



Alain Colin De Verdière, Souren Pogossian

.....

La collection « Enseignement Sup Physique » se présente comme une introduction sur des sujets incontournables en physique. Adaptée aux besoins des étudiants et des chercheurs, le traitement rigoureux, mais accessible, de chaque sujet est idéal pour ceux qui veulent une amorce dans un sujet donné pour les préparer à une étude ou à une recherche plus avancée.

Ce premier tome est une introduction aux lois de la mécanique omniprésentes pour comprendre les mouvements – planètes – fusée – avion – auto – bateau – vélo – sport et les équilibres (architecture). Les lois de conservation sont les concepts fondamentaux.

Les thèmes étudiés sont : Calculus, Cinématique, Lois de Newton, Travail et énergie, Statique et élasticité, Dynamique d'un ensemble de particules, Gravitation, Satellites et planètes.

La progression naturelle des idées, l'usage de mathématiques élémentaires, des exemples tirés de situations réelles et un style clair permettent une bonne compréhension du sujet. Ce livre autonome ne demande aucun prérequis mathématique ou physique. Des questions de réflexion et plus de 250 exercices sont indus, la solution desquels est détaillée pour les trois quarts d'entre eux. Une annexe numérique et informatique en ligne permet l'apprentissage de la programmation pour trouver les solutions de problèmes complexes (langages Octave ou Matlab).

Ce tome 1 est destiné aux étudiants en première année de licence, IUT ou classes préparatoires.

Alain Colin de Verdière a obtenu un doctorat du Massachusetts Institute of Technology (MIT) et de Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI). Ses recherches portent sur la circulation océanique mondiale et les modèles simplifiés océan-atmosphère pour le climat.

Souren Pogossian a obtenu un doctorat de l'université de Brest en réalisant la majeure partie de sa thèse au CNRS de Meudon. Ses recherches concernent la propagation guidée des ondes lumineuses et neutroniques, l'optoélectronique du silicium-germanium, le couplage d'échange en magnétisme et aujourd'hui l'astrodynamique.



En orbite à 400 km au-dessus de la Terre, la Station spatiale internationale illustre les progrès technologiques étonnants permis par la découverte des lois de la mécanique par Newton, il y a quelque trois siècles et demi.

ISBN : 978-2-7598-2665-0



9 782759 826650

Mécanique classique

Cours et exercices corrigés

Tome 1

Lois de Newton, énergie, statique, gravitation

Mécanique classique

Cours et exercices corrigés

Tome 1

Lois de Newton, énergie, statique, gravitation

A. Colin de Verdière et S. Pogossian

Photographie de couverture : Station spatiale internationale ISS.
Crédit : ESA/NASA - Thomas Pesquet
Conception graphique de la couverture : CB Defretin, Lisieux

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2665-0 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2666-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2022

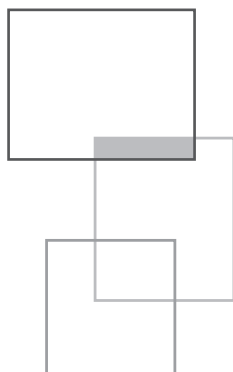


Table des matières

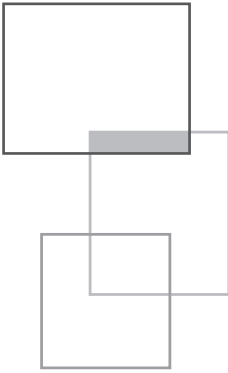
Avant-propos	1
Pourquoi ce livre ?	1
Un brin d'histoire	2
Quel contenu ?	3
Pour qui ?	4
Comment apprendre ?	4
Qui sommes-nous ?	5
Remerciements	5
Chapitre 1 • Introduction	7
1.1 Contexte	7
1.2 Mesures et unités en physique	12
1.2.1 Unités	12
1.2.2 Mesures	14
1.2.3 Ordre de grandeur	16
1.2.4 Conversion d'unités	16
1.3 Vecteurs	17
1.3.1 L'addition des vecteurs	17
1.3.2 Les composantes d'un vecteur	21
1.3.3 Le produit scalaire	24
1.3.4 Le produit vectoriel	25
1.4 Dérivées	27
1.4.1 Définition	27
1.4.2 Tableau des dérivées	28

1.5	Intégrales	29
1.5.1	Définition	29
1.5.2	Les théorèmes du calcul différentiel	31
1.6	Applications	33
1.6.1	La méthode DPCE ou Démarrage, Plan, Calculs, Évaluation	34
1.6.2	Questions de réflexion et concepts	35
1.6.3	Exercices	36
Chapitre 2 • Cinématique : déplacement, vitesse, accélération		45
2.1	Introduction	45
2.2	Déplacement, vitesse et accélération	48
2.2.1	Représentation cartésienne	48
2.2.2	Chute libre et mouvement d'un projectile	52
2.2.3	Représentation intrinsèque, mouvement circulaire	54
2.2.4	Coordonnées polaires	61
2.3	Mouvement relatif	63
2.4	Applications	66
2.4.1	Exemples	66
2.4.2	Questions de réflexion et concepts	69
2.4.3	Exercices	71
Chapitre 3 • Les lois de la dynamique de Newton		83
3.1	La première loi ou le principe d'inertie	84
3.2	La deuxième loi	86
3.3	La troisième loi	90
3.4	Les conditions initiales	92
3.5	Applications	92
3.5.1	Les forces solide-solide	93
3.5.2	Exemples	96
3.5.3	Questions de réflexion et concepts	109
3.5.4	Exercices	110
Chapitre 4 • Énergie et travail		119
4.1	Le théorème de l'énergie cinétique	120
4.1.1	Force constante	120
4.1.2	Force variable en position	121
4.1.3	En plusieurs dimensions	122
4.2	Conservation de l'énergie mécanique	124
4.2.1	Le travail du poids et l'énergie potentielle	124
4.2.2	Les forces conservatives	126

4.3	Applications	127
4.3.1	Le pendule	127
4.3.2	Le ressort	131
4.3.3	Généralisation	132
4.3.4	L'énergie interne et le travail des forces de frottement	134
4.3.5	Le travail fait sur un système	135
4.3.6	La conservation de l'énergie	136
4.3.7	Questions de réflexion et concepts	137
4.3.8	Exercices	138
Chapitre 5 • Équilibre statique		149
5.1	Introduction	149
5.2	Le moment d'une force	151
5.2.1	Définition et propriétés	151
5.2.2	Les composantes du produit vectoriel	153
5.3	Analyse de situations	154
5.3.1	Le cas de plusieurs forces concourantes	154
5.3.2	Couple de forces	154
5.3.3	Composition de forces parallèles	155
5.3.4	Le cas de la gravité, le centre de masse	156
5.4	Les conditions d'équilibre statique	157
5.5	Élasticité	158
5.5.1	Tension-compression	159
5.5.2	Compression uniforme	161
5.5.3	Cisaillement	163
5.5.4	Valeur des coefficients	164
5.6	Applications	166
5.6.1	Méthode générale	166
5.6.2	Exemples	166
5.6.3	Questions de réflexion et concepts	171
5.6.4	Exercices	172
Chapitre 6 • Dynamique d'un ensemble de particules		185
6.1	Le mouvement du centre de masse	186
6.2	Le mouvement à deux corps	188
6.3	Conservation de la quantité de mouvement	190
6.3.1	Collisions	190
6.3.2	Propulsion à réaction	194
6.4	Le moment cinétique (ou angulaire)	196
6.4.1	Le moment cinétique d'une particule	196
6.4.2	Le moment cinétique d'un ensemble de particules	197
6.5	L'énergie d'un ensemble de particules	199
6.6	Réversibilité des équations de la mécanique classique	202

6.7	Rotation de corps rigides autour d'un axe fixe	203
6.7.1	Moment cinétique	203
6.7.2	Travail et énergie	205
6.7.3	Moment d'inertie	206
6.7.4	Analogies translation-rotation	208
6.8	Applications	208
6.8.1	Sismographe, accéléromètre et résonance	208
6.8.2	Boule sur un plan incliné	213
6.8.3	Équilibrage des roues de voiture	214
6.8.4	Effets gyroscopiques	215
6.8.5	Questions de réflexion et concepts	219
6.8.6	Exercices	220
Chapitre 7 • La gravitation		235
7.1	Introduction	235
7.2	La découverte de la force de gravitation	238
7.2.1	Une force en $1/\text{distance}^2$	238
7.2.2	Le produit des masses	239
7.2.3	La loi des aires et la force centrale	240
7.2.4	La loi de la gravitation universelle	241
7.3	Considérations énergétiques	242
7.3.1	Énergie potentielle	242
7.3.2	Énergie totale, vitesse d'échappement	243
7.3.3	L'orbite circulaire	245
7.4	Le cas général du problème à deux corps	246
7.4.1	Introduction	246
7.4.2	Conservation de l'énergie et du moment cinétique	247
7.4.3	Le mouvement des planètes	250
7.5	Applications	256
7.5.1	La masse de la Terre et l'expérience de Cavendish	256
7.5.2	La gravité terrestre, la forme de la Terre et les marées	259
7.5.3	Questions de réflexion et concepts	267
7.5.4	Exercices	268
Références Tome 1		275
Constantes physiques fondamentales et valeurs utiles		279
Correction des exercices du tome 1		283
Index général tomes 1 et 2		389

Une annexe numérique et informatique est disponible en ligne en libre accès sur la boutique en ligne de l'éditeur : <https://laboutique.edpsciences.fr/>



Avant-propos

Pourquoi ce livre ?

Quand nous avons commencé à écrire des notes de cours de Mécanique pour des étudiants de physique en première année d'université, l'idée ne nous avait pas effleurés d'en faire un livre. Et puis sont apparus ces vingt dernières années des ouvrages d'enseignement en langue anglaise proposant une approche moins mathématique, plus orientés sur les applications pratiques et favorisant le développement de l'intuition physique (*physical insight*), prélude à la résolution de problèmes de toute nature. Des orientations qui étaient bien dans la tradition des fameux cours de Feynman au CalTech mais, bien que les étudiants de CalTech soient parmi les meilleurs d'une classe d'âge, les cours de Feynman pouvaient être déroutants à plus d'un titre pour un débutant. Des ouvrages comme celui de Halliday-Resnick-Walker reformulés à partir de bases admises autrefois comme des prérequis offrent un niveau beaucoup plus accessible pour des étudiants de parcours variés. Nous avons alors réalisé qu'il n'y avait pas tant d'ouvrages en français avec ces orientations pédagogiques.

La deuxième motivation a été d'ouvrir la Mécanique vers les problèmes de la vie quotidienne, des milieux naturels ou de l'industrie pour dépasser la relative sécheresse des présentations formelles sur les points matériels habituelles en première année qui n'attisaient guère la curiosité des étudiants. Parmi ces applications, citons les transports (avion-auto-bateau-train-vélo), les transformations d'énergie au cœur des processus industriels, le sport, le mouvement des planètes, l'architecture (au travers de l'équilibre statique), la circulation sanguine, la musique, le mouvement des insectes, les ailes d'avion, les voiles de bateau, les vagues, les

dépressions atmosphériques et les marées... La vie s'organise dans des milieux fluides, atmosphère ou océan, et la mécanique de Newton et la thermodynamique de Carnot sont les outils pour la compréhension de ce monde-là. Les fluides sont souvent présentés après que les outils d'analyse vectorielle, les opérateurs rotationnel et divergence, aient été mis en place, écartant *de facto* les étudiants n'ayant pas eu cette préparation. Pourtant beaucoup de situations expérimentales peuvent être expliquées avec des outils plus élémentaires. Il n'y a pas besoin d'un vélo professionnel pour découvrir la géographie du Tour de France. En allant moins vite, la curiosité s'en trouve aiguisée. La Thermodynamique est souvent présentée de façon autonome, quand bien même sa filiation avec la Mécanique est si évidente. Le menuisier dont la scie s'échauffe quand il coupe du bois voit bien que dynamique et thermique sont liées. C'est juste que pour traiter la mécanique de milliards de milliards de molécules, les méthodes doivent s'adapter. L'inclusion de la Thermodynamique permet d'introduire en application la physique du réchauffement global du climat et les choix énergétiques au cœur des préoccupations sur le climat de demain.

Un brin d'histoire

La révolution scientifique des xvi^e et $xvii^e$ siècles s'est faite par la force de persuasion d'expériences contrôlées et reproductibles comme celles des boules roulant sur les plans inclinés de Galilée, des observations du mouvement des planètes par Kepler, ou encore de l'origine de la pression atmosphérique par Pascal (Wootton, 2015). Et puis arrive Newton qui trouve le cadre théorique, **force** = masse \times **accélération**, pour expliquer ces observations et prédire les mouvements. De la confrontation expérience - théorie, la révolution de la connaissance était en marche. Cette histoire fait de la Mécanique une formation assez incomparable pour découvrir et apprendre la méthode scientifique : des expériences assez faciles à réaliser, des observations sous nos yeux et le cadre newtonien pour échafauder les hypothèses et les tester.

La révolution industrielle du xix^e siècle est pratique avec l'usage de la machine à vapeur qui s'impose pour produire du travail mécanique. Mais cette machine à vapeur va s'avérer cruciale pour permettre à Carnot de découvrir la loi physique la plus fondamentale, la croissance de l'entropie (du désordre) pour un système isolé, une loi qui agit partout dans la nature et dont l'influence s'étend à la chimie et à la biologie. Elle explique pourquoi la production d'électricité du monde moderne s'accompagne inévitablement d'énormes pollutions à l'origine des dérèglements climatiques qui commencent à être observés.

La révolution du xx^e siècle, celle du digital, a pénétré le monde scientifique. Le numérique permet aujourd'hui de calculer la déformation et le crash de voitures, de calculer des écoulements fluides, certes à nombre de Reynolds encore modestes, de calculer l'interaction de N planètes sur des millions d'années, d'aborder des problèmes de mécanique non linéaires qui résistaient aux méthodes analytiques

traditionnelles avant l'essor des ordinateurs, de calculer le temps de demain et le climat d'après-demain.

Assembler la Mécanique et l'apprentissage de la programmation offre un bénéfice mutuel qui dépasse la simple addition des deux domaines.

Quel contenu ?

Le livre marche dans les pas de Newton, de Laplace, de Carnot, de Lorenz et de bien d'autres naturellement, sans demander de prérequis. Organisé en douze chapitres et une annexe, la progression est régulière depuis les rappels sur les vecteurs et le calcul différentiel de base, le *calculus* des anglophones. La cinématique, la première loi de Galilée, la deuxième et la troisième loi de Newton, la statique avec une brève discussion des milieux déformables, les notions de travail et d'énergie et la dynamique de N particules en interaction forment les six premiers chapitres de mécanique classique. Le chapitre 7 présente la gravitation, le mouvement des planètes et la gravité terrestre en étant les applications phares. Cet ensemble forme le premier tome.

Le deuxième tome commence par la modification de la deuxième loi de Newton nécessaire pour prendre en compte la rotation de la Terre, ce qui permet de découvrir la nature des forces de Coriolis qui jouent un rôle si important pour le climat. Les quatre derniers chapitres tiennent une place plus originale dans un livre d'introduction en offrant une ouverture à la physique des milieux naturels et aux choix d'énergie à l'origine de la crise du réchauffement climatique. La mécanique des fluides est présentée avec ses applications classiques à la plomberie bien sûr, mais aussi aux flots sur des obstacles (ailes et voiles), à la météorologie, aux ondes dans les fluides, marée, acoustique ou autres vagues de surf. Le chapitre 10 est une introduction à la thermodynamique qui permet de découvrir les contraintes de la deuxième loi qui gouverne la production de travail mécanique et d'électricité. On y découvre que la pollution, définie comme la croissance du désordre, est toujours obligatoirement présente au cœur des transformations énergétiques même les plus sobres. Mais la thermodynamique va bien au-delà en expliquant aussi ce qui se cache derrière l'évolution spontanée d'un système, la fameuse flèche du temps. Le choix de sources d'énergie optimales pour atténuer le réchauffement climatique est la grande question du xxi^e siècle et un texte comme celui-ci ne pouvait échapper à la présentation des nombreuses manières de produire de l'électricité. Le chapitre 11 fait découvrir les phénomènes macroscopiques aux surfaces des liquides causés par les forces intermoléculaires qui permettent de découvrir l'origine des bulles de savon, des gouttes de pluie ou de rosée, du mouvement des insectes et des ondes capillaires. Le dernier chapitre est une introduction aux systèmes dynamiques, des systèmes différentiels à un, deux ou trois degrés de liberté, linéaires ou non, dont les applications en électricité, biologie, épidémiologie ou économie dépassent le cadre de la pure mécanique, mais offre un cadre conceptuel

pour unifier le comportement de ces systèmes. Le choix d'inclure le système de Lorenz permet ainsi de faire la part entre ce qui est calculable de façon robuste et ce qui relève de prédictions hasardeuses dans des systèmes sensibles aux conditions initiales. Les systèmes dynamiques offrent ici une opportunité de choix pour s'amuser à programmer des modèles simples et une annexe présente les bases de l'analyse numérique et de la programmation pour y parvenir.

Pour qui ?

Le premier tome, la Mécanique classique, a été écrit pour la première année d'université, IUT, ou classes préparatoires aux grandes écoles. Les référentiels non inertiels, la mécanique des fluides, la thermodynamique, les phénomènes de surface et les systèmes dynamiques qui constituent le deuxième tome sont typiquement des sujets de deuxième année souvent présentés avec des outils mathématiques avancés, mais l'introduction proposée ici n'en demande aucun. Ce choix permettra également aux étudiants d'autres parcours de se familiariser aux applications de la physique aux milieux naturels sous l'angle quantitatif.

Comment apprendre ?

Les lois de la Mécanique et de la Thermodynamique sont d'une simplicité et d'une généralité désarmante, une page suffit probablement. Les difficultés commencent dès qu'on veut les appliquer. La plupart des gens apprennent avec des exemples et les chapitres ont donc tous été conçus en donnant une large place aux applications des résultats théoriques. Dans ses *Tips on Physics*, Feynman admet qu'il ne connaît pas de méthodes miracles pour apprendre la Physique aux étudiants autres que de pratiquer au travers d'un grand nombre de problèmes concrets. Voulant donner dès le départ les outils pour rendre l'étudiant autonome dans l'acquisition de ses connaissances, chaque chapitre est suivi de questions de réflexion, qui demandent d'avoir saisi l'essentiel des concepts, et de 400 exercices au total dont les trois quarts sont résolus *in extenso*. La lecture de ces solutions ne saurait remplacer le temps passé par l'étudiant à **sécher** sur un problème, temps d'interrogation et de frustration qui construit l'intuition physique et permet l'acquisition en profondeur des concepts et des méthodes. Il nous a semblé qu'un texte de mécanique était aussi idéal pour motiver l'usage des outils que sont les schémas numériques et la programmation. Bien sûr il existe des codes tout faits pour résoudre un problème particulier, mais une liste de recettes passerait à côté de l'apprentissage exceptionnel à la logique qu'offre une pratique de la programmation au travers de l'écriture personnelle d'un code.

Qui sommes-nous ?

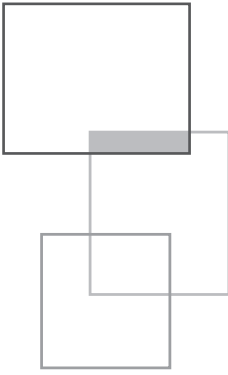
Chercheurs au Laboratoire d'Océanographie physique et spatiale, l'un en Océanographie et en Physique du climat (A. Colin de Verdière), l'autre en Physique du solide et en Mécanique céleste (S. Pogossian), nous avons enseigné la mécanique classique en première année d'université pendant une quinzaine d'années et rétrospectivement cette discipline nous semble idéale pour acquérir les qualités nécessaires à la recherche scientifique que sont logique, curiosité et rigueur.

Remerciements

O. Arzel, X. Carton, N. Daniault, T. Huck, L. Géli, N. Grima et R. Scott ont accepté de relire certains chapitres et leurs remarques judicieuses ont permis de supprimer des erreurs et d'améliorer le manuscrit. J. Sirven et A. Wirth ont fait une relecture très approfondie du chapitre Thermodynamique qui a permis d'éclaircir plusieurs points délicats. Nous restons bien sûr seuls responsables des erreurs qui pourraient subsister. J. Le Bars a contribué à la frappe de notes initiales du tome 1 et partagé avec patience ses connaissances de traitement de texte.

Les reproductions de figures ont été rendues possibles grâce aux permissions de EDP Sciences, Elsevier, ESA/NASA et Thomas Pesquet, Dover, NASA, National Parks Gallery, Ocean Data Lab (Deolen).

Que tous soient chaleureusement remerciés.



Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

La méthode scientifique se résume en trois étapes : observer la nature, faire une hypothèse sur son fonctionnement qui débouche sur une prédiction, puis tester expérimentalement cette prédiction. Si ce test expérimental s'avère positif, l'hypothèse devient une « théorie ». La phase d'induction est l'étape qui permet de passer de l'observation à la formulation de l'hypothèse, une partie où l'intuition joue le rôle principal. Le passage de l'hypothèse à la prédiction est une phase de déduction où logique et calcul jouent les rôles principaux. La révolution scientifique du milieu du ^{xvi}^e siècle n'a été rendue possible que par l'identification de ce lien entre hypothèse et expérience, identifié par les travaux précurseurs de Galilée (l'étude de la chute des corps), de Kepler (les lois du mouvement des planètes), de Snell et Descartes (les lois de la réfraction de la lumière), de Torricelli et Pascal (les premières pierres de la mécanique des fluides). Cette approche prend tout son essor quand Isaac Newton du Trinity College de Cambridge publie ses *Principia* le 8 mai 1686 et donne l'objectif de la philosophie¹ :

... for the whole burden of philosophy seems to consist in this – from the phenomena of motions to investigate the forces of nature, and then from these forces of nature to demonstrate the other phenomena...

1. La philosophie a un sens plus restrictif aujourd'hui et traite de questions existentielles sur les causes et les conditions de la vie humaine pour lesquelles les lois restent qualitatives, guidées entre autres par la lutte pour la survie, la raison, la justice, la morale...

... tout l'effort de la philosophie semble consister en ceci – trouver les forces de la nature à partir du phénomène des mouvements puis démontrer les autres phénomènes à partir de ces forces...

Une théorie validée expérimentalement va alors servir pour expliquer d'autres faits naturels ou développer les applications qui en découlent. L'histoire de l'origine de la méthode scientifique est documentée par D. Wootton, 2015, *The Invention of Science*.

Certes la mécanique de Newton (dite classique) fait faire un bond considérable, mais le début du xx^e siècle trouve ses limites d'application quant à la vitesse des objets et à leur taille. Les vitesses doivent en effet être petites devant la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$), tandis que la taille des objets doit être bien supérieure à la dimension des atomes (typiquement $\sim 10^{-10} \text{ m}$). Deux autres branches de la Physique sont alors apparues, la théorie de la relativité d'Einstein - Poincaré qui rend compte des phénomènes lorsque la vitesse d'un corps s'approche de la vitesse de la lumière et la mécanique quantique pour les objets d'échelle atomique ou moléculaire de Schrödinger, Heisenberg et Dirac pour ne citer que les principaux. La figure suivante schématise ce lieu d'application de la mécanique classique dans un espace construit sur la vitesse des objets V et leur taille L .

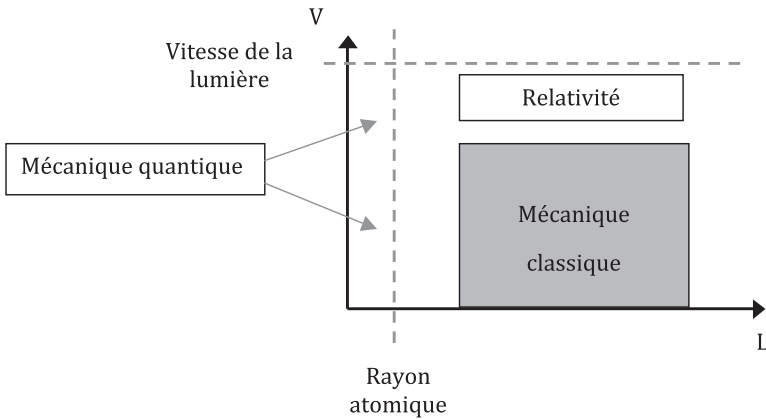


Figure 1.1

La mécanique de Newton s'applique donc à des objets macroscopiques qui se déplacent suffisamment lentement. La 2^e loi de Newton contient toutes les informations nécessaires pour prédire le mouvement d'un corps sous une forme très compacte :

$$\mathbf{Forces} = \text{masse} \times \mathbf{accélération} \quad 1-1$$

Les forces appliquées sur le corps sont égales à la masse de ce corps fois son accélération. Les caractères gras indiquent que **force** et **accélération** sont des **vecteurs**,

des entités qui possèdent une intensité mais aussi une orientation dans l'espace et plusieurs nombres sont alors nécessaires pour les caractériser, deux dans le plan, trois dans l'espace, appelés les composantes du vecteur. Par contraste la masse est un scalaire, parfaitement déterminé par un seul nombre. Elle mesure la quantité de matière dans le corps en question. Une des grandes difficultés de la loi 1-1 est la notion d'accélération. On se représente facilement une vitesse, un déplacement parcouru en un temps donné. Si l'intervalle de temps devient très petit, la vitesse devient instantanée et s'approche de la dérivée du déplacement par rapport au temps. L'accélération est simplement la variation de cette vitesse durant un temps donné et de façon similaire tend vers la dérivée de la vitesse lorsque l'intervalle de temps devient très petit. Reste les forces. Pour les définir, on peut certes utiliser la relation 1-1 et dire que la force est juste la masse fois l'accélération. Pour sortir de cette tautologie, il faut réaliser qu'un corps ne peut changer sa vitesse que lorsqu'il interagit avec un autre corps. Un corps isolé (loin de tout) conservera sa vitesse et la relation 1-1 dit alors que la force totale sur ce corps est nulle, un résultat qui constitue la 1^{re} loi de la Mécanique due à Galilée. Ce n'est qu'en étudiant les interactions entre les corps que l'on peut connaître les forces et si les forces sont connues, alors la deuxième loi de Newton devient prédictive puisqu'elle donne l'**accélération** égale à **force**/masse et se pose alors la question de trouver vitesse et déplacement des corps en interaction. Le calcul différentiel a été inventé simultanément par Newton et Leibniz, précisément pour cet objectif. Le juge suprême de toutes les conséquences que l'on peut tirer de la loi 1-1 reste l'observation et l'expérience. Ce sont elles qui peuvent guider l'intuition et aider à réaliser par exemple si l'ordre de grandeur du résultat d'un calcul est raisonnable ou franchement délirant. La mécanique classique déduite de 1-1 a des applications industrielles considérables (machines, transports, architecture, sport, acoustique...) et les calculs de l'ingénieur sont entièrement ancrés dans le réel pour garantir la solidité d'un pont ou d'une aile d'avion. Mais 1-1 fournit aussi le cadre théorique pour calculer les mouvements de l'atmosphère, des océans. Un modèle de prévision du temps applique la relation 1-1 en chaque point d'une grille couvrant l'atmosphère.

En appliquant 1-1, on apprend au lycée que la position verticale $x(t)$ d'une pomme lancée vers le haut avec une vitesse verticale v_0 en $x = 0$ s'écrit :

$$x = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \quad 1-2$$

L'axe Ox est ici orienté vers le bas et si $v_0 < 0$, la pomme commence par monter, mais son poids associé à la gravité prend le dessus et au bout d'un peu de temps, la vitesse de la pomme devient positive et augmente comme t . Cela ne sert à rien de mémoriser cette formule 1-2 car elle est très facile à retrouver à partir de 1-1 puisque le poids mg dans la direction de l'axe x est la seule force qui agit sur la pomme :

$$m a_x = m g$$

soit

$$a_x = g$$

L'accélération a_x vers le bas est donc juste constante, égale à g . Mais la vitesse est juste l'intégrale de l'accélération par rapport à la variable temps de sorte que :

$$v = gt + C_1$$

où C_1 est une constante d'intégration totalement arbitraire. Elle traduit le fait que la loi 1-1 est incomplète. Pour prédire le mouvement d'un objet, il faut aussi savoir d'où il part à un instant donné, ce sont les conditions initiales. Ainsi, pour déterminer v , on a besoin de connaître la vitesse de la pomme v_0 à $t = 0$ et on écrira :

$$v_0 = g \cdot 0 + C_1 \text{ et donc } C_1 = v_0 \text{ de sorte que :}$$

$$v = gt + v_0$$

Mais la position $x(t)$ est juste l'intégrale de la vitesse v :

$$x = \frac{1}{2}gt^2 + v_0 t + C_2$$

avec une deuxième constante d'intégration définie par la position initiale de l'objet $x = 0$ à $t = 0$:

$$0 = \frac{1}{2}g \cdot 0 + v_0 \cdot 0 + C_2$$

ce qui démontre 1-2. Si on change les conditions initiales de la pomme, C_1 et C_2 ne sont plus les mêmes et la formule 1-2 change. La seule chose à retenir est donc juste la deuxième loi 1-1 et les conditions initiales. Ensuite il faut connaître les bases du calcul différentiel pour passer de l'accélération à la vitesse puis à la position. Cet exemple très simple contient les bases de la dynamique (la mécanique du mouvement des objets), une démarche que l'on retrouvera dans une multitude de situations : pour appliquer la deuxième loi 1-1, il faut certes connaître les forces, mais l'exemple de cette pomme montre que cela ne suffit pas. Pour prédire le mouvement d'un corps, il faut savoir d'où il part et avec quelle vitesse à un instant donné. On peut appliquer 1-2 pour le saut en hauteur. On pourrait se dire qu'un sauteur léger va monter plus haut qu'un sauteur lourd mais 1-2 ne fait pas intervenir la masse... On pourrait aussi se dire que si on court deux fois plus vite, on va sauter deux fois plus haut... mais c'est faux. On va sauter quatre fois plus haut. Vérifiez ce point avec la relation ci-dessus. Le saut en hauteur (ou à la perche) cache déjà quelques subtilités.

Les succès de la mécanique classique ont commencé par expliquer des mouvements assez simples, les trajectoires des pommes, de la lune, des planètes. On pourrait y ajouter l'architecture classique, démarrée il y a plus de 2 000 ans, dont l'objectif est d'interdire le mouvement relatif des parties d'un bâtiment, une part importante de la mécanique appelée Statique. La solution complète du problème à deux corps (une planète autour du soleil) fut une réussite considérable validant la loi de la gravitation universelle en $1/(\text{distance})^2$. Cette réussite fut conceptualisée par Laplace qui cent ans après émit l'hypothèse d'un univers calculable et donc prévisible, si tant est que position et vitesse initiale de tous les corps en interaction fussent connues à un instant t . Pour plus de deux corps en interaction, la théorie du chaos redécouverte

poids · I-9, I-88, I-94, I-96–98, I-241
 point
 – fixe · I-255, II-659–674, II-677–679, II-681–682, II-684–688
 – triple · II-493–494
 Poiseuille-Hagen (écoulement) · II-445
 pompe à chaleur · II-531–532
 portance · II-438–442
 portrait de phase (exemples) · II-671–672, II-674, II-682
 potentiel
 – force dérivant d'un potentiel · I-126
 – potentiel thermodynamique · II-547–554
 pression
 – hydrostatique · II-423
 – osmotique · II-642
 prévision · I-11, I-202, II-683–684
 principe
 – d'action et réaction · I-90–91, I-186–187, I-239
 – d'inertie · I-84–85
 processus (voir transformation)
 produit de vecteurs
 – scalaire · I-24–25
 – vectoriel · I-25–26
 proton · I-279, II-577, II-706
 puissance · I-124
 pulsation · I-103

Q

quantité de mouvement · I-87, I-185–187, I-190–192, II-515

R

radioactivité
 – défaut de masse · II-579
 – demi-vie · II-579
 rayonnement
 – infrarouge · II-557–561, II-563–565
 – solaire · II-556, II-596–597

réacteur nucléaire · II-585–587
 réaction
 – chimique · II-566, II-569, II-577
 – nucléaire · II-581–582
 – propulsion à · I-194–195
 référentiel
 – inertiel · I-85–87, II-400
 – terrestre · I-86, I-260, II-399–400, II-408
 réfrigérateurs · II-531
 relation de
 – Bernoulli · II-433–435
 – Laplace-Young · II-637–639
 – Stefan-Boltzmann · II-557
 rendement (moteur thermique) · II-530, II-533
 réservoir · II-490
 résonance · I-208–212
 ressort · I-102–105, I-130–131
 résultante des forces · I-149–150
 rétroaction (*feedback*) · II-600
 réversibilité · I-159, I-202, II-486
 rotation · I-59–61, I-260–262, I-280, II-399–411, II-438–439, II-447–450

S

salinité · II-510–511
 scaling · II-414–416
 sensibilité aux conditions initiales (SCI) · I-84, I-203, II-683–684
 sensibilité du climat · II-600
 séparation de couches limites · II-435, II-442
 sismographe · I-208–210
 solaire (conversion d'énergie) · II-597–598
 soleil · I-235–238, I-280, II-556–558, II-585, II-597–598
 son (vitesse) · II-432, II-459–462
 standards · I-13
 Stirling (approximation de) · II-540

- système
 - de Lorenz · II-679–683
 - dynamique · II-657
 - fermé - ouvert · II-485
 - isolé · I-186–187, II-484–485
 - thermodynamique · II-486

T

- température
 - Celsius · II-493–494
 - critique · II-497–498, II-500
 - d'émission · II-557, II-559–561
 - Kelvin · II-493–494
- temps
 - flèche · I-202, II-518
 - mesure · I-13
- tension
 - sur un solide · I-160–161
 - superficielle · II-629–632
- théorème
 - du calcul différentiel · I-31–32
 - de Carnot · II-534
- théorie (cinétique des gaz) · II-513–514, II-517
- thermomètre
 - gaz · II-492–494
 - mercure · I-237, I-258, II-491–493
- toile d'araignées · II-687
- traînée · II-440–442
- transformation
 - adiabatique · II-513–514
 - galiléenne · I-65–66
 - irréversible · II-487, II-520–522
 - isotherme · II-521–522
 - réversible · II-520–522
- translation · I-65–66, I-110, I-150, II-516–517
- transport (phénomènes de) · II-505
- travail
 - d'une force · I-120–124
 - fait par un gaz · II-487–488
- tritium · II-577

- troposphère · II-559
- tube
 - capillaire · II-493, II-640–641
 - convergent – divergent · II-435
- turbine · II-572, II-575, II-586, II-593–594
- turbulence · II-418, II-449–454

U

- unités · I-12–14
 - conversion · I-16
 - masse atomique · II-577
 - Système international, SI · I-13
- uranium · II-580–582, II-585

V

- van der Waals · II-496–500
 - vapeur · I-280, II-492, II-496, II-499–500, II-586–587
 - vecteurs
 - addition - soustraction · I-17–20
 - produit scalaire · I-24–25
 - produit vectoriel · I-25–26
 - vibrations · I-208, I-215
 - viscosité cinématique · II-422
 - vitesse
 - angulaire · I-56, I-59, I-73–74, I-280, II-399–402
 - d'échappement · I-243, I-245, I-258
 - de groupe · II-466–468
 - de la lumière · I-8, I-280, II-705
 - de phase · II-455–459, II-461–462
 - moyenne · I-49, I-51, II-515–516
 - scalaire · I-50–51
 - vectorielle · I-51
 - volume
 - molaire · II-495
 - spécifique · II-495
- W**
- watt · I-124