliser un levier ou un système de poulies pour soulever des charges lourdes? Comment peut-on modifier la trajectoire d'un satellite? celle d'un parachutiste? ou celle d'une ogive nucléaire? La science qui étudie les relations entre les forces et les mouvements s'appelle la dynamique, du grec *dunamikos* qui signifie « force, puissance ». Elle a pour sujet les forces qui produisent les mouvements ou les transforment, et l'énergie qui les sous-tend. Elle explique aussi, par exemple, comment obtenir le mouvement d'un vélo, d'une automobile ou d'une grue par le jeu d'une série de pièces mécaniques ou de machines simples telles les leviers, les poulies et les engrenages.

Le premier cours du programme *Physique 5^e secondaire, Optique*, vous a 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 du comportement des couleurs. Les deux autres cours, celui que vous amorcez et le suivant, sont consacrés à la mécanique : celui-ci, *Cinématique et quantité de mouvement*, traite principalement de la description mathématique des mouvements (cinématique), tandis que *Force et énergie* explique les causes du mouvement et de ses variations, de même qu'il s'attarde à l'utilisation des machines simples (dynamique). Voyons maintenant plus en détail ce que contient le présent guide.

Le premier chapitre examine la notion de trajectoire, c'est-à-dire la description du parcours d'un objet en mouvement et sa représentation. Il y est aussi question de repère, car la description d'un mouvement dépend du point de vue où l'on se place; ainsi, le même mouvement peut être vu comme une droite ou comme une courbe selon la position de l'observateur. Le texte aborde également la détection du mouvement par l'ouïe, l'odorat et le toucher, dont l'apport ajoute des éléments importants à la perception visuelle. Un peu d'histoire fera ressortir que la notion de mouvement n'a pas toujours eu la même signification qu'aujourd'hui, et que son étude est jalonnée de plusieurs étapes importantes, marquées par des acteurs bien connus dont Aristote, Galilée, Newton et Einstein.

Le deuxième chapitre est consacré au déplacement et à la distance parcourue, dans le sens physique de ces termes. Nous y introduisons la notion de vecteur, un outil mathématique utilisé pour donner une description complète du déplacement, caractérisé à la fois par une grandeur, soit la distance entre les points de départ et d'arrivée, et par une direction, celle de la droite qui joint ces deux points.

La vitesse fait l'objet du troisième chapitre. Nous en donnons d'abord une définition qui, selon les besoins, fera appel ou non aux vecteurs. Le texte analyse en détail les mouvements rectilignes uniformes, soit des déplacements en ligne droite et à vitesse constante. Nous y apprenons à décrire rigoureusement ces mouvements à l'aide de graphiques et d'équations, et aussi à faire des mesures de vitesse. Le chapitre se termine par une discussion portant sur l'évolution des moyens de transport et l'influence de leur vitesse sur les sociétés qui en disposent.

Le quatrième chapitre traite de l'accélération, c'est-à-dire des variations de vitesse. Nous y étudions les mouvements rectilignes uniformément accélérés, mouvements en ligne droite dont l'accélération est constante. Graphiques, équations et vecteurs servent à décrire, par exemple, le mouvement d'une automobile entre sa mise en marche et le moment où elle atteint sa vitesse de croisière, ou encore pendant une période de freinage. Nous discutons aussi le cas particulier de l'accélération gravitationnelle, conséquence de l'attraction terrestre qui nous maintient au sol, fait tomber les pommes et entretient le mouvement de la Lune sur son orbite.

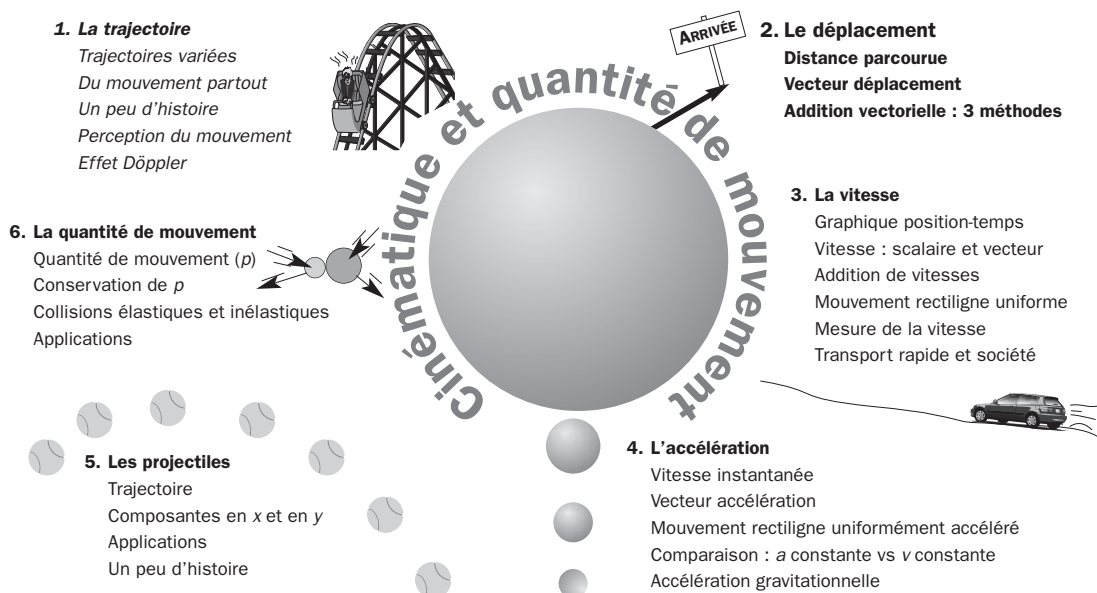
Le cinquième chapitre est consacré aux projectiles, balle de fusil, flèche ou balle de baseball, dont le mouvement se déroule dans un plan, contrairement aux cas étudiés précédemment, dont la trajectoire était linéaire. Les outils mathématiques sont de première importance pour déterminer, par exemple, à quel endroit un projectile atteindra sa cible, à quelle hauteur il montera, et d'autres questions semblables. Pour compléter, quelques éléments d'histoire tracent l'évolution des connaissances relatives à la trajectoire des projectiles.

La quantité de mouvement fait l'objet du sixième et dernier chapitre. Cette quantité caractérise les objets en mouvement selon leur masse et leur vitesse. Sa valeur totale est conservée (constante) dans un système formé de deux ou plusieurs objets, à condition qu'aucun corps extérieur n'agisse sur ce système. Grâce à cette propriété de conservation, nous pouvons prédire, par exemple, la direction que prendront deux boules de billard après une collision. L'étude de la quantité de mouvement ouvre la porte de la dynamique, centrée sur le concept de force qui sera vu en détail au cours suivant.

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

La présentation générale de ce guide est semblable à celle du précédent. Chaque chapitre commence par une liste d'objectifs, suivie d'une table des matières schématique qui le situe dans l'ensemble du cours. L'objet de chaque chapitre y est résumé en quelques points. À titre d'exemple, nous avons reproduit ci-après la table schématique qui paraît au début du chapitre 2 : le contenu du chapitre en cours (chapitre 2) est mis en évidence par des caractères gras, en contraste avec celui du chapitre complété (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



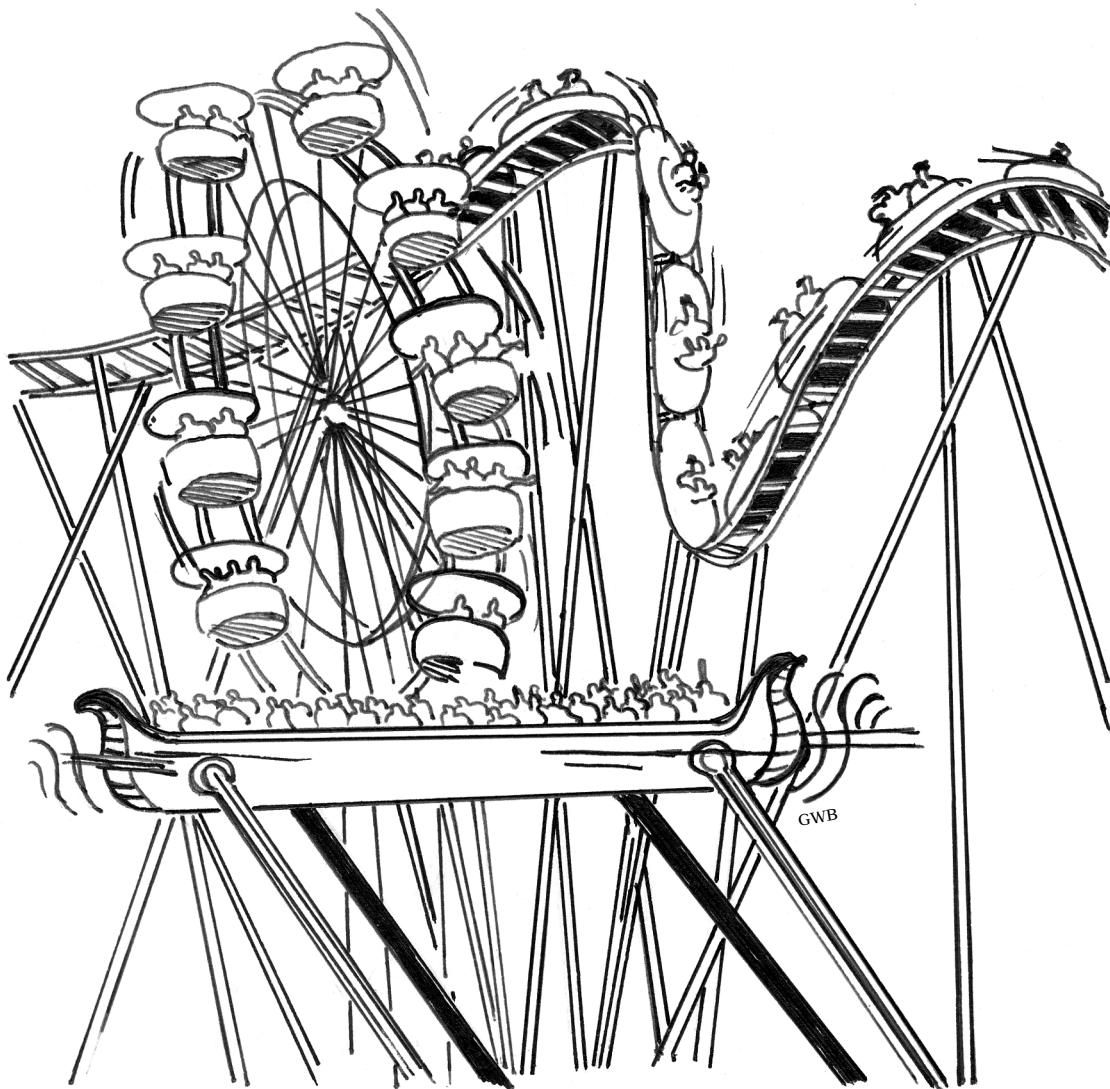
Introduction générale

Nous vous suggérons de consulter régulièrement cette table des matières pour mieux savoir où vous en êtes dans la progression du cours. Vous découvrirez bientôt qu'elle est un outil de travail efficace et qu'elle peut vous aider à mieux lier les notions abordées dans les différents chapitres.

Voilà! Vous êtes maintenant bien outillé pour parcourir ce guide. Reste à vous souhaiter un bon travail et, surtout, de bien vous amuser!

CHAPITRE 1

LA TRAJECTOIRE

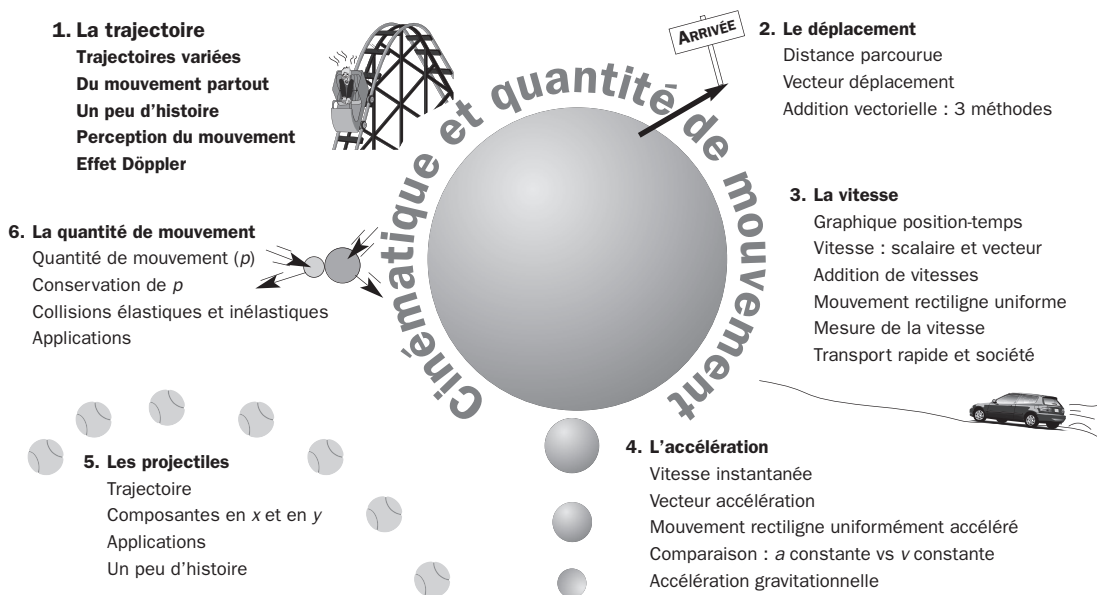


Objectif terminal 1

Analyser la notion de trajectoire ainsi que la perception du mouvement.

Objectifs intermédiaires

- 1.1 Donner des exemples de mouvements à différentes échelles.
- 1.2 Situer, dans une perspective historique, l'étendue des domaines couverts par la mécanique.
- 1.3 Associer des découvertes sur le mouvement des corps célestes à l'évolution de la perception de l'Univers par l'être humain.
- 1.4 Définir la notion de trajectoire.
- 1.5 Classer divers types de mouvement en fonction de leur trajectoire.
- 1.6 Illustrer, à l'aide d'exemples, que la perception d'un mouvement ou de l'immobilité dépend du point de vue de l'observateur.
- 1.7 Décrire, à l'aide d'exemples, la perception par les sens de divers mouvements.
- 1.8 Résoudre des problèmes portant sur la notion de trajectoire et sur la perception du mouvement.



Les astronautes Neil Armstrong et Edwin Aldrin furent les premiers à fouler le sol de la Lune le 20 juillet 1969. Il a fallu des calculs précis pour planifier les étapes du mouvement de la fusée, placer le module de commande en orbite autour de la Lune et faire atterrir le module lunaire à l'endroit prévu sur notre satellite naturel. Plus près de nous, d'autres réalisations humaines visent à faciliter nos déplacements : les patins, la bicyclette, l'avion, l'automobile, le bateau et d'autres encore. Par ailleurs, la vie est liée au mouvement : les oiseaux volent, les poissons nagent, l'homme marche et court. La matière inanimée se manifeste également dans le mouvement : vents, marées, chute de pluie et de neige, écoulement des ruisseaux, rivières et fleuves en sont des exemples probants.

Dans ce chapitre, nous aborderons la nature du mouvement en décrivant d'abord la notion de trajectoire et diverses formes qu'elle peut prendre. Nous verrons aussi comment ont évolué les théories du mouvement au fil des siècles. Vous découvrirez alors que nos perceptions sont parfois encore proches de celles d'Aristote, qui vécut il y a plus de 2 000 ans. Nous explorerons aussi quelques branches de la mécanique. Puis, nous verrons que la description d'un mouvement dépend de la position de l'observateur, et qu'il est important de préciser le repère qui lui sert de référence. Nous étudierons ensuite le rôle de nos sens dans la perception du mouvement. Pour clore le chapitre, nous analyserons l'effet Doppler, qui explique les variantes que nous entendons dans le bruit d'une source en mouvement, une sirène d'ambulance par exemple, par rapport à un observateur au repos.

1.1 – LA MÉCANIQUE : UN VASTE MONDE À EXPLORER

Tel que nous l'avons mentionné dans l'introduction générale de ce guide, la mécanique ne se limite pas à ce qui se trouve sous le capot de votre voiture. Elle constitue la branche de la physique qui étudie le mouvement et couvre ainsi un large éventail de connaissances théoriques et d'applications techniques. Mais qu'est-ce au juste que le mouvement? C'est ce qui bouge, répondrez-vous peut-être, en estimant que c'est évident. Oui, mais qu'est-ce que ça veut dire exactement? Quels paramètres interviennent lorsque nous parlons de mouvement? Dans un premier temps, creusons un peu plus ces questions en considérant un cas particulier : faisons une courte excursion en voiture et examinons le mouvement à différents points du parcours.

Imaginez-vous assis confortablement au volant d'une voiture; vous vous baladez un peu partout, en ville ou à la campagne. Un parcours agréable, sans accident et sans histoire particulière. Pourtant, des événements divers se produisent en cours de route et vous accomplissez plusieurs actions.



Exercice 1.1

Complétez la liste ci-dessous en nommant cinq actions relatives au mouvement de l'automobile.

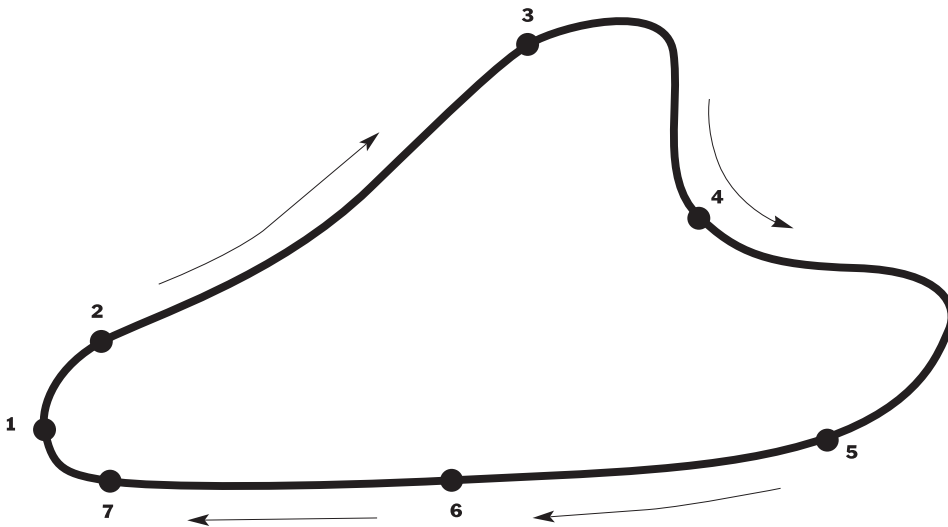
Monter une côte, diminuer la vitesse, _____

L'action prise par le conducteur d'une automobile dépend de la forme du parcours, de la signalisation et des obstacles rencontrés sur le chemin. Elle peut être relative à la vitesse (accélérer, ralentir, freiner, rouler à vitesse constante) ou à la direction à prendre (négocier un virage, monter, descendre).



Exercice 1.2

Le diagramme qui suit montre un circuit de course automobile. Les flèches indiquent le sens de la course. Identifiez le type d'action relative à la vitesse susceptible de se produire lorsque l'automobile passera à chacun des points numérotés. Il peut y avoir plus d'une action possible à chaque point.



La liste d’actions donnée dans les deux exercices ci-dessus nous renseigne déjà beaucoup. Elle indique d’abord que le mouvement est associé à la vitesse, qui peut rester constante, augmenter, diminuer ou s’annuler, selon que la voiture suit un mouvement régulier, accélère, ralentit ou s’arrête. Elle montre aussi que le mouvement suit une direction qui peut changer selon que la voiture monte, descend ou négocie un virage.

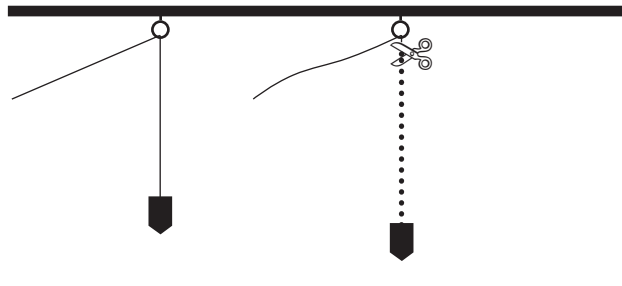
L’exemple de l’automobile montre à quel point le mouvement prend des formes variées. Pour s’y retrouver, nous pouvons classer les mouvements selon la façon dont leur vitesse évolue. Nous parlerons par exemple, de **mouvement uniforme**¹ si la vitesse est constante et de mouvement accéléré si la vitesse varie. Nous pouvons aussi catégoriser le mouvement selon la forme du parcours suivi. C’est ce que nous allons explorer dans la section qui suit.

DES PARCOURS DE FORME VARIÉE

Nous classons souvent les mouvements en fonction de la forme du parcours qu’ils décrivent, c’est-à-dire selon leur **trajectoire**. Plus spécifiquement, la trajectoire se définit comme la courbe décrite par un objet en mouvement. Nous parlons de **mouvement rectiligne** pour un objet dont la trajectoire est une ligne droite, et de mouvement non rectiligne pour les autres cas.

Observez la figure suivante : elle illustre ce qui se produit lorsque nous coupons le fil qui retient le plomb de droite. En tombant, le plomb occupe une série de positions successives qui dessinent sa trajectoire, une ligne verticale aussi droite que celle du fil qui retient le plomb de gauche. La trajectoire est donc la ligne constituée des points imaginaires marquant les positions successives occupées par l’objet en mouvement.

Figure 1.1 – Trajectoire rectiligne



L'ensemble des positions successives occupées par le plomb de droite dans sa chute décrit une trajectoire rectiligne verticale.

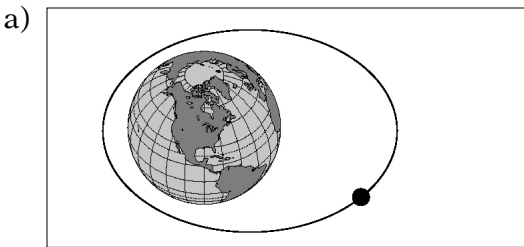
1. Les mots qui apparaissent en gras sont définis dans la section vocabulaire p. C.157 à la fin de ce guide.

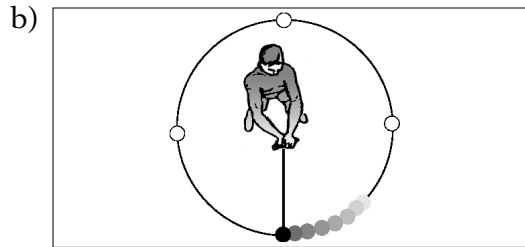
Un fruit, tout comme le plomb de la figure, tombe de l'arbre selon une droite verticale, décrivant ainsi un mouvement rectiligne. Mais tous les mouvements ne sont pas rectilignes. Par exemple, une voiture suit la courbe de la route dans un mouvement non rectiligne et la Terre tourne autour du Soleil en décrivant une **ellipse**. Les trajectoires possibles étant multiples, nous les caractérisons par leur forme. Nous utilisons le terme général de **trajectoire curviligne** pour désigner un parcours qui présente une ou plusieurs courbes. Plus spécifiquement, nous parlons de trajectoire circulaire lorsque l'objet décrit un cercle dans son mouvement, d'une **trajectoire elliptique** s'il trace une ellipse, ou d'une **trajectoire parabolique** si le tracé correspond à la fonction mathématique d'une **parabole**. Nous dirons aussi que la trajectoire est quelconque lorsque le tracé n'a pas de forme particulière.

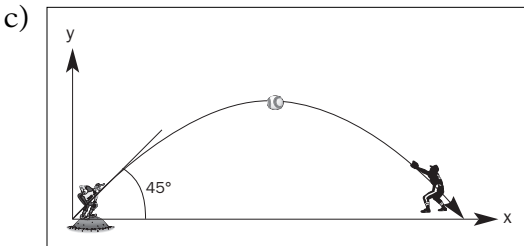


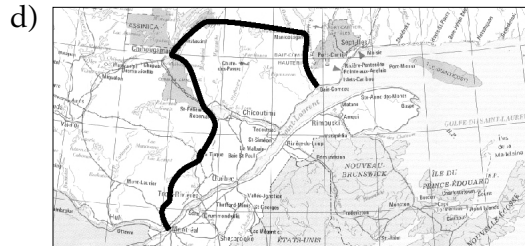
Exercice 1.3

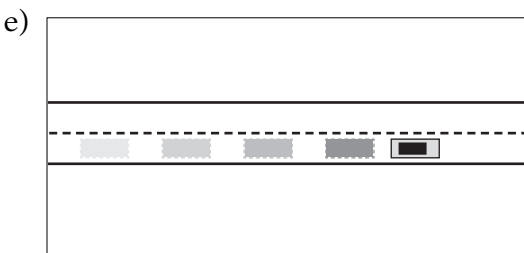
Pour chacune des situations suivantes, qualifiez chaque trajectoire à l'aide d'un mot.
















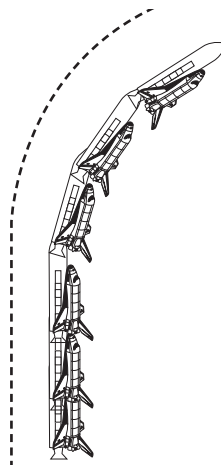
Ainsi, une pierre dans une fronde trace une trajectoire circulaire, un satellite décrit une trajectoire elliptique et la balle du joueur de baseball suit une trajectoire parabolique. Les divers types de trajectoires sont résumés dans le tableau qui suit.

Figure 1.2 – Types de trajectoires

Type de trajectoire	Représentation symbolique	Exemples
Rectiligne		Une auto sur une route droite
Circulaire		Une pédale autour de l'axe du pédalier d'une bicyclette
Elliptique		Une planète autour du Soleil
Parabolique		Une flèche tirée par un archer
Quelconque		Un trajet parcouru en voiture pour se rendre d'un endroit à un autre

Une trajectoire quelconque est souvent composée de segments spécifiques dont la forme correspond à un type de trajectoire en particulier. Nous pouvons alors la décomposer et désigner séparément ses parties. Par exemple, la navette spatiale décrit une trajectoire décomposable en deux étapes : elle suit d'abord une trajectoire rectiligne et, moins d'une minute après la mise à feu, l'orbiteur amorce une trajectoire curviligne.

Figure 1.3 – Trajectoire de la navette spatiale



La trajectoire de la navette est composée d'une trajectoire rectiligne verticale suivie d'une trajectoire curviligne.

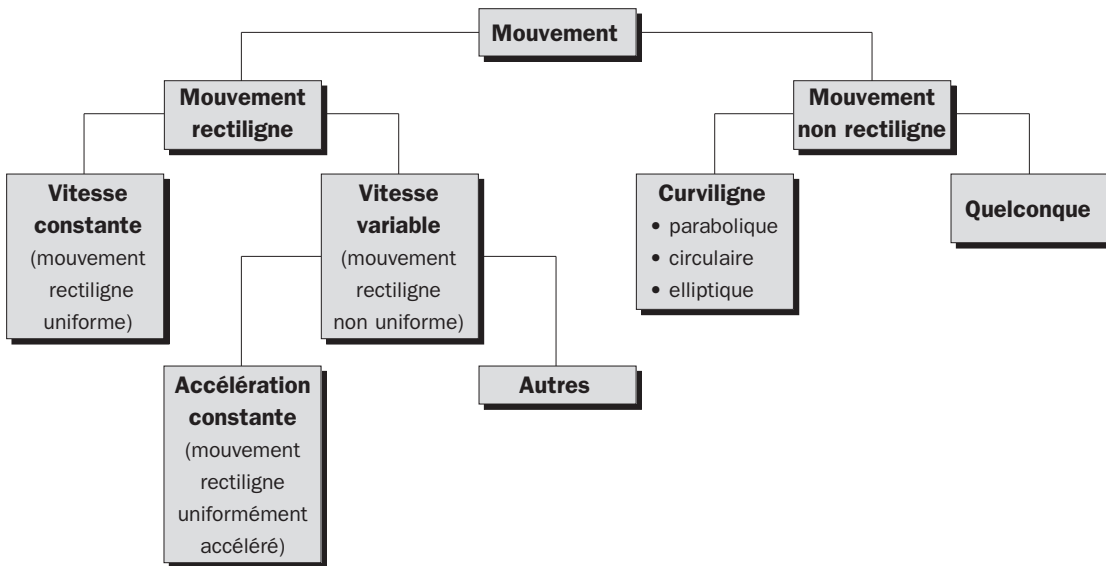
? Exercice 1.4

Voici une liste de mouvements que vous êtes susceptible d’observer dans votre environnement. Indiquez de quel type de trajectoire il s’agit.

- a) Le faisceau lumineux d’une lampe de poche. _____
- b) La rotation d’une roue de camion. _____
- c) Un enfant courant derrière un papillon. _____
- d) Un ballon de football lancé à 30° de l’horizontale. _____
- e) Une rondelle de hockey poussée d’un joueur à un autre. _____
- f) L’hélice d’un ventilateur. _____
- g) Le mouvement de la Terre autour du Soleil. _____
- h) Une luciole qui émet de la lumière la nuit. _____

En résumé, nous pouvons classer les mouvements selon la manière dont leur vitesse évolue ou encore selon la forme de leur trajectoire. Le schéma suivant montre une façon d’intégrer ces deux aspects dans le classement. Prenez le temps de bien l’examiner, car les termes utilisés reviendront fréquemment par la suite.

Figure 1.4 – Divers types de mouvement



Nous pouvons classer les mouvements selon que la trajectoire est rectiligne ou non. Les mouvements rectilignes se distinguent ensuite selon l’évolution de la vitesse. Les trajectoires non rectilignes peuvent être curvilignes, (circulaire, elliptique, parabolique) ou quelconques.

Ainsi, les mouvements varient selon la vitesse des corps et la forme de leur parcours. Mais pouvons-nous aborder de la même façon tous les corps, petits ou grands, quelle que soit l'étendue de leur trajectoire?

Constatons d'abord que le mouvement est présent tout autour de nous, à l'échelle humaine, dans la pomme qui tombe d'un arbre, le sang qui coule dans nos veines, un gamin qui saute à la corde, un papillon qui butine, l'hélice d'un ventilateur en marche et l'autobus qui nous mène au travail. Le mouvement peut aussi être invisible, par exemple s'il anime une particule minuscule comme une bactérie, une molécule ou même un atome, ou encore si le déplacement est minime. À l'autre extrême, le mouvement prend des proportions gigantesques dans l'orbite des planètes ou l'évolution des étoiles et des galaxies.



Exercice 1.5

Nommez trois exemples d'objets en mouvement ou de situations associées à chacune des échelles indiquées.

Échelle astronomique : _____

Échelle humaine : _____

Échelle microscopique ou plus petite : _____

Nous connaissons aujourd'hui le mouvement de vibration des atomes dans les molécules, et nous savons que la Lune tourne autour de la Terre qui, elle-même, tourne autour du Soleil. Ces connaissances sont relativement récentes, mais l'intérêt pour le mouvement est bien plus ancien. Les notions même de mouvement et de vitesse étaient jadis interprétées de façon différente de nos conceptions actuelles. Pour en savoir davantage, la prochaine section vous propose une brève excursion dans le passé.

LE MOUVEMENT, D'HIER À AUJOURD'HUI

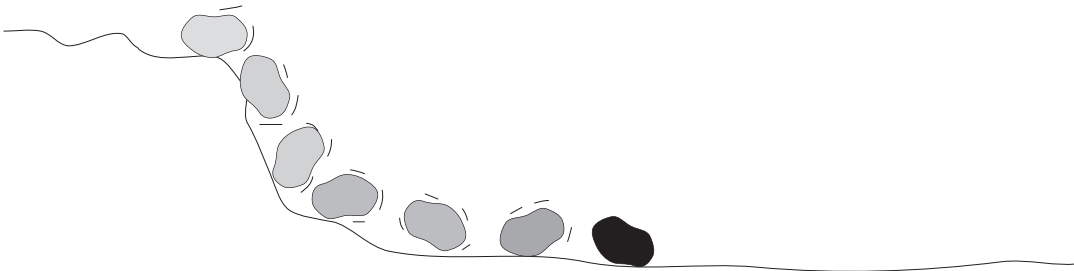
L'être humain s'intéresse au mouvement depuis des millénaires et il ne pouvait en être autrement si nous considérons que le mouvement a toujours fait partie de la vie. Les aspects pratiques ont souvent dominé l'intérêt; l'invention de la roue et la fabrication d'outils tels que le levier, la brouette, la poulie, les engrenages à roues dentées sont là pour nous le rappeler. Ces outils facilitent la mise en mouvement d'objets que nous voulons, par exemple, soulever ou déplacer. Ils permettent de remplir certaines tâches qui seraient autrement difficiles, voire impossibles à exécuter.

Dans ce qui suit, nous allons toutefois mettre l'accent sur les aspects théoriques du mouvement et nous attarder à l'évolution des idées dans ce domaine. Trois grands personnages vont jaloner notre étude : Aristote (384-322 av. J.-C.), philosophe grec de l'Antiquité, Galileo Galilei (1564-1642), dit Galilée, mathématicien et physicien italien, et Sir Isaac Newton (1642-1727), mathématicien et physicien anglais.

Voyons d'abord comment Aristote, qui a vécu au quatrième siècle avant notre ère, il y a plus de 2300 ans, concevait la physique du mouvement. Ce grand penseur voyait les choses selon une perspective bien différente de la nôtre. Pour lui, le repos c'est-à-dire l'immobilité, correspondait à l'état naturel des choses, alors que le mouvement était un état de transition entre deux positions de repos. Les objets inanimés, tout comme les organismes vivants, finissaient leur périple dans le « repos éternel ».

La nature aurait attribué à chaque objet le *lieu naturel* de repos vers lequel il tend à se diriger, s'il n'y est pas déjà, un lieu où il restera une fois qu'il l'aura atteint. Ainsi, selon Aristote, une pomme qui tombe ou une pierre qui dévale une pente cherche à rejoindre une position de repos. De même, le poids d'une pierre que nous tenons exprime cette attraction vers le bas, où se trouve le lieu naturel de repos des objets.

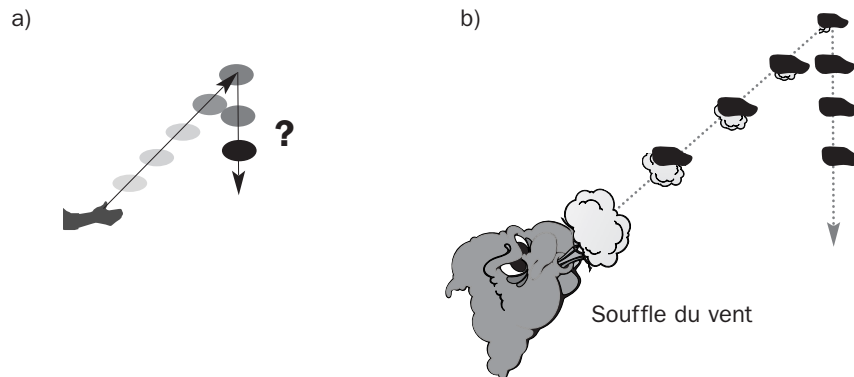
Figure 1.5 – Mouvement naturel selon Aristote



Selon Aristote, la pierre dévale la pente parce qu'elle est « programmée » par une caractéristique interne pour se diriger vers le bas et atteindre la position naturelle de repos.

Dans ces exemples, les objets se déplacent « d'eux-mêmes » vers le bas, ce pourquoi Aristote parle d'un mouvement naturel. Mais comment explique-t-il qu'une pierre lancée vers le haut monte avant de redescendre? Il pense que la pierre, poussée par le lanceur, suit un mouvement contre-nature en montant, car elle s'éloigne de son lieu naturel de repos, situé en bas. Aristote parle alors d'un mouvement violent vers le haut, parce qu'il résulte d'une action forcée. L'air pousse sur la pierre vers le haut. En montant, la poussée de l'air se fait de moins en moins sentir et la pierre finit par descendre.

Figure 1.6 – Mouvement naturel et mouvement violent



a) *Après son lancement, pourquoi la pierre ne retourne-t-elle pas immédiatement au sol, à sa position naturelle de repos?*

b) *Selon Aristote, l'air pousse sur la pierre pour la faire monter. À mesure que la pierre monte, la poussée de l'air sur celle-ci se fait de moins en moins sentir et la pierre finit par descendre.*

Aristote et ceux qui l'ont suivi ne pouvaient pas voir les choses comme nous. La vitesse était pour eux une notion intuitive, sans définition mathématique, sans unités de mesure et sans valeurs numériques. Elle servait à comparer, par exemple, deux athlètes en compétition; partis au même moment, le premier coureur arrivé avait été plus vite que l'autre. La notion de record n'existait pas et les résultats n'étaient pas comparés d'une course à l'autre. Par ailleurs, l'observation n'était pas le point de départ de l'élaboration des théories. On s'en méfiait au contraire, comme de l'expérimentation, car la nature imparfaite de l'être humain risquait d'entraîner une fausse perception de la réalité, régie par un ordre cosmique parfait ou divin.

Si ces idées paraissent plutôt étonnantes aujourd'hui, vous serez davantage surpris d'apprendre que les théories d'Aristote sont restées d'actualité pendant près de deux millénaires. Pour comprendre, il faut savoir que bon nombre d'entre elles ont longtemps été érigées en dogme par l'Église Catholique Romaine. Et valait mieux s'abstenir de les remettre en cause... Galilée l'apprit à ses dépens au début des années 1600.



Et pourtant, elle tourne

Au XVII^e siècle, le physicien italien Galileo Galilei, mieux connu sous le nom de Galilée, professait que la Terre et les autres planètes tournaient autour du Soleil, ce qui était contraire au modèle d'Aristote, pour qui la Terre était le centre de l'Univers. Les dirigeants de l'Église refusaient de remettre en cause les théories d'Aristote parce qu'elle les avait érigées en dogme. Le 22 juin 1633, le tribunal d'Inquisition² condamne Galilée ; on le force à dénier ses enseignements et à rétablir la « vérité ». Voici ce qu'il aurait dit, à genou, pour avoir la vie sauve : « *Moi, Galileo Galilei, professeur de physique et de mathématiques à l'Université de Florence, renonce à ce que j'ai enseigné, à savoir que le Soleil est au centre de l'Univers, immobile, et que la Terre n'en est pas au centre et immobile. Je renonce, abhorre, maudit de tout mon cœur et avec une croyance ferme toutes ces faussetés et hérésies. De même que de toute autre fausseté et opinion contraire aux enseignements de la Sainte Église* ». Ensuite, selon une légende populaire de l'époque, sans être entendu par ceux qui le jugeaient et tout en se relevant, il aurait murmuré ceci : « *Eppur, si muove!* ». Ce qui signifie : Et pourtant, elle tourne...

Galilée fut ensuite renvoyé dans sa ville natale où il vécut sous surveillance et à demi reclus jusqu'à sa mort. Son seul privilège : se rendre au couvent situé à une centaine de mètres de sa villa. Il mourut en 1642, année où naquit Isaac Newton, lequel marquera lui aussi la physique du mouvement.

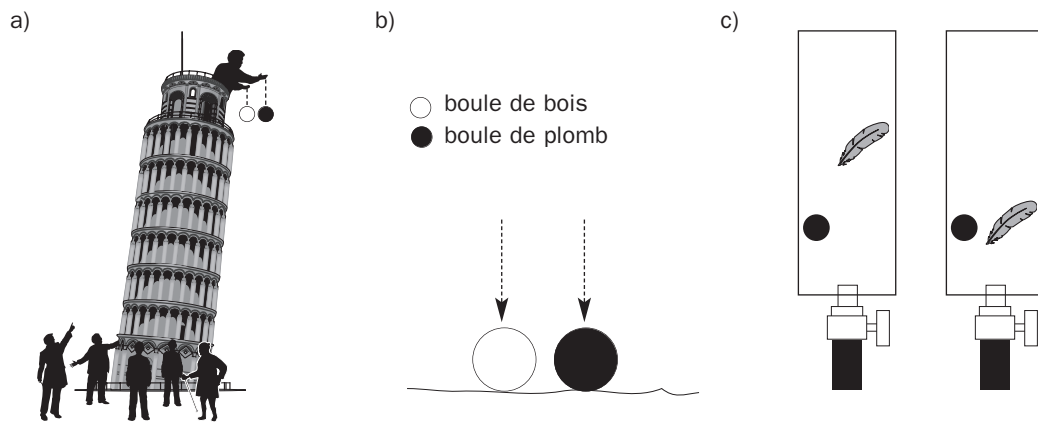
En 1992, l'Église Catholique Romaine, par la voix du pape Jean-Paul II, s'est finalement excusée auprès de la communauté scientifique pour les torts causés à Galilée... mort 350 ans plus tôt!

Au XVII^e siècle, les théories d'Aristote sont toujours en vogue et on se méfie encore de l'expérimentation comme source de savoir. Avant sa condamnation, Galilée va contribuer à changer les choses. S'il n'a pas inventé l'expérimentation, comme certains le prétendent, il lui donna ses lettres de noblesse : ses travaux se démarquent par des expériences élaborées minutieusement, des résultats reproductibles et des conclusions très claires. Pour lui, la science expérimentale est la référence : les observations doivent correspondre à la théorie, faute de quoi elle devra être modifiée ou rejetée.

La plus célèbre expérience de Galilée a consisté à comparer le temps de chute de deux objets de masse différente. Il laissa tomber deux boules de forme semblable mais de poids différent du haut de la Tour de Pise, en Italie (figure 1.7).

2. Le tribunal d'Inquisition avait été constitué vers le début des années 1200 par le pape Grégoire IX. C'était un tribunal juridique ecclésiastique. Il avait donc force de loi. Son mandat consistait à réprimer dans toute la chrétienté des crimes d'hérésie et d'apostasie, de sorcellerie et de magie. Les enquêtes menées étaient généralement vexatoires et entachées d'arbitraire. Des milliers de personnes furent inutilement condamnées à brûler sur un bûcher après être, dans certains cas, passées par la chambre des tortures. Considéré tribunal d'exception, il n'en demeura pas moins influent jusque dans les années 1600.

Figure 1.7 – La chute d'un corps



- a) Deux boules de même grosseur mais de poids différent sont lâchées du haut de la tour de Pise. Selon vous, qu'arrive-t-il lorsqu'elles atteignent le sol?
- b) Si vous aviez assisté à l'expérience, vous auriez entendu un seul bruit, car les pierres touchent le sol exactement au même moment. Peut-être auriez-vous été aussi surpris que les contemporains de Galilée...
- c) Dans le tube de gauche, la plume très légère tombe plus lentement que la bille, car elle est soutenue par l'air. À droite, on fait le vide d'air dans le tube et la plume tombe à la même vitesse que la bille.

En refaisant l'expérience, nous constatons chaque fois que les deux boules de la figure 1.7a arrivent en même temps au sol. L'expérience est donc reproductible et elle contredit les idées d'Aristote, qui soutient que les corps lourds tombent plus rapidement que les corps légers. Il est vrai qu'une plume ou une feuille, assez légère pour être portée par l'air, tombe plus lentement qu'une pierre. Cependant, si nous éliminons l'effet de l'air en faisant le vide dans un tube par exemple, tous les corps tombent à la même vitesse, quelle que soit leur masse ou leur forme³ (figure 1.7c).

Avec Galilée, le concept de mouvement prend définitivement ses distances sur les conceptions anciennes. Il affirme que le mouvement n'est pas une propriété intrinsèque d'un corps, autrement dit que le corps n'est pas « programmé » pour se diriger vers son « lieu naturel de repos », et que le mouvement n'affecte pas sa nature. Le mouvement concerne plutôt la position d'un objet et son évolution dans le temps par rapport à un autre objet qui sert de référence. Galilée a donc transformé la notion de mouvement; il fut un pionnier de l'expérimentation et il a donné une description précise

3. Tentez l'expérience si vous en doutez. Par curiosité, posez le problème à des amis, parents, etc. qui n'ont pas étudié la physique. Plusieurs répondront sans doute qu'un objet tombe d'autant plus vite qu'il est lourd. Expliquez-leur à votre tour ce qu'il en est ou mieux, faites-en la démonstration.

du mouvement des planètes et du mouvement des corps tels qu'une pomme qui tombe ou la trajectoire d'une flèche lancée par un archer.

Par ailleurs, s'inspirant des travaux du philosophe français René Descartes (1596-1650), Galilée pense qu'un objet en mouvement poursuit sa course à vitesse constante tant qu'il n'est pas influencé par un facteur extérieur, comme la rugosité de la surface sur laquelle il glisse, la rencontre d'un obstacle ou l'attraction exercée par un autre corps.

Isaac Newton (1642-1727) reprend à sa façon l'idée de Galilée et l'exprime ainsi : « Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, sauf si des forces extérieures⁴ exercées sur lui le contraignent d'en changer ». Autrement dit, un corps immobile reste au repos à moins d'être perturbé par une action extérieure; de même, un objet qui se déplace à vitesse constante décrit un mouvement rectiligne uniforme tant et aussi longtemps qu'il n'est pas soumis à une force extérieure.

Newton ira plus loin en expliquant le mouvement des corps par l'introduction du concept de force. Il apportera ainsi une dimension nouvelle en reliant les effets observés par Galilée aux causes qui les produisent. Les objets tombent parce que la Terre exerce une force d'attraction sur eux. La Lune est aussi attirée par la Terre et c'est pourquoi elle tourne autour sans s'en éloigner.

Avant Newton, on supposait, comme Aristote, que le mouvement des astres était gouverné par des lois différentes de celles qui s'appliquent à la pomme qui tombe ou à la flèche de l'archer. Newton révolutionnera les idées en affirmant que la même cause est à l'origine du mouvement de la Lune et de la chute des corps, et il démontrera mathématiquement sa théorie. La mécanique céleste, en correspondance avec les observations astronomiques, et la mécanique terrestre, qui s'intéresse aux mouvements à l'échelle humaine, sont désormais régies par les mêmes lois, aujourd'hui appelées les Lois de Newton⁵.

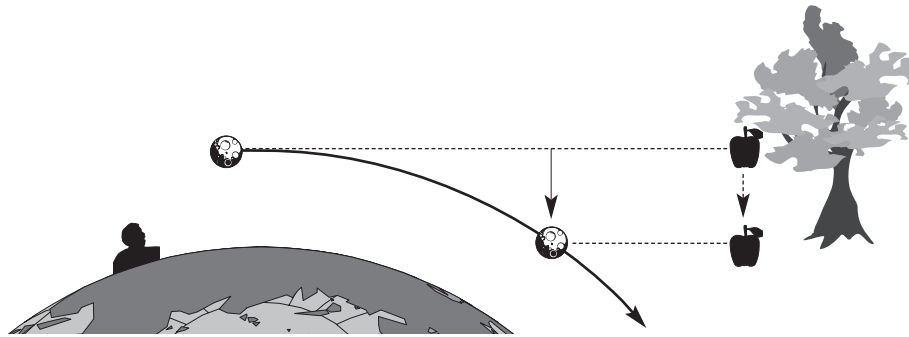
Newton a d'abord établi les lois de la chute des corps sur la Terre et, en 1665, il étend leur application au mouvement d'objets célestes tels que la Lune et les planètes. On raconte que le premier éclair de cette intuition lui vint en observant la chute d'une pomme mûre. Newton se lança dans une série de calculs et en déduisit la loi de la gravitation universelle, qui rend compte à la fois de la chute de la pomme et du mouvement de la Lune. Cette loi explique aussi l'aplatissement de la Terre aux pôles,

4. Les forces extérieures à l'objet peuvent être les forces dues au frottement, la force d'attraction à distance entre les objets eux-mêmes ou une force physique ou mécanique.

5. Les lois de Newton sont traitées dans le guide *Force et Énergie*, le prochain guide de cette série.

permet de calculer la trajectoire de la comète de Halley, qui nous visite tous les 76 ans⁶, et a contribué à la découverte de Neptune et de Pluton⁷, les planètes les plus lointaines de notre système solaire.

Figure 1.8 – Newton rêvassant



Quel lien y a-t-il entre le mouvement d'une pomme qui tombe et celui de la Lune en orbite autour de la Terre? Sous l'effet de l'attraction terrestre, la Lune « tombe » par rapport à un mouvement en ligne droite.

Homme solitaire, austère, acharné, intellectuellement ambitieux, Newton était sensible à la critique. Il attendit 22 ans avant d'annoncer sa découverte de la loi de la gravitation universelle, et le fit sous l'insistance de collègues émérites. Il était perfectionniste, n'acceptait pas facilement les idées préconçues et appuyait ses conclusions sur une expérimentation rigoureuse.

Les travaux de Galilée et de Newton s'inscrivent dans la science moderne et leurs conclusions sont toujours valables, bien que leur formulation actuelle est plus simple qu'à l'origine. Galilée décrit précisément la trajectoire des objets qui tombent et celle des planètes et de leurs satellites naturels (leurs lunes); ses résultats font aujourd'hui l'objet des manuels de base, comme ce guide, qui traitent de **cinématique**, la science qui s'intéresse à la description du mouvement des corps. Quant à Newton, ses travaux sur la gravité expliquent l'origine des mouvements décrits par Galilée; on enseigne les lois qu'il a établies dans tous les cours d'introduction à la **dynamique**, branche de la physique qui traite des causes du mouvement. Cinématique et dynamique représentent ainsi deux volets importants de la physique mécanique.

6. La comète de Halley était visible en 1986, et son prochain passage à proximité de la Terre est prévu pour 2 062.

7. C'est à partir de perturbations observées dans l'orbite d'Uranus que la présence de la planète Neptune fut découverte, localisée pour la première fois en 1845 par le Français Le Verrier, et celle de Pluton, découverte en 1930 par l'Américain Clyde Tombaugh.

Nous pouvons nous demander quelles connaissances ont été acquises en mécanique depuis le XVII^e siècle, époque où Galilée et Newton ont transformé le visage de la mécanique. Leurs travaux valent-ils pour tous les mouvements, quelle que soit la vitesse des objets ou leur taille? Voyons voir.

Il est clair que la science a pris un essor considérable depuis le XVII^e siècle. Des outils mathématiques plus performants, les progrès dans le domaine de la métallurgie et le développement de nouveaux matériaux ne sont que quelques facteurs qui ont permis une croissance très rapide des applications techniques de la mécanique. Par ailleurs, le volet théorique de cette science a aussi beaucoup évolué. La vaste étendue des sujets couverts a conduit les physiciens à subdiviser la physique mécanique en plusieurs branches qui s'intéressent toutes à l'étude du mouvement, mais s'appliquent à un domaine particulier et dans des conditions bien définies.

La mécanique classique est généralement associée aux travaux de Galilée et de Newton. Elle s'efforce de décrire et d'interpréter les phénomènes courants. Ses lois sont valables lorsque la vitesse des objets demeure faible en regard de la vitesse de la lumière⁸. Son domaine d'application est très vaste : elle couvre le mouvement des planètes, la flèche de l'archer et des phénomènes plus petits, jusqu'au mouvement des molécules dans un gaz, par exemple. Par contre, elle ne peut prédire le comportement des particules subatomiques, telles que l'électron ou le proton, qui peuvent atteindre des vitesses proches de celle de la lumière.

La **mécanique des fluides** étudie le comportement des fluides (liquides et gaz) en mouvement. Outre son volet théorique, la mécanique des fluides trouve des applications multiples, par exemple dans le fonctionnement hydraulique de la transmission d'une voiture et de ses freins, des presses utilisées pour le moulage de pièces en métal ou en plastique, ou encore dans la conception de la forme des ailes d'avion, l'écoulement de l'air autour de l'aile étant déterminant sur la performance de l'appareil. Vous aurez l'occasion d'aborder ce sujet lorsqu'il sera question du principe d'Archimède dans le prochain cours de physique.

La thermodynamique, que nous pourrions aussi appeler mécanique de la chaleur, étudie la chaleur et son interaction avec la matière; elle couvre entre autres les relations entre la chaleur et le mouvement, dont la connaissance a conduit à l'invention de la machine à vapeur et, un peu plus tard, à celle du moteur à combustion interne de l'automobile.

8. La vitesse de la lumière, notée c , est de 300 000 km/s.

La **mécanique relativiste** s'intéresse au mouvement des corps qui se déplacent à des vitesses approchant celle de la lumière, et que la mécanique classique ne peut expliquer. Les particules subatomiques (protons, électrons, etc.) peuvent atteindre des vitesses de cet ordre dans les accélérateurs de particules, dans les vents solaires ou encore à proximité des trous noirs. Les lois de la mécanique relativiste ont été développées par le physicien allemand Albert Einstein (1879-1955), qui en présenta une première version dès l'âge de 26 ans. La relativité a remis en question les conceptions de l'espace et du temps. Ainsi, par exemple, le temps ne s'écoule pas de la même manière selon que nous sommes au repos ou que nous nous déplaçons à une vitesse proche de celle de la lumière. Pour un voyageur aussi rapide, le temps s'écoule plus lentement, les objets rétrécissent et leur inertie augmente.



Dilatation du temps

Selon Einstein, le temps s'écoule plus lentement quand un objet se déplace à haute vitesse.

Les horloges atomiques sont des horloges de haute précision qui peuvent mesurer des milliardièmes de seconde. En 1971, des scientifiques utilisèrent ce type d'horloge pour vérifier l'idée d'Einstein. Une horloge atomique fut placée à bord d'un avion volant à 966 km/h autour de la Terre et une autre demeura au repos au sol. Au début de l'expérience, les deux horloges indiquaient le même temps. Au retour de l'avion, l'horloge indiquait un retard de quelques milliardièmes de seconde.

Mais, direz-vous, pourquoi une si petite différence? À nos yeux, une vitesse de 966 km/h peut paraître rapide mais lente en regard de la vitesse de la lumière qui est de 300 000 km/s. Pour observer un retard de temps notable, il aurait fallu que les avions voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière.

La **mécanique quantique** repose sur la théorie des quanta, selon laquelle l'énergie est transportée par petits paquets indivisibles, les quanta. Elle est née de l'échec des concepts classiques d'onde et de particule à décrire les phénomènes qui se passent aux échelles atomique et subatomique. Toutes les tentatives d'application des lois de la mécanique classique au comportement atomique de la matière avaient été vaines. La mécanique quantique a d'abord été appliquée à la lumière, puis à la physique de l'atome. Elle explique, par exemple, le comportement d'un électron dans le nuage électronique d'un atome. L'électron, tout comme la lumière, agit parfois comme une particule, parfois comme une onde. Si vous êtes perplexe, sachez que ces notions sont difficiles à aborder parce qu'elles ne trouvent pas leur équivalent dans le vécu quotidien.



Exercice 1.6

1. Associez à chacun des énoncés la branche de la mécanique qui le couvre. Écrivez le chiffre correspondant entre les parenthèses au bout de chaque énoncé.

Branches de la mécanique :

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| 1) mécanique classique (dynamique) | 4) mécanique quantique |
| 2) mécanique classique (cinématique) | 5) mécanique des fluides |
| 3) mécanique relativiste | |

Énoncés :

- | | |
|--|--------|
| a) La trajectoire de la comète de Halley. | () |
| b) Le mouvement des électrons autour du noyau d'un atome. | () |
| c) Le mouvement de la Terre autour du Soleil. | () |
| d) L'électron peut être considéré comme une onde. | () |
| e) La distance parcourue par une automobile. | () |
| f) La description du mouvement des planètes autour du Soleil. | () |
| g) Le temps s'écoule plus lentement lorsque nous approchons de la vitesse de la lumière. | () |
| h) La pression exercée par l'eau sur un corps plongé augmente avec la profondeur. | () |
| i) Nous frappons une rondelle de hockey pour accélérer son mouvement. | () |

Ouf! La mécanique comporte plusieurs branches dont certaines semblent très complexes. Ne vous inquiétez pas, celles-là ne font pas partie de ce cours. Rappelons que le mouvement reste le sujet commun à toutes ces branches, et que ce guide est consacré principalement à la cinématique classique, l'un des volets importants de la mécanique classique. Revenons donc à la notion de trajectoire et voyons comment sa description peut dépendre de la perception que nous en avons.

1.2 – LA PERCEPTION DU MOUVEMENT

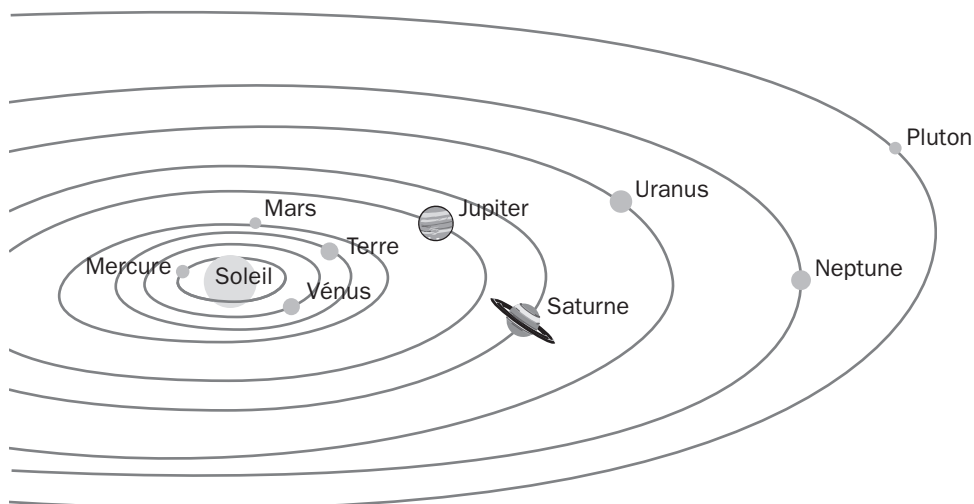
Considérons le cas suivant. Une collision entre deux voitures vient de se produire à un carrefour achalandé. Le policier chargé de l'enquête d'usage questionne deux témoins qui ont vu l'accident d'un point de vue différent. Le premier déclare que l'arrière de la voiture blanche a dérapé avant l'accident. Il dit aussi que la voiture noire roulait trop vite. D'après le second témoin, il n'y aurait pas eu de dérapage et la voiture noire roulait à une vitesse raisonnable, en deçà de la limite permise.

Bien que la subjectivité joue un rôle important chez les témoins, cet exemple illustre que la perception d'une scène en mouvement peut varier selon le point de vue de l'observateur, à la fois en ce qui concerne la vitesse des objets et leur trajectoire. Et cette perception diffère, même si les observateurs sont parfaitement objectifs. Nous explorerons plus à fond cette idée dans ce qui suit.

UNE QUESTION DE POINT DE VUE

La façon dont une trajectoire est décrite dépend du point de vue où l'on se place. Considérons de nouveau le mouvement des planètes. Nous savons aujourd'hui qu'elles tournent autour du Soleil en décrivant des trajectoires elliptiques. C'est ce que verrait un observateur situé en dehors du système solaire.

Figure 1.9 – Le système solaire



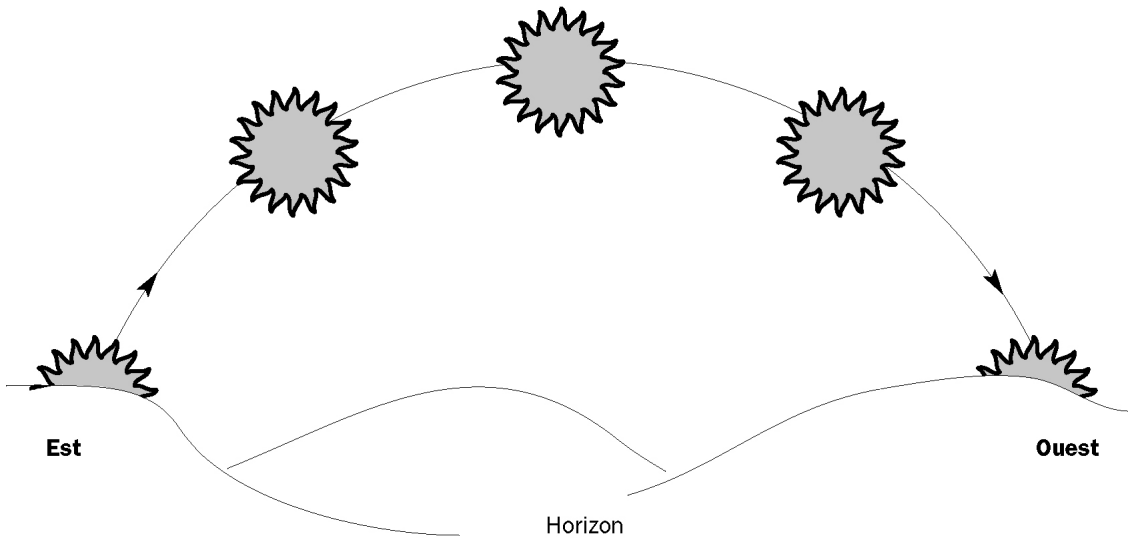
*Orbites elliptiques des planètes autour du Soleil,
telles que nous les voyons de l'extérieur du système solaire.*

Nous avons l'habitude de cette représentation du système solaire. Bien qu'elle soit juste, elle ne correspond pas directement à ce que nous observons de la surface de la Terre. Aristote croyait que la Terre était immobile et située au centre de l'Univers.



Exercice 1.7

La figure suivante montre la position du Soleil à différents moments de la journée, tel que nous l'observons de la Terre.



a) Décrivez le mouvement du Soleil, tel que nous le percevons de la surface de la Terre.

b) Décrivez le mouvement des étoiles, de la tombée de la nuit jusqu'à l'aube.

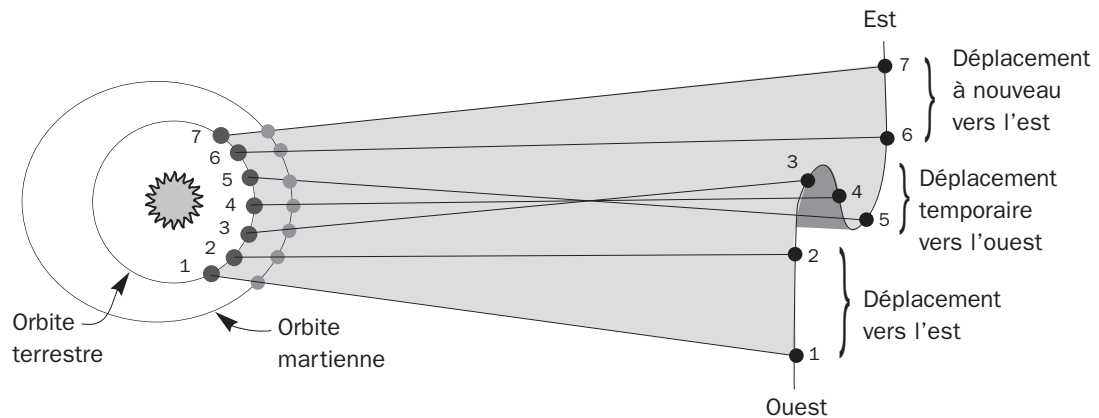
c) Dans votre quotidien, avez-vous l'impression que la Terre bouge?

d) Dans votre quotidien, avez-vous l'impression que la Terre tourne sur elle-même?

e) Selon vous, comment Aristote en est-il venu à penser que la Terre était le centre de l'Univers?

La perception d'Aristote n'est pas surprenante au départ, sachant qu'il voyait le Soleil se déplacer du matin au soir, qu'il n'avait pas de télescope, et que le monde céleste semblait inaccessible. Quelques siècles plus tard, l'astronome grec Claude Ptolémée (85-160) note la position de certaines planètes tous les soirs et constate qu'elles progressent dans une direction, mais que leur trajectoire s'inverse de temps en temps (mouvement rétrograde), comme si elles « reculaient » pendant un certain temps avant de se remettre à avancer de plus belle.

Figure 1.10 – Mouvement apparemment rétrograde de la planète Mars vu de la Terre



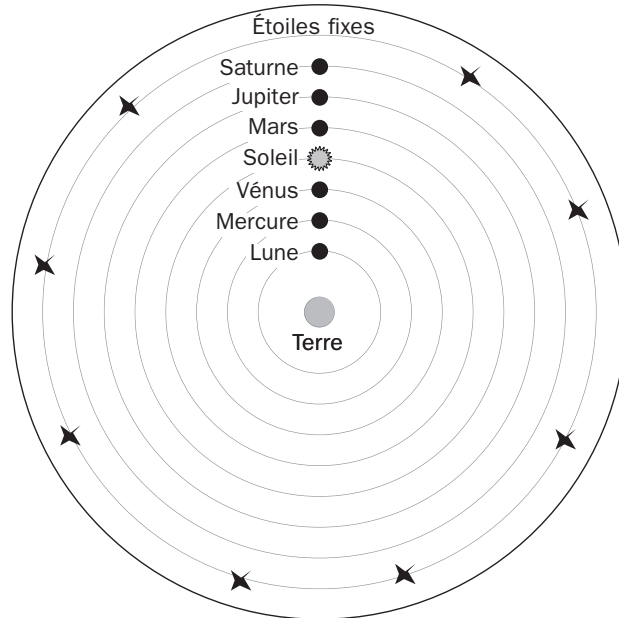
Mouvement apparent de la planète Mars, telle que nous l'observons dans le ciel de la Terre sur une période de quelques mois. Ptolémée avait observé le mouvement rétrograde des planètes et tentait de l'expliquer à l'intérieur d'un modèle géocentrique (voir aparté ci-dessous).



L'Univers géocentrique selon Aristote et Ptolémée

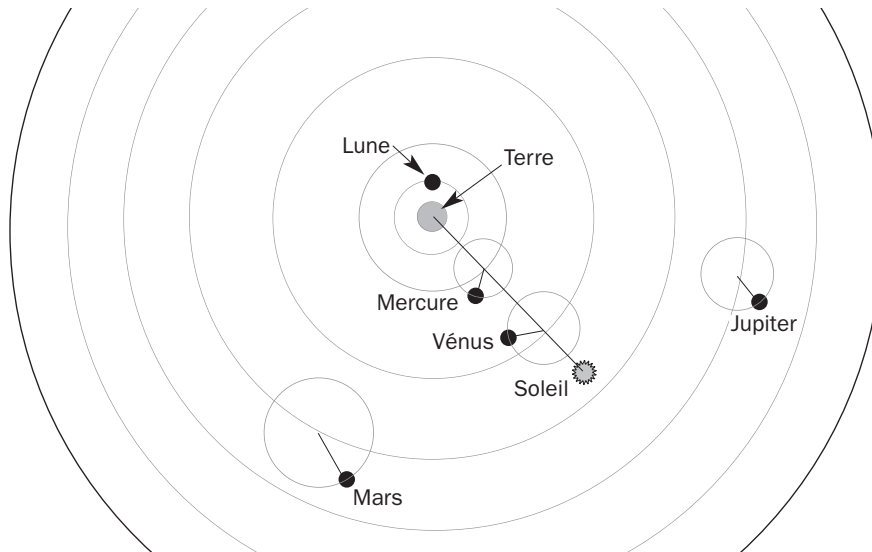
Selon Aristote, chaque planète occupe une position fixe dans sa propre sphère autour de la Terre. Les sphères tournent autour de la Terre, centre de l'Univers. Puisque chaque corps céleste occupe une position naturelle, comment se fait-il alors qu'ils ne tombent pas au repos, tout comme les objets sur la Terre? Aristote explique que les corps célestes ne tombent pas en supposant que les lois qui gouvernent les corps célestes sont différentes de celles qui gouvernent les objets terrestres : l'état naturel est celui du repos sur la Terre, mais l'état naturel des astres est le mouvement perpétuel circulaire.

Modèle de l'Univers selon Aristote



Aristote plaçait la Terre au centre de l'Univers puisqu'il allait de soi que l'homme, être intelligent, devait occuper l'espace central. Ce modèle est dit géocentrique (géo- vient du grec « gê », signifiant Terre). Quand la Terre tourne sur elle-même, elle entraîne avec elle les astres, qui conservent leur position d'origine.

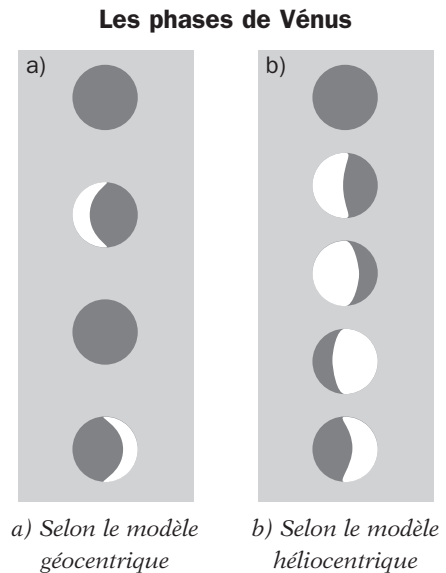
Modèle géocentrique selon Ptolémée



Le modèle de Ptolémée a été construit à partir d'observations à l'œil nu. Il tente d'expliquer le mouvement rétrograde des planètes à l'intérieur du modèle géocentrique, en introduisant un petit mouvement circulaire qui se superpose à l'orbite principale.

Près de 1400 ans après Ptolémée, l'astronome Polonais Nicolas Copernic (1473-1543) tente de décrire le plus simplement possible la trajectoire des planètes. Il a l'idée de placer le Soleil au centre et, en transposant les mouvements observés, découvre que les trajectoires sont simples, qu'elles sont toutes de forme semblable et qu'elles ne présentent plus de mouvement rétrograde quand l'observateur se place à l'extérieur du système solaire. Autrement dit, il affirme que si nous observions le ciel d'un autre point de vue, nous ne verrions plus de mouvement rétrograde. C'est le premier modèle **héliocentrique** (du grec « hélios » signifiant feu, Soleil), c'est-à-dire dans lequel le Soleil est au centre et les planètes, incluant la Terre, sont en orbite autour. En 1610, Galilée confirme ce modèle; il s'appuie sur les observations qu'il fait à l'aide d'une lunette de sa fabrication dont le grossissement est d'environ 10 fois. Il découvre entre autres que d'autres planètes ont des lunes telles que les satellites Io, Europe, Ganymède et Callisto qui gravitent autour de la planète Jupiter et que ces objets nouveaux n'ont pas leur place dans la conception de l'univers d'Aristote. Il démontre ainsi que la théorie géocentrique d'Aristote et de Ptolémée selon laquelle tous les corps célestes tournent autour de la Terre, est fausse.

Mais sa preuve la plus probante est sans contredit celle associée aux phases de la planète Vénus. Tout comme la Lune, Vénus passe par un cycle de phases complet. Selon un modèle géocentrique, Vénus devrait passer par un cycle de quatre phases. À l'aide de son télescope, Galilée observa que Vénus passe plutôt par un cycle de cinq phases et il n'y a qu'une façon d'expliquer ce phénomène : le Soleil, et non la Terre, doit être au centre de notre système planétaire, ce qui confirma le modèle héliocentrique.



Copernic

Copernic passe l'essentiel de son temps à scruter le ciel avec des instruments rustiques. Dans un livre intitulé « *Des révolutions des orbres célestes* » publié en 1543, il y défend l'idée d'une nouvelle vision de l'Univers dont la Terre n'est plus le centre. La Terre serait comme toutes les planètes, un simple satellite du Soleil. Celle-ci, de surcroît, tournerait sur elle-même. Comme l'Église avait érigé en dogme le modèle d'Aristote, il fut condamné, après sa mort en 1616, comme étant hérétique.

? Exercice 1.8

Quelle différence y a-t-il entre un système planétaire héliocentrique et un système géocentrique?

? Exercice 1.9

La figure 1.10 montre comment est perçue la trajectoire de la planète Mars telle que nous la voyons de la surface de la Terre. Les lignes montrent la direction selon laquelle nous voyons Mars de la Terre à différents moments.

a) Décrivez le mouvement de la planète tel que nous le percevons de la surface de la Terre.

b) Qu'est-ce qui explique cette impression?

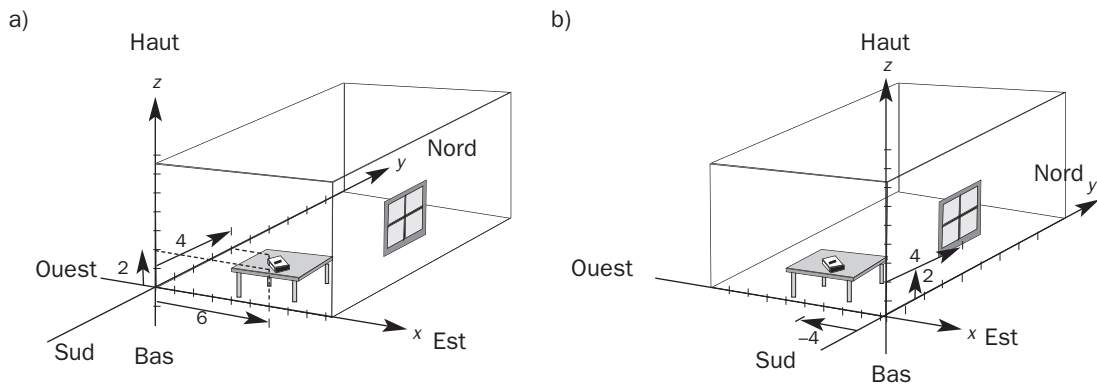
c) À supposer que vous êtes à l'extérieur du système solaire, comment décririez-vous la trajectoire de Mars?

Nous disons qu'il y a mouvement lorsqu'un objet change de position par rapport à un repère considéré comme étant fixe ou immobile. Le choix du repère dépend de la situation. Dans le modèle géocentrique, la Terre sert de repère; elle est considérée comme étant immobile et le mouvement des planètes est décrit par rapport à elle. Dans le modèle héliocentrique, c'est le Soleil qui tient lieu de repère immobile.

Plus près de notre quotidien, c'est généralement le sol ou un objet fixé au sol qui sert de repère. Par exemple, pour une auto, un camion ou un vélo, ça pourrait être un arbre, une maison, un poteau d'électricité, une borne-fontaine.

Pour mieux comprendre l'idée de repère, considérons le cas où nous voulons donner la position d'un objet au repos dans un système de coordonnées cartésiennes. Sur la figure 1.11, plusieurs repères sont possibles pour décrire la position du livre. Comme origine, nous pouvons utiliser le coin sud-ouest de la pièce à l'intersection du plancher et de deux murs (figure 1.11a). Dans ce repère, le livre est à six mètres à l'est, quatre mètres au nord et deux mètres vers le haut. En termes de coordonnées x, y, z , nous pouvons écrire $(6, 4, 2)$. Un observateur qui regarde par la fenêtre choisira un repère différent (fig. 1.11b) et donnera les coordonnées $(-4, 4, 2)$. Le livre n'a pas changé de place, mais les coordonnées utilisées pour décrire sa position varient selon le repère.

Figure 1.11 – Localiser un objet dans une pièce



a) L'origine du repère est dans le coin sud-ouest au bas de la pièce.
Les coordonnées du livre sont $(6,4,2)$.

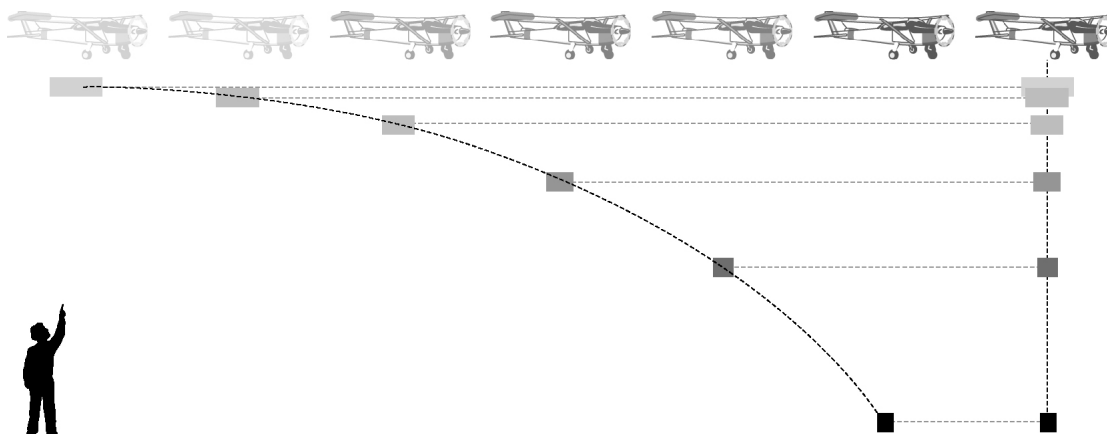
b) L'origine du repère est dans le coin sud-est au bas de la pièce.
La position du livre est donnée par $(-4,4,2)$.

Il est donc essentiel de préciser le repère choisi lorsque nous donnons la position d'un objet ou encore lorsque nous décrivons une trajectoire. En pratique cependant, nous omettons souvent de mentionner le repère lorsqu'il s'agit du sol; il est implicitement considéré puisqu'il n'y a pas d'ambiguïté possible.

Il est important de retenir qu'il n'existe pas de repère absolu pour déterminer la position des objets au repos ou en mouvement. La position d'un objet est toujours donnée par rapport à d'autres objets, c'est-à-dire par rapport à un repère arbitrairement choisi. La situation est semblable pour les trajectoires. Comme nous l'avons vu pour le mouvement des planètes, la trajectoire ne change pas, mais la forme du parcours décrit varie selon le repère choisi.

Sur la figure suivante, un avion largue une caisse. Du point de vue du pilote, la caisse décrit une trajectoire rectiligne verticale, car l'avion continue à se déplacer à l'horizontale au-dessus de la caisse. Par contre, un observateur au sol verra la caisse suivre une trajectoire curviligne (plus précisément parabolique, dans ce cas-ci).

Figure 1.12 – Trajectoire dans deux repères différents



L'avion se déplace à vitesse constante, et la caisse, tout en tombant, poursuit son mouvement horizontal à la même vitesse que l'avion. Le pilote voit la caisse diminuer de grosseur à mesure qu'elle descend, et il perçoit une trajectoire rectiligne verticale. Pour un observateur au sol, la caisse suit une trajectoire curviligne (parabolique) résultant de la combinaison du mouvement horizontal imprimé par l'avion et du mouvement vertical associé à la chute de l'objet.

La description de la trajectoire dépend du repère de l'observateur. Cet exemple montre clairement que la trajectoire n'est pas absolue, mais relative à un repère, d'où l'importance de le préciser dans les cas où il y a risque de confusion.



Exercice 1.10

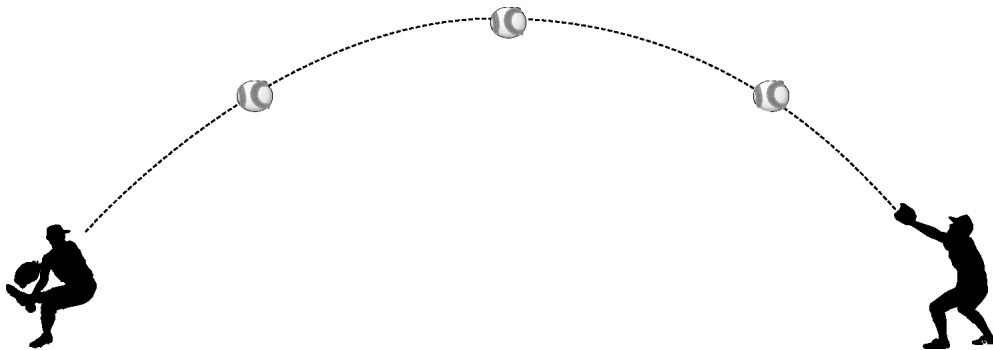
1. Un joueur de basket-ball dribble sur place avec le ballon verticalement sous ses yeux.
 - a) Que voit-il? Est-ce une trajectoire? Justifiez votre réponse.

- b) Un partisan dans les estrades voit le joueur dribbler. Tracez la trajectoire, sachant que le partisan est :

- dans l'estrade, à la mi-hauteur entre la main (horizontale) et le plancher.

- dans l'estrade, plus haut que le joueur.

2. La figure suivante montre un joueur de baseball qui lance la balle à un autre joueur.



a) Comment devez-vous être placé pour voir la trajectoire telle qu'elle est montrée sur la figure?

b) Si vous étiez placé de biais, à 45° puis à 30° par rapport au joueur de gauche, qu'elle aurait été la trajectoire perçue? Tracez la trajectoire perçue dans chaque cas.

c) Si vous étiez à la place du joueur qui lance la balle, quelle aurait été la trajectoire perçue? Tracez cette trajectoire.

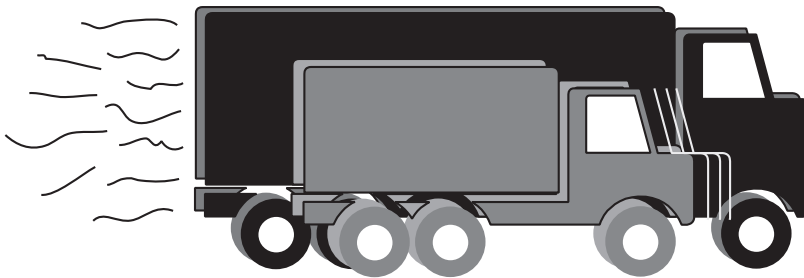
3. Vous êtes un astronaute immobile dans l'espace et muni de puissantes jumelles qui vous permettent d'observer une personne immobile pendant la période où la Terre est éclairée. Tracez la trajectoire que vous percevez pour cette personne, en considérant que vous n'êtes pas en orbite autour de la Terre.



Quand une voiture qui avance... recule...

Devant un objet au repos, placé devant un arrière-plan en mouvement, nous avons l'impression que l'objet est en mouvement. Des tests psychologiques démontrent que la plupart du temps, l'observateur conclut que l'arrière-plan est au repos et que l'objet se déplace, alors que c'est le contraire qui se produit. C'est que nous avons tendance à supposer spontanément que le plus gros objet est immobile.

Quand une voiture qui avance... recule...



Le gros camion se déplaçant vers la droite sert de repère. La fourgonnette se déplace moins rapidement vers la droite. Un observateur au repos, sans autre point de repère, aura l'impression que la fourgonnette se déplace vers la gauche.

Dans certaines situations, nous pouvons avoir l'impression d'être immobile même si nous sommes en mouvement par rapport au sol. Deux trains qui se déplacent dans la même direction, exactement à la même vitesse, peuvent donner cette impression. Un passager qui regarde du côté du train voisin peut croire que son train est arrêté ou que les deux trains sont immobiles. Il verra que son train est en mouvement s'il regarde de l'autre côté et voit défiler des arbres, des autos, des poteaux d'électricité, etc. Vous pouvez faire la même expérience en voiture, mais vous devez prendre soin de regarder seulement la voiture voisine en ignorant tous les autres repères.

En résumé, pour décrire une trajectoire, il est essentiel de préciser le repère ou la référence par rapport à laquelle l'objet est en mouvement. De façon générale, le mouvement des objets est décrit par rapport au sol, considéré comme un repère fixe.

Tous les repères dont nous avons parlé sont visuels, c'est-à-dire qu'ils sont des lieux par rapport auxquels nous voyons d'autres objets se déplacer. Mais nous pouvons aussi percevoir des mouvements en nous servant des autres sens; les repères sont alors de nature différente.

UNE QUESTION DE SENS

Il y a plusieurs façons de détecter un mouvement : nous pouvons voir un oiseau voler, entendre le bruit d'une voiture qui s'éloigne ou se rapproche, sentir un chat nous effleurer la jambe ou encore déceler les odeurs de la cuisine qui se propagent dans toute la maison. Bien que la plupart des perceptions de mouvements soient attribuables à nos yeux, les autres sens — l'ouïe, l'odorat et le toucher — peuvent aussi nous informer sur le mouvement des corps. En effet, tous nos sens agissent comme des sondes branchées sur l'extérieur, qui nous renseignent sur ce qui se passe dans notre environnement. Ils collectent continuellement des informations que notre cerveau interprète. Ce qui est fort utile dans des situations dangereuses...



Exercice 1.11

Pour chacune des situations suivantes, identifiez lequel des sens est le plus susceptible de vous renseigner sur le mouvement qui y est décrit. Justifiez votre réponse.

a) De l'intérieur de la maison, vous savez qu'une ambulance s'approche.

b) Votre voisin fait cuire une grillade sur des charbons de bois et vous en déduisez que le vent vient de l'est.

c) Vous sentez l'air projeté par un ventilateur d'intérieur placé près de vous.

d) Un cycliste se balade devant vous.

Dans l'exercice ci-dessus, vos oreilles vous indiquent que l'ambulance s'approche parce que le son de la sirène est de plus en plus fort. Votre nez vous renseigne sur la direction du vent, qui se résume à un déplacement d'air; l'odeur de la grillade provient de composés chimiques volatils libérés par la cuisson et entraînés par le vent jusqu'à votre nez. Par ailleurs, la peau et les poils détectent le mouvement d'air engendré par le ventilateur. Finalement, vos yeux voient le cycliste en balade. Il est donc possible de détecter la présence de mouvement avec les yeux, mais aussi avec les sens de l'ouïe, de l'odorat ou du toucher.

Dans les pages qui suivent, nous porterons notre attention sur la perception auditive du mouvement. Avez-vous déjà remarqué qu'une voiture de course ne fait pas le même bruit lorsqu'elle s'approche et s'éloigne du lieu d'où nous l'observons? Pour comprendre ce phénomène, voyons un peu ce qu'est un son et ce qui le caractérise.

Les sons résultent de mouvements de l'air qui transmettent ainsi des ondes auxquelles nos oreilles sont sensibles. Elles les reçoivent et les convertissent en signaux que notre cerveau reconnaît et interprète. C'est ainsi que nous distinguons les divers sons, les voix, la musique ou simplement les bruits qui nous entourent.



Exercice 1.12

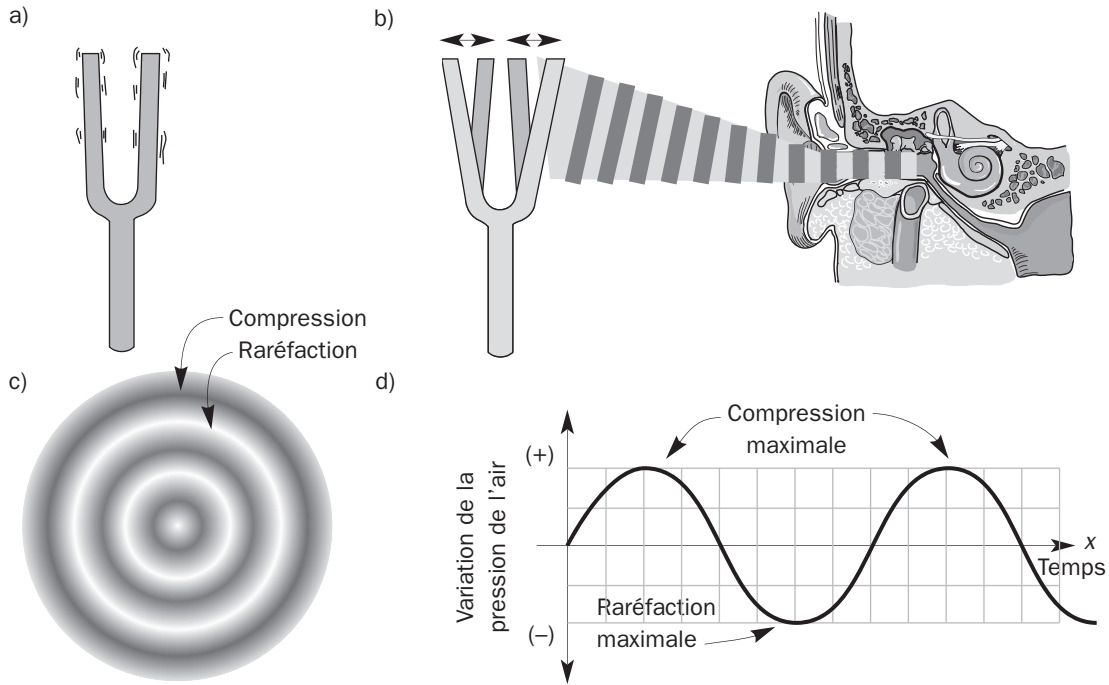
Un astronaute marchant sur la Lune lance une pierre. En touchant le sol, la pierre créera-t-elle un son? Justifiez votre réponse.

Effet Doppler

Nous pouvons produire des sons avec n'importe quel objet capable de vibrer, un diapason⁸ ou une corde de guitare par exemple. Un diapason sert à accorder les instruments de musique tels que le piano et la guitare. Pour le faire vibrer, nous frappons l'une de ses branches avec un marteau à tête feutrée. Chaque branche se déplace alors dans un mouvement de va-et-vient très rapide, ce qui a pour effet de déplacer l'air autour des branches. La vibration crée alternativement des zones de *compression*, où l'air est plus dense, et des zones de *raréfaction*, où l'air est moins dense (figure 1.13).

8. Un diapason est un petit instrument d'acier en forme de fourche qui donne une note précise quand on le fait vibrer.

Figure 1.13 – L'origine de l'onde sonore



a) Nous frappons une branche du diapason et celui-ci se met à vibrer.

b) La vibration du diapason crée en alternance des zones de compression et des zones de raréfaction qui forment l'onde sonore.

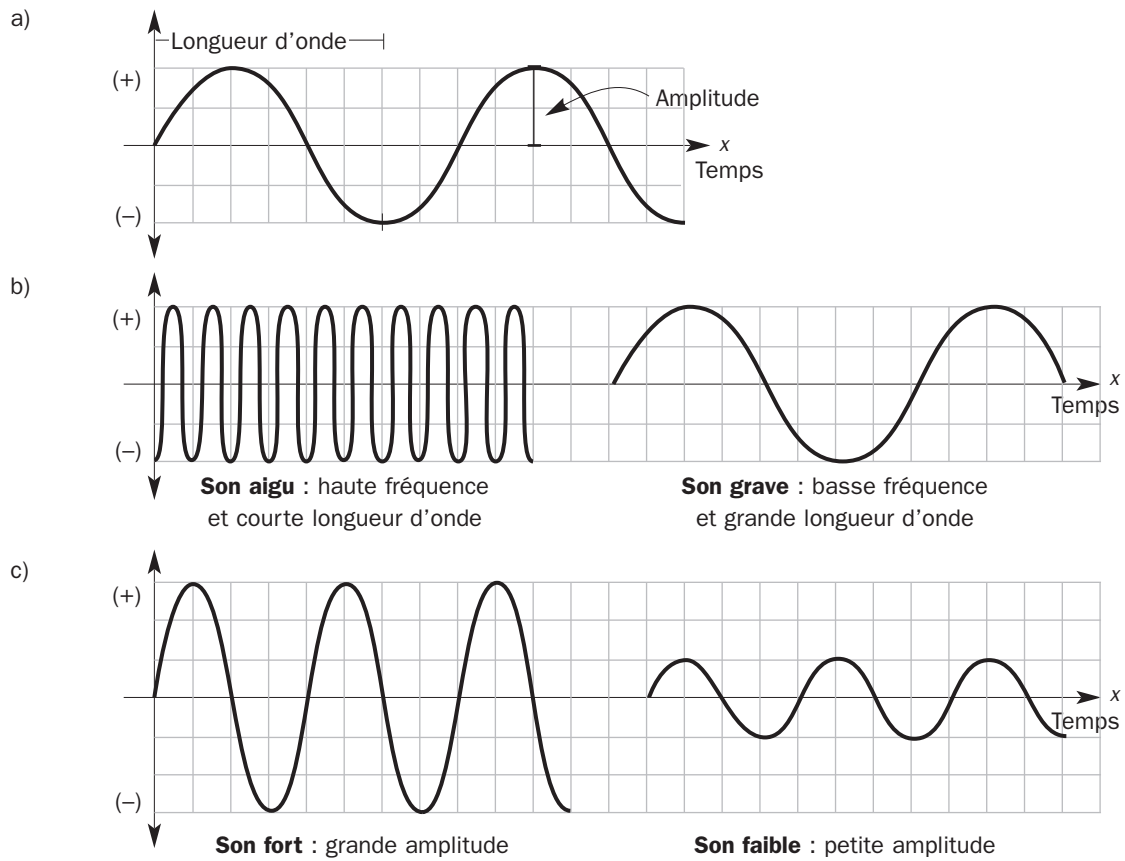
c) L'onde forme des cercles concentriques autour de la source (diapason), car elle se propage également dans toutes les directions.

d) Ce graphique montre ce qui arrive à la pression de l'air lors du passage de l'onde, d'où l'expression « onde sonore ».

Notez que sur la figure 1.13b, nous avons exagéré l'espace entre les zones de compression et de raréfaction. Pour les sons ordinaires, les particules d'air se déplacent de moins d'un millionième de millimètre. L'onde sonore est caractérisée par sa *longueur d'onde*, son *amplitude* et sa *fréquence* (figure 1.14). La distance qui sépare deux crêtes ou deux creux s'appelle *longueur d'onde*. Le maximum de la courbe correspond à l'*amplitude* de l'onde. La fréquence fait référence au nombre de longueurs d'onde par seconde, c'est-à-dire au nombre de cycles par seconde. Par exemple, si l'onde effectue huit longueurs d'onde en une seconde, la fréquence est de 8 Hz (hertz)¹⁰. La fréquence est élevée quand la longueur d'onde est courte.

10. L'unité de mesure est en honneur au physicien allemand Heinrich Hertz (1857-1894).

Figure 1.14 – Caractéristiques des ondes sonores



a) Amplitude et longueur d'onde.

b) Un son aigu a une fréquence élevée alors qu'un son grave a une fréquence basse.

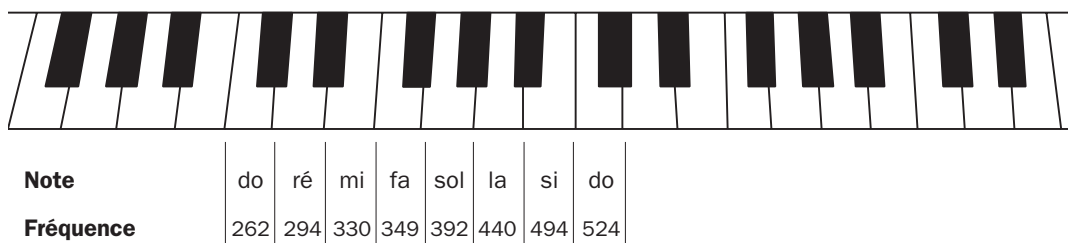
c) Un son est d'autant plus fort que l'amplitude de l'onde est grande.

L'amplitude établit si un son est fort (grande amplitude) ou faible (petite amplitude), alors que la fréquence détermine si le son est grave (basse fréquence) ou aigu (haute fréquence).



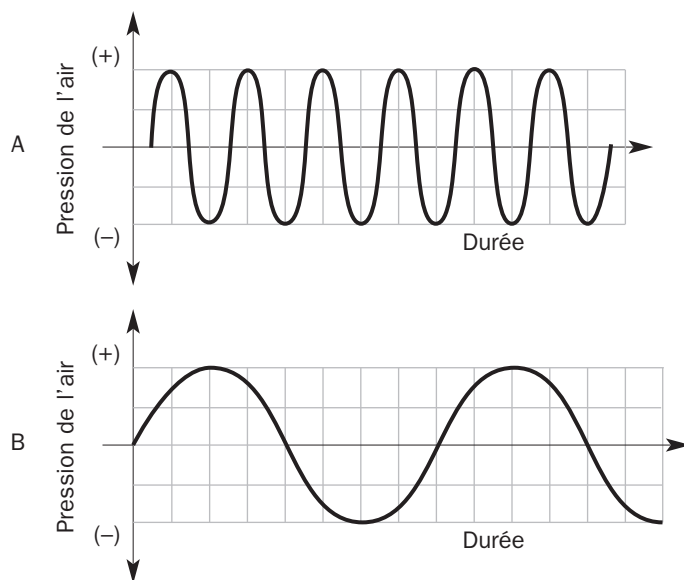
Exercice 1.13

a)



Cette figure représente la gamme normale d'un piano. Ces notes sont jouées par les touches blanches. Laquelle donne le son le plus aigu? le plus grave? Justifiez votre réponse.

b)



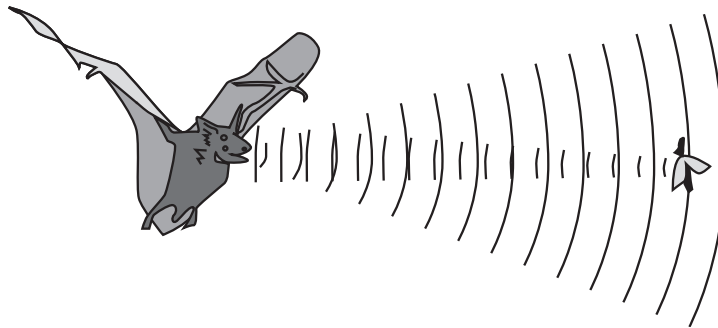
La figure représente des ondes sonores. Laquelle donne le son le plus aigu? Justifiez votre réponse.



Infrasons et ultrasons

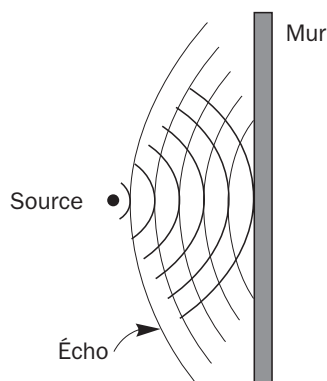
L'oreille humaine est sensible aux ondes sonores dont la fréquence varie entre 20 et 20 000 Hz. Les fréquences inférieures à 20 Hz sont appelées infrasons et celles supérieures à 20 000 Hz, ultrasons. Les infrasons et les ultrasons sont des ondes de même nature que les ondes sonores, sauf qu'elles sont inaudibles chez l'être humain. Les explosions nucléaires souterraines, les marées et les tremblements de terre produisent des infrasons; nous pouvons les détecter à l'aide d'un sismographe.

Plusieurs animaux produisent des ultrasons et les perçoivent. Par exemple, l'oreille humaine n'entend qu'une partie des couinements d'une souris; celle des chats entend les couinements ultrasoniques. Les chauves-souris émettent des ultrasons; elles détectent la présence d'obstacles et de proies en écoutant les échos des ondes émises et peuvent ainsi chasser la nuit.



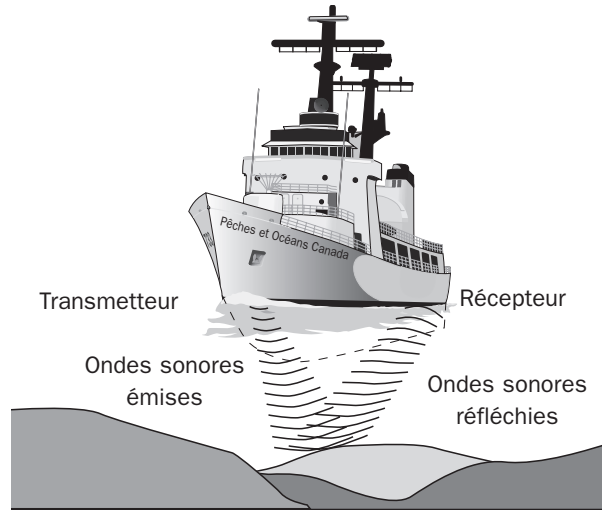
Écho et tonnerre

Il y a écho lorsque les ondes sonores sont réfléchies par des murs ou des montagnes. Toutefois, il n'y a pas d'écho possible si l'onde réfléchie parvient à l'oreille moins de 1/10 de seconde après le son original. L'oreille ne pouvant distinguer les deux sons (l'original et l'écho), nous parlons alors de réverbération. Le son se propageant à la vitesse d'environ 330 m/s, la surface réfléchissante doit être située à 16,5 mètres (à mi-chemin) ou plus d'un observateur pour qu'il entende un écho.



Sonar

Le sonar¹¹ est un appareil utilisé sur des bateaux, pour déterminer certaines distances. Il fonctionne comme un radar, à la différence que le sonar utilise des ondes sonores plutôt que des signaux radios. Un transmetteur placé sous le bateau émet des ondes sonores qui se propagent dans l'eau et rebondissent sur des corps en suspension ou sur le fond. Les ondes sont captées à leur retour par un récepteur également placé sous le bateau. En mesurant le temps écoulé entre l'émission des ondes et leur réception, le sonar donne les distances séparant le bateau des corps d'où les ondes sont réfléchies.



Maintenant que nous connaissons un peu mieux la nature du son et la façon dont il se propage, revenons à la perception du mouvement par le son. Deux aspects différents sont à considérer. Le premier concerne l'amplitude du son. Par exemple, nous savons qu'une voiture s'éloigne lorsque le bruit qu'elle fait devient de plus en plus faible à nos oreilles. À l'inverse, l'amplitude du son augmente si l'automobile s'approche.

Le deuxième aspect fait intervenir la fréquence du son. Par exemple, supposons que vous attendez au coin d'une rue, et qu'une voiture de pompiers s'approche et passe devant vous avant de s'éloigner peu à peu. Vous avez peut-être déjà observé que le bruit de la sirène n'est pas le même avant et après le passage du véhicule. En réalité, la fréquence entendue est plus haute lorsque la voiture de pompiers s'approche que lorsqu'elle s'éloigne. Comment cela se fait-il? La sirène n'a pourtant pas changé... Voyons voir.

La figure 1.15 a) montre une voiture de pompiers au repos, c'est-à-dire immobile, sirènes en marche. Observez comment se répartissent les ondes sonores autour du véhicule.

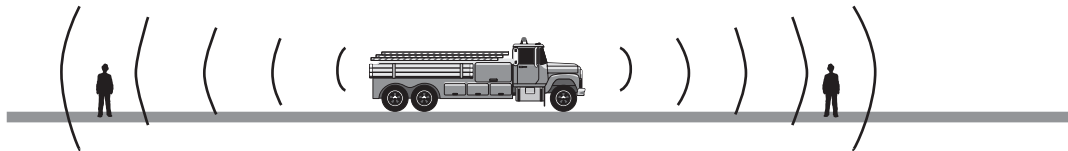
11. SONAR vient de l'anglais : **S**ound **N**avigation **A**nd **R**anging.

La sirène émet toujours des sons de même fréquence. Cependant, lorsqu'elle est en mouvement (figure 1.15 b), le front d'ondes produit vers l'avant devient plus compact. Nous pourrions dire que la voiture de pompiers pourchasse les ondes sonores émises auparavant. Ainsi, un observateur immobile percevra plus d'ondes par seconde lorsque le véhicule s'approche de lui; il entendra donc un son avec une fréquence plus élevée que la fréquence du son émis par la sirène immobile, c'est-à-dire un son plus aigu (figure 1.15 b).

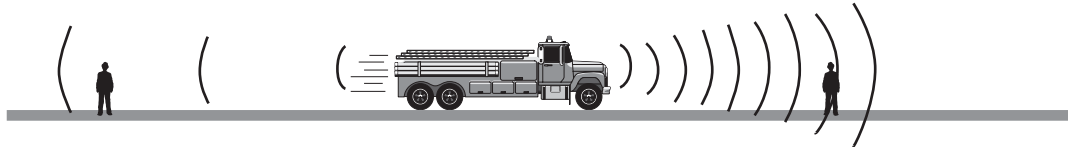
À l'inverse, lorsque la voiture de pompiers s'éloigne de l'observateur, les ondes sonores sont plus espacées à l'arrière du véhicule que lorsqu'il est au repos, comme si le véhicule fuyait les ondes sonores. L'observateur à l'arrière du véhicule perçoit alors un son de plus basse fréquence, c'est-à-dire un son plus grave que celui produit par la sirène immobile (figure 1.15c). Ce phénomène est appelé effet Döppler, du nom de son découvreur, Christian Döppler¹².

Figure 1.15 – Son et effet Döppler

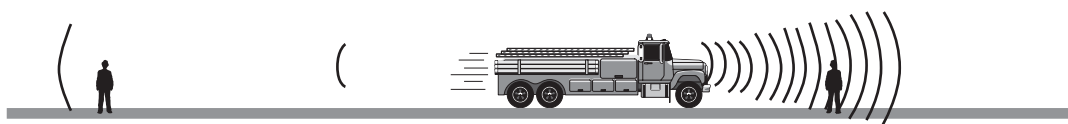
a) Voiture de pompiers au repos



b) Voiture de pompiers en mouvement



c) Voiture de pompiers en mouvement plus rapide



a) Les deux observateurs entendent le son à la fréquence émise par la sirène.

b) L'observateur vers lequel se dirige la voiture de pompiers entend un son plus aigu que lorsque le véhicule était au repos. À l'inverse, l'observateur à gauche entend un son plus grave que celui produit par la sirène.

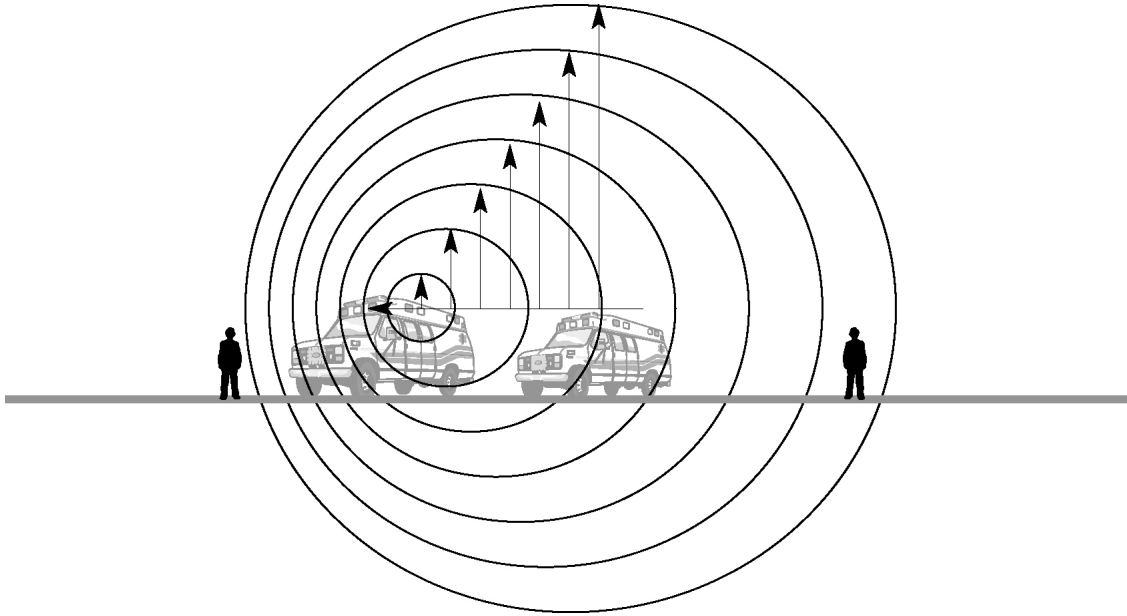
c) Si la voiture de pompiers se déplace plus rapidement, l'observateur de droite percevra un son plus aigu encore. L'observateur de gauche entendra un son plus grave qu'en b).

12. Pour visualiser l'effet Döppler, consultez les sites suivants sur Internet : www.cmontmorency.qc.ca; www.scio.free.fr/ondes/doppler; www.colorado.edu.



Exercice 1.14

1. La figure suivante montre les ondes émises par la sirène d'une ambulance.



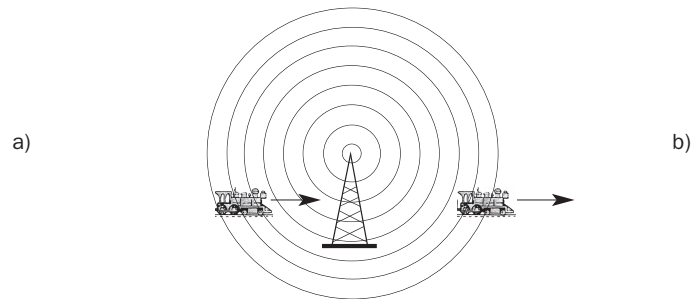
a) De quel côté l'ambulance se dirige-t-elle? Justifiez votre réponse.

b) Quel observateur entendra un son plus aigu que celui de la sirène? Dites pourquoi.

c) L'autre observateur entendra un son plus grave que celui émis par la sirène. Dites pourquoi.

L'effet Doppler s'applique également à l'inverse de ce que nous venons de voir, soit dans le cas où la source sonore est stationnaire et l'observateur, en mouvement. La fréquence perçue par l'observateur est alors plus grande ou plus petite selon qu'il s'approche ou s'éloigne de la source. Prenons, à titre d'exemple, un train qui s'approche, puis s'éloigne d'une sirène stationnaire.

Figure 1.16 – Effet Doppler dans le cas d'une source de bruit stationnaire



a) Le train approche de la sirène. Donc, il va à la rencontre des ondes émises et entre en contact avec plus d'ondes sonores par seconde que lorsqu'il est au repos; la fréquence reçue est plus élevée que celle émise par la sirène et le son devient de plus en plus aigu.

b) Le train s'éloigne de la sirène. Donc, il fuit les ondes émises et entre en contact avec moins d'ondes sonores par seconde que lorsqu'il est au repos; la fréquence est plus basse et le son, plus grave.

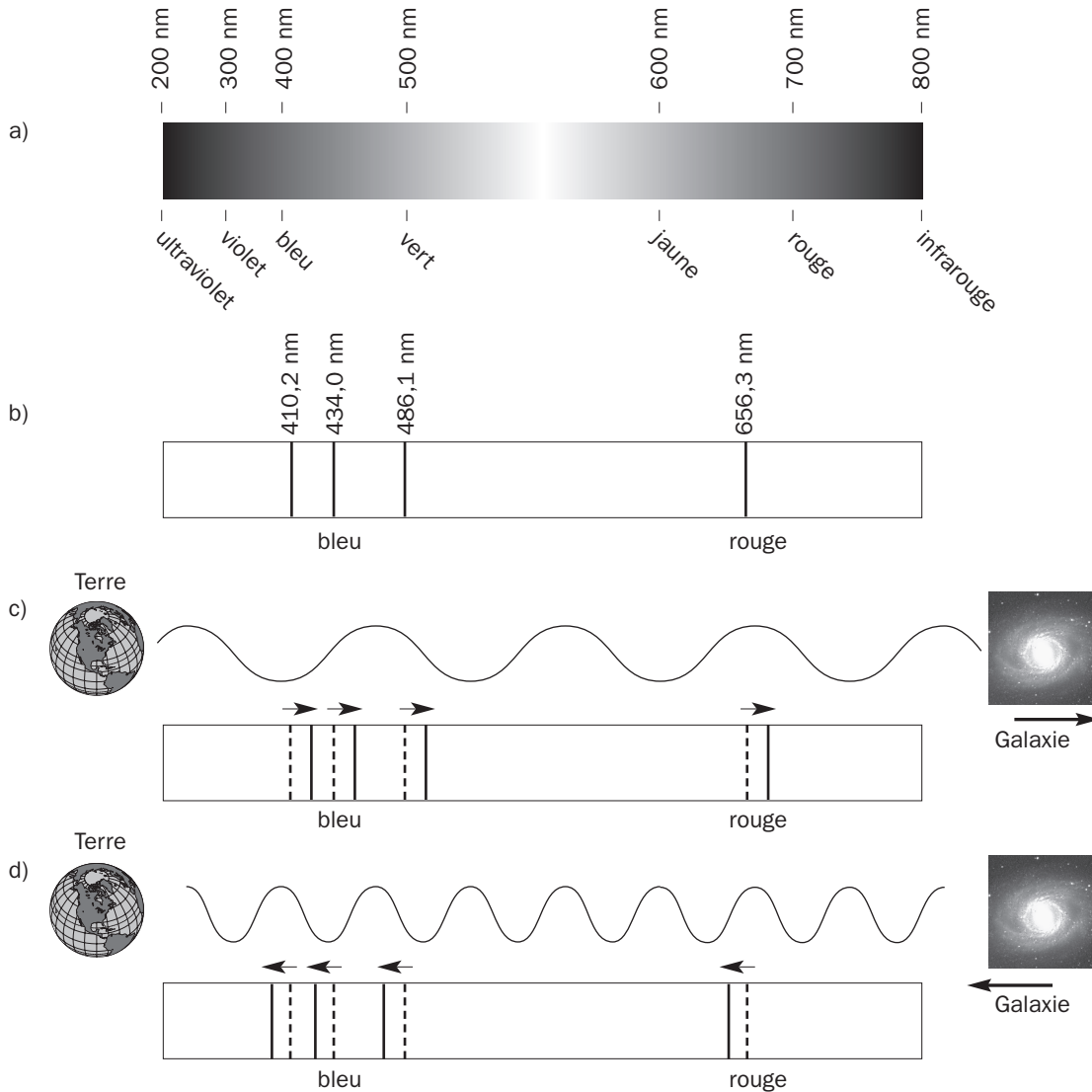
L'effet sur le son découvert par Döppler fut étendu à la lumière par le physicien français Hippolyte Fizeau, en 1848. Il suggéra que ce qui est vrai pour le son l'est aussi pour la lumière. Ainsi, la lumière émise par une étoile ou une galaxie qui s'éloigne de nous est perçue à une fréquence plus basse que celle de la lumière émise par le Soleil; et à l'inverse, une galaxie ou une étoile donne une lumière de fréquence légèrement plus élevée quand elle s'approche de nous. Or, dans le spectre de la lumière visible, le rouge correspond aux basses fréquences (plus grandes longueurs d'onde), tandis que le bleu et le violet sont les plus hautes fréquences (plus courtes longueurs d'onde)(figure 1.17a). Nous observerons donc un *décalage vers le rouge* de la lumière lorsqu'une étoile s'éloigne, et un *décalage vers le bleu* pour un astre qui s'approche.

Mais comment savons-nous à quelle fréquence la lumière d'une étoile est émise au départ? Et qu'est-ce qui nous dit qu'elle est « décalée »? Questions bien légitimes. Les gaz contenus dans les étoiles nous fournissent la réponse. Considérons le cas de l'hydrogène.

Les scientifiques analysent la lumière des étoiles à l'aide d'un appareil appelé *spectrographe*, qui sépare les longueurs d'onde (ou les fréquences) reçues. Les galaxies sont peuplées de milliards d'étoiles et l'hydrogène est leur combustible principal. Or, chaque gaz, lorsqu'il est excité, est caractérisé par des marques distinctives dans la lumière visible, c'est-à-dire qu'il réagit à quelques longueurs d'onde spécifiques qui forment ensemble son spectre, la signature qui permet de l'identifier. Ainsi, le spectre de l'hydrogène comprend quatre longueurs d'onde dans la lumière visible, appelées raies spectrales, dont les valeurs sont : 410,2 nm, 434,0 nm, 486,1 nm et 656,3 nm¹³ (figure 1.17b).

13. 1 nm = 1 nanomètre = 1×10^{-9} m. Ce sont les longueurs d'onde très courtes.

Figure 1.17 – Effet Doppler appliqué à la lumière



a) Le spectre de la lumière visible comprend toutes les longueurs d'onde comprises entre 400 nm (le violet) et 700 nm (le rouge).

b) Lorsque l'hydrogène est excité, il émet quatre longueurs d'onde spécifiques dans la région de la lumière visible.

Ces quatre raies spectrales forment ensemble le spectre visible de l'hydrogène, et sont un peu comme les empreintes digitales de l'hydrogène.

c) Lorsqu'une galaxie s'éloigne de la Terre, les raies sont décalées vers le rouge (vers la droite sur le dessin). La longueur d'onde de chaque raie augmente, c'est-à-dire que sa fréquence diminue. L'importance du décalage vers le rouge permet de déterminer avec précision la vitesse d'éloignement d'une étoile ou d'une galaxie.

d) Lorsqu'une étoile ou une galaxie s'approche de la Terre, les raies sont décalées vers le bleu (vers la gauche sur le dessin). Leur longueur d'onde diminue, c'est-à-dire que leur fréquence augmente.

Lorsqu'un spectrographe enregistre le spectre d'une étoile, nous y retrouvons la signature de l'hydrogène, c'est-à-dire que les quatre raies spectrales de ce gaz sont toujours présentes. En 1920, Edwin Hubble (1889-1953), étudiant les étoiles de galaxies éloignées, découvrit que les raies du spectre de l'hydrogène avaient des longueurs d'onde légèrement plus longues que celles émises par l'hydrogène quand nous l'observons en laboratoire. Il nota : 411,54 nm, 435,50 nm, 487,75 nm et 658,47 nm. Chaque raie était décalée de 0,0033 % par rapport à la valeur connue. Hubble en déduisit que ce décalage vers le rouge était dû à l'effet Doppler. Ainsi, lorsqu'une galaxie s'éloigne de nous, nous percevons une fréquence plus basse (une longueur d'onde plus longue) que celle émise par la source. Tout comme cela se passe pour le son lorsque vous êtes placé derrière une ambulance en mouvement.

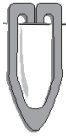
Les calculs de Hubble démontrèrent que certaines galaxies observées s'éloignaient de la Terre à la vitesse de 1 000 000 m/s! Il prouvait ainsi que l'Univers était en pleine expansion. D'ailleurs, les galaxies lointaines s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont éloignées de nous. Certaines galaxies situées à dix milliards d'années-lumière filent à 90 % de la vitesse de la lumière, soit 270 000 km/s.



Exercice 1.15

La plupart des galaxies s'éloignent de la nôtre. Ce n'est pas le cas de la galaxie d'Andromède située à 2,2 années-lumière de la Voie lactée qui se dirige vers nous à la vitesse de 50 km/s. Le décalage des longueurs d'onde de la lumière sera-t-il vers le bleu ou vers le rouge? Justifiez votre réponse.

Voilà pour l'effet Doppler. Appliqué à la lumière, il permet de déterminer à quelle vitesse les étoiles et les galaxies s'approchent ou s'éloignent de nous. Grâce à ce phénomène, les astrophysiciens ont pu en apprendre davantage sur le mouvement des astres et en déduire que notre Univers est en pleine expansion. En effet, la très grande majorité des galaxies s'éloignent de nous et donnent ainsi une lumière décalée vers le rouge.



Le mouvement, un sujet apparemment simple à première vue, a suscité beaucoup de discussions dans ce chapitre; la notion de trajectoire et la diversité des possibilités; les théories d'Aristote sur le mouvement et les trajectoires des planètes; la démolition de ces théories par Galilée et l'explication de la chute des corps et du mouvement des planètes par Newton; le large éventail couvert par la mécanique, consacrée à l'étude du mouvement et subdivisée en plusieurs branches; l'importance du repère et du point de vue de l'observateur dans la description d'une trajectoire; le rôle de nos sens, particulièrement la vue et l'ouïe, dans la perception d'un mouvement. La notion de trajectoire a servi de trame au contenu très varié de ce chapitre. Le prochain est consacré à la distance parcourue par un objet le long de la trajectoire qu'il suit et au déplacement qui en résulte entre les points de départ et d'arrivée.



MOTS CLÉS DU CHAPITRE

Amplitude

Cinématique

Dynamique

Effet Döppler

Fréquence

Longueur d'onde

Mécanique classique

Mécanique quantique

Mouvement rectiligne

Mécanique des fluides

Mécanique relativiste

Mouvement rétrograde

Onde sonore

Repère

Thermodynamique

Trajectoire curviligne

Trajectoire parabolique

Trajectoire circulaire

Trajectoire elliptique

Trajectoire rectiligne



RÉSUMÉ

L'histoire du mouvement tire son origine d'Aristote. Ses théories sur le mouvement ont perduré deux millénaires avant que Galilée et Newton en démontrent leur invalidité.

Pour Aristote, les objets en mouvement occupent une position naturelle, le repos. Pour Galilée et Newton, un corps conserve son état de mouvement ou de repos aussi longtemps qu'une force n'est pas exercée sur lui.

L'ajout de l'idée de force est primordiale. En effet, elle permet d'expliquer pourquoi un objet en mouvement peut éventuellement tomber au repos, dû à des forces de frottement, par exemple. L'idée de force permet d'expliquer ce phénomène alors que l'idée de l'acquisition d'une position naturelle n'explique rien.

Si le modèle de l'Univers d'Aristote et de Ptolémée est géocentrique, celui de Galilée et de Newton est héliocentrique. L'invention du télescope par Galilée a permis de démontrer, hors de tout doute, que notre système planétaire est incontestablement héliocentrique.

Si Aristote prétend qu'un corps lourd arrive au sol avant un corps léger quand nous les laissons chuter en même temps, Galilée démontre le contraire par une expérimentation.

Un objet est en mouvement quand il change de position par rapport à un point de repère fixe. Le choix d'un **repère** est arbitraire. Peu importe l'endroit dans l'Univers, il n'existe pas de repère absolu, c'est-à-dire un repère auquel nous pourrions nous référer pour décrire tous les mouvements. Par conséquent, le mouvement absolu n'existe pas non plus.

Pour décrire le mouvement, nous faisons appel à l'une de ses caractéristiques : la trajectoire. L'ensemble des points successifs (imaginaires) occupés par le corps en mouvement constitue sa trajectoire. Il y a des **trajectoires rectilignes, curvilignes (elliptiques, circulaires, paraboliques)** et quelconques. La trajectoire décrite dépend toujours du point de vue de l'observateur. Nous devons être vigilants lorsque nous décrivons une trajectoire.

Si la vue est primordiale pour décrire la trajectoire d'un objet en mouvement, l'ouïe l'est également pour déterminer si une source sonore se dirige ou s'éloigne de soi. Les recherches de Christian Doppler ont démontré que, lorsqu'une source sonore se dirige vers soi, le son devient de plus en plus aigu à cause de la **fréquence** élevée des ondes sonores. Lorsque la source s'éloigne, la fréquence des ondes sonores diminue et le son devient grave.

Les ondes sonores sont produites par l'alternance de zones de compression et de raréfaction de l'air autour de la source sonore. Elles se dispersent dans un espace à trois dimensions sphérique. La variation de la pression d'air autour d'une source sonore est décrite par une sinusoïde. La sinusoïde ne représente pas l'onde sonore dans l'air, elle est uniquement la représentation graphique de la variation de la pression de l'air en fonction du temps. C'est la vibration de la source sonore qui explique ce phénomène.

Dans le prochain chapitre, il sera question du déplacement, c'est-à-dire du changement de position d'un corps par rapport à un point de repère fixe. Vous verrez que le déplacement possède deux caractéristiques : une grandeur et une orientation (une direction et un sens).



EXERCICES DE SYNTHÈSE



Exercice 1.16

Les premières théories connues sur le mouvement nous viennent d'Aristote dont les écrits nous sont parvenus. Environ 2 000 ans plus tard, ces théories furent taillées en pièces par Galilée et Newton.

a) Qu'est-ce qui distingue la théorie générale des objets en mouvement de Newton de celle d'Aristote?

b) Qu'est-ce qui distingue la théorie du mouvement des corps en chute libre d'Aristote de celle de Galilée?

c) Quelle est la distinction majeure entre le modèle d'Univers d'Aristote et celui de Galilée?

? Exercice 1.17

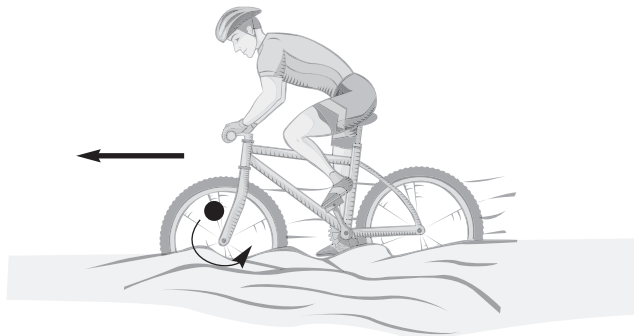
Un train de passagers se déplace selon une trajectoire rectiligne. Dessinez la trajectoire du mouvement d'un des passagers assis que vous voyez à travers la fenêtre si :

Note : Fermez les yeux et imaginez le passager représenté par un point.

- a) vous êtes immobile;
- b) vous vous déplacez à la même vitesse et dans le même sens que le train.

? Exercice 1.18

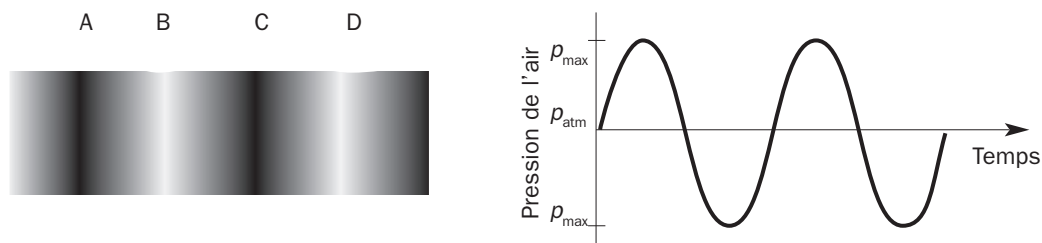
Vous observez un catadioptré (objet plastifié souvent de couleur rouge qui réfléchit la lumière) fixé sur un rayon d'une roue de bicyclette qui se déplace de droite à gauche à une vitesse constante. Tracez la trajectoire de cet objet réfléchissant tel que vous l'observez lorsque vous êtes :



- a) immobile et à côté de la bicyclette;
- b) sur une autre bicyclette et que vous roulez parallèlement à cet objet et à la même vitesse que lui.

? Exercice 1.19

La figure suivante montre des ondes sonores et le graphique de la sinusoïde correspondante.



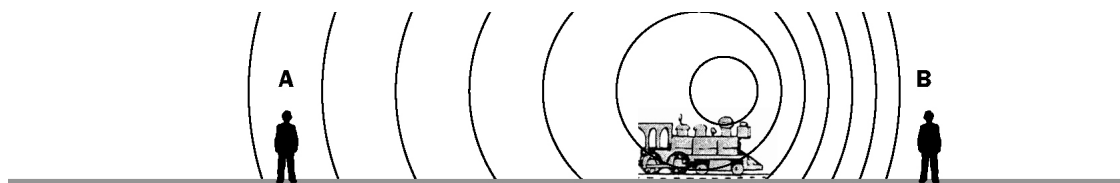
a) Identifiez par la lettre appropriée la zone de compression et celle de raréfaction.

b) Le graphique représente-t-il une onde sonore? Justifiez votre réponse.

c) Comment se propage le son dans l'air?

? Exercice 1.20

La figure suivante représente une locomotive, klaxon en marche.

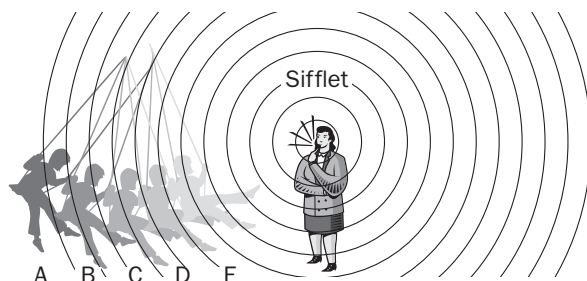


a) Lequel des observateurs entendra un son aigu? Justifiez votre réponse.

b) Lequel des observateurs entendra une fréquence de son élevée?

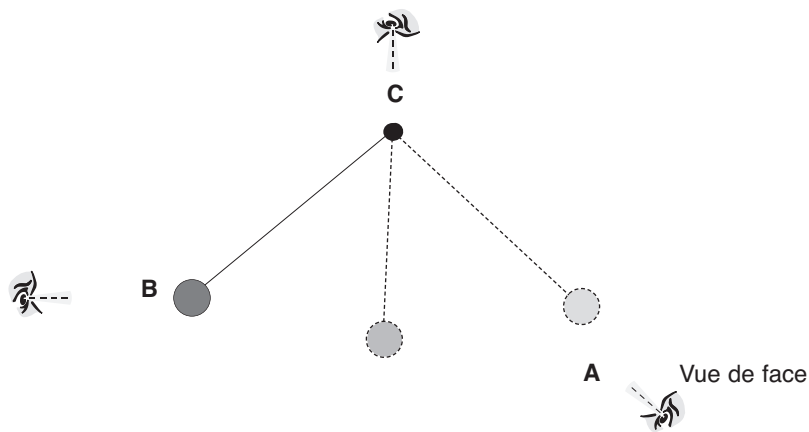
? Exercice 1.21

Examinez la figure suivante. À quel endroit l'enfant entendra-t-il un son aigu? Pourquoi?



? Exercice 1.22

La figure suivante montre un pendule en marche observé en trois positions différentes A, B et C. Tracez la trajectoire perçue à chacune de ces positions.



A :

B :

C :



Exercice 1.23

1. Imaginez-vous être en haut d'un édifice de dix étages, la tête sortie par la fenêtre, et que vous laissez tomber une balle noire. Un témoin intrigué... s'arrête pour vous observer.

a) Décrivez la trajectoire vue par le témoin.

b) Qu'observez-vous, la tête sortie par la fenêtre?

c) Ce que vous avez observé en b) correspond-il à une trajectoire? Justifiez votre réponse.
