

SCIENCES TECHNOLOGIES SANTÉ
série Sciences de la matière

Physique et Mécanique

Une initiation
aux méthodes de résolution
des problèmes de physique

Jean-Marc Virey

2015

PRESSES UNIVERSITAIRES DE PROVENCE

© PRESSES UNIVERSITAIRES DE PROVENCE

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

29, avenue Robert-Schuman - F - 13621 Aix-en-Provence CEDEX 1

Tél. 33 (0)4 13 55 31 91

pup@univ-amu.fr – Catalogue complet sur <http://presses-universitaires.univ-amu.fr/>

DIFFUSION LIBRAIRIES : AFPU DIFFUSION – DISTRIBUTION SODIS

Avant-propos

Ce livre est le fruit de plusieurs années d'expériences d'enseignements auprès de l'université d'Aix Marseille en première année de licence des cycles scientifiques (physique, chimie, mathématiques) et du cycle préparatoire aux écoles d'ingénieurs POLYTECH. Il s'adresse aux étudiants voulant réaliser des études en sciences fondamentales ainsi qu'à ceux désirant s'orienter vers les métiers de l'ingénieur.

Il existe un grand nombre de livres traitant de la mécanique et on peut légitimement se poser la question de l'intérêt d'un nouvel ouvrage sur le sujet. Depuis les années 2000 plusieurs réformes des programmes du secondaire se sont succédé et ont amené à une transformation profonde des connaissances et des compétences des lycéens. Si on doit résumer en une phrase cette mutation, on pourrait dire que les connaissances et les compétences associées à la réflexion sont devenues plus vastes au détriment des compétences calculatoires qui se sont fortement réduites.

Est-ce un mal? Non. Cependant, le degré d'exigence à l'université et en classes préparatoires, en France, est resté approximativement le même depuis plusieurs décennies. On attend des étudiants qu'ils développent de fortes compétences à la fois théoriques et expérimentales sur leur approche des problèmes de physique.

Pourquoi développer une approche théorique? La révolution de notre description physique du monde, que l'on peut faire remonter jusqu'à Galilée, est directement associée à la naissance de la démarche scientifique mêlant intimement expériences et modélisation théorique. L'utilisation des mathématiques pour décrire les phénomènes physiques a été, et est toujours, un des moteurs les plus puissants de l'accroissement de nos connaissances! Les théories physiques font des prédictions ce qui représente une force indéniable. Les sauts intellectuels que nous ont fait franchir Descartes, Lagrange ou Poincaré, pour ne citer que quelques illustres savants français, sont incommensurables. Cette longue tradition de physique mathématique fait que les programmes de physique de l'enseignement supérieur en France reposent sur des compétences théoriques et des techniques calculatoires fortes.

Faut-il pour autant négliger l'approche expérimentale? Non, certainement pas. Les expériences permettent de cadrer notre description de la nature, elles sont à la base de notre vision du monde physique. L'autre moteur le plus puissant de l'accroissement de nos connaissances correspond aux découvertes expérimentales inattendues! L'apprentissage des méthodes expérimentales est tout aussi important que celui des méthodes théoriques, cependant le support livre n'est pas adapté pour cela, il faut avoir recours à des manipulations que l'on effectue dans des salles de travaux pratiques... Raison pour laquelle nous ne parlerons que très peu des aspects expérimentaux dans cet ouvrage.

La transition secondaire-supérieur pose donc des problèmes de plus en plus difficiles que ce livre tente d'amoinrir. Il a été rédigé dans le cadre de la mise en place d'une nouvelle méthode pédagogique reposant sur les concepts

d'« apprentissage par problèmes » et d'« apprentissage par les pairs ». Ces aspects sont détaillés dans la partie suivante *Comment exploiter ce livre ?*

En résumé, cet ouvrage expose les aspects les plus fondamentaux d'un cours de mécanique et insiste sur les techniques de résolution des problèmes de physique. Afin d'initier les nouveaux étudiants à ces différentes méthodes une grande partie du livre est rédigée sous la forme d'« exercices de cours » où la résolution des questions posées est grandement détaillée. L'objectif principal de ce manuel est de remplacer le cours magistral réalisé traditionnellement par les enseignants, qui avec le temps est devenu un des meilleurs anesthésiants pour étudiants et une des sources de la dépression des professeurs... Ce livre veut développer la plus grande autonomie possible des étudiants dans l'analyse et la résolution des problèmes de physique.

Contact

Cher lecteur, je vous remercie par avance de me faire part de vos commentaires et suggestions sur le contenu de cet ouvrage en me contactant directement à l'adresse suivante : Jean-Marc.Virey@univ-amu.fr

Remerciements

Ce livre n'aurait jamais vu le jour sans mes collègues enseignants chercheurs de l'université d'Aix Marseille. Il est clair que de nombreux exercices ne sont pas originaux et ont été empruntés à la multitude de fascicules d'exercices rédigés par les générations d'équipes pédagogiques qui se sont succédé dans l'enseignement de la mécanique. Je tiens à remercier ceux qui auront un sourire en reconnaissant un de leurs énoncés dans la liste des exercices qui sont proposés.

Un grand merci aux étudiants ayant suivi mes enseignements et enrichi mon expérience, ainsi qu'aux enseignants des UE Physique1, Physique2 et Physique newtonienne, qui m'ont entouré pendant plusieurs années et fourni les commentaires indispensables dont ce livre bénéficie. Je salue les travaux et l'engagement de Nathaniel Lasry (John Abbott College, Canada), des enseignants de l'Université de Louvain (Belgique) et de l'INSA Toulouse, dans la mise en place de pédagogies actives pour la physique. Je remercie aussi les collègues qui ont joué un rôle plus ou moins important dans l'élaboration de ma vision des mondes physique et éducatif. Voici leurs noms : Simona Bodéa, Régis Bisson, Gwenn Boedec, Mickaël Bosco, Thierry Chave, Éric Salomon, Christian Marinoni, Gaëtan Hagel, Olivier Morizot, Laurent Raymond, Daniel Garnier, Laurence Chérigier-Kovacic, Chérifa Abid, Fabienne Bruny, Anne Ealet, Madeleine Sirugue-Collin, Charling Tao, Alain Bonissent, Claude Bourelly, Dominique Fouchez, Bruno Iochum, Sebastian Linden, Thomas Schücker, Jacques Soffer, Pierre Taxil, André Tilquin et Erden Tuğcu.

Les mots ne sont pas assez forts pour exprimer ma gratitude à ma famille qui m'a soutenu dans ce projet et en particulier à mes parents, Danièle et Pierre, pour leur aide précieuse, et à mes enfants, Angèle et Marius, pour leur gentillesse durant mes longues phases studieuses et qui un jour prochain liront peut-être ce livre.

Comment exploiter ce livre ?

La première chose à réaliser est que l'étude de la mécanique permet de comprendre un grand nombre de phénomènes courants, mais qu'elle est surtout à la base de la compréhension de tous les autres domaines de la physique. Si vous négligez votre compréhension de la mécanique préparez-vous alors à avoir de sérieuses difficultés dans vos autres cours de physique...

Ce livre, ou plutôt ce « manuel d'initiation », a pour objectif que les étudiants développent en toute autonomie les connaissances et les compétences associées à l'étude de la mécanique, nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques. La nouvelle méthode pédagogique associée à cet ouvrage, détaillée dans la section suivante, comporte une première phase de travail individuel où la bonne exploitation des contenus de ce livre est indispensable. L'initiation peut se décomposer en cinq phases distinctes :

- 1) Lecture et analyse des objectifs d'apprentissage.
- 2) Lecture du manuel et initiation à la résolution de problème.
- 3) Reprise des exercices de cours.
- 4) Entraînement à résoudre des exercices et des problèmes.
- 5) Vérification des acquis.

Cependant, nous avons choisi de vous fournir un document assez complet, ainsi certaines parties vous sembleront difficiles en première lecture et ne sont pas exigibles comme connaissances de première année, mais vous en aurez besoin les années suivantes. Nous espérons que ce livre vous sera utile pendant toutes vos études et non pour votre première année uniquement. Ci-dessous, nous détaillons les cinq phases qu'il vous faut suivre pour que votre formation en mécanique soit du plus haut niveau.

Phase 1 – Lecture et analyse des objectifs d'apprentissage

Chaque chapitre commence par une liste des objectifs d'apprentissage qui se décomposent en connaissances et en compétences. Prenez le temps de les lire et de distinguer ce qui est connu de ce qui ne l'est pas. Lorsque les notions mentionnées ne vous sont pas étrangères, faites un effort de mémoire pour clarifier dans votre esprit ce qui est maîtrisé et ce qui est obscur, à la fois au niveau des concepts physiques que des techniques mathématiques. Cette phase est la plus rapide mais ne doit pas être négligée.

Phase 2 – Lecture du manuel et initiation à la résolution de problème

Pendant cette phase de lecture, vous devez vous demander en permanence si vous comprenez ce qui est écrit. Le cours expose les points essentiels à connaître avec un développement des idées les plus fondamentales que vous retrouverez, peut être, dans la suite de vos études, ainsi que les démonstrations des résultats et des théorèmes de base. Des exercices, particulièrement importants pour la compréhension du cours et pour développer votre aptitude à la résolution des exercices et des problèmes, sont fournis avec énoncés et solutions détaillées. En fait, des pans entiers d'un cours traditionnel sont rédigés, dans ce livre, sous

la forme d'exercices de cours afin de vous permettre d'identifier aisément les connaissances et compétences que l'on exige de vous.

Néanmoins, la lecture directe de certains chapitres pourra vous sembler trop abstraite et/ou trop technique. En effet, pour ne pas alourdir le cours de trop de textes et afin d'insister sur l'initiation à la résolution des problèmes, nous n'avons pas répété les longues introductions pédagogiques aux différents concepts physiques que l'on peut trouver dans de nombreux ouvrages. Ainsi, **avant d'étudier chaque chapitre nous vous conseillons fortement la lecture de certains chapitres ou sections de chapitre d'un autre livre pris comme « ouvrage de base »**. Les réflexions menées durant la phase 1 de prise de conscience des objectifs d'apprentissage, doivent vous guider sur la nécessité d'utiliser le livre de base ou non. **Si vous choisissez de ne pas étudier préalablement le livre de base mais que vous constatez que les exercices de cours sont trop durs, arrêtez la lecture de ce manuel et plongez-vous dans le livre de base!** Bien-entendu une simple lecture ne suffit pas, il faut essayer de comprendre et aussi être capable de faire les exercices d'applications (relativement faciles) donnés dans le livre de base.

L'ouvrage de base que nous préconisons est le livre en langue anglaise « **University physics plus modern physics** » de **H.D. Young, R.A. Freedman et A.L. Ford** (Éditeur : Pearson). Ce livre (noté YF dans la suite) couvre l'ensemble du programme des deux années de classe préparatoire et des trois années de licence. On vous conseille donc l'achat de ce livre pour l'ensemble de votre cursus en physique. Ne soyez pas effrayé par le fait qu'il soit écrit en anglais, vous verrez que l'anglais scientifique s'apprend rapidement et que cet effort sera d'un grand intérêt pour votre poursuite d'étude. Nous avons choisi ce livre pour ses grandes qualités pédagogiques.

Pour les réfractaires, nous conseillons le livre (en français) « Physique » de E. Hecht (Éditeur : De Boeck). Ce livre couvre aussi l'ensemble du programme de votre cursus en physique. Nous le mettons en second choix car il possède moins d'exercices d'applications avec solutions sans explications.

Ces deux livres offrent de bonnes introductions aux concepts et aux méthodes de calculs élémentaires. Cependant, les programmes français de licence et des classes préparatoires vont, en terme de compétences, bien au-delà de ce qui est présenté dans ces livres. Ils ne sont pas suffisant pour vous garantir le succès à vos examens et concours. C'est une des raisons principales qui a motivé la rédaction du présent ouvrage.

Phase 3 – Reprise des exercices de cours

Vous venez de finir la lecture du chapitre et vous avez compris l'essentiel de l'exposé, les connaissances sont en bonne voie d'acquisition. À présent, il faut s'attaquer au développement des compétences. **Lire et comprendre ne suffit pas pour apprendre et mémoriser, il faut s'exercer.** Une grande partie du manuel est rédigée sous la forme d'exercices de cours afin de vous permettre de voir si vous avez acquis les compétences techniques nécessaires à la résolution des problèmes de physique.

Il est indispensable que vous repreniez les énoncés de tous les

exercices de cours et que vous essayiez de les faire *sans regarder les solutions*. Cette phase est primordiale pour commencer à acquérir les compétences mentionnées en début de chapitre.

Les exercices de cours doivent être parfaitement maîtrisés

Phase 4 – Entraînement à résoudre des exercices et des problèmes

Après la phase précédente, les compétences sont en cours d'acquisition mais pour les forger dans votre esprit, rien de mieux que l'entraînement. À la fin de chaque chapitre, excepté le premier, vous trouverez une liste d'exercices à effectuer pour parfaire votre formation. Les exercices suivent l'avancement des idées du cours et sont triés par ordre de difficulté croissante. Certains exercices de difficulté modeste sont considérés comme des exercices d'entraînement afin d'évaluer vos aptitudes.

Si vous n'arrivez pas à les faire, travaillez plus, travaillez les avec des camarades et posez-vous des questions sur vous ! Analyser en profondeur votre méthode de travail, vos motivations, vos aptitudes... Prenez le livre de base et effectuer les exercices d'applications qui sont relativement faciles et dont les corrections sont grandement détaillées.

Viennent ensuite des exercices plus difficiles, de véritables problèmes, dont la résolution sera une preuve de votre maîtrise des concepts du cours et des techniques de calculs.

Phase 5 – Vérification des acquis

Vous avez bien travaillé et vous voulez passer au chapitre suivant. Cependant, avant de le faire, il est important de revenir à la liste des objectifs d'apprentissage donnés en début de chapitre. Vérifiez que les connaissances et compétences sont acquises. S'il reste des zones d'ombre reprenez vos efforts là où il le faut, s'il n'y en a pas, passez à la suite en étant fier du travail accompli.

Site web compagnon

Des informations et du matériel complémentaires aux contenus de ce livre peuvent être trouvés sur la page enseignement du site web de l'auteur :
<http://www.cpt.univ-mrs.fr/~virey/ens.php>

Bibliographie

Nous complétons cette partie par une courte bibliographie en précisant des livres intéressants qui ont servi de support à la rédaction du présent manuel :

- Le cours de Physique de Feynman (<http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>)
- Introduction à la mécanique, M. Le Bellac, (DIA)
- Cours de Physique de Berkeley (Dunod)
- L'univers mécanique, L. Valentin (Hermann)
- H Prépa : Physique 1ère année MPSI-PCSI-PTSI : Exercices & Problèmes, J.-M. Brébec, T. Desmarais, M. Ménétrier et B. Noel (Hachette)
- Physique générale de M. Alonso et E.J. Finn (Dunod)

Méthode pédagogique associée à ce manuel

L'objectif de ce manuel est de remplacer les cours magistraux afin de favoriser le développement de votre autonomie dans l'analyse et la résolution des problèmes de physique.

Depuis les années 1990-2000 de nouvelles méthodes pédagogiques pour l'enseignement de la physique ont vu le jour en Amérique du nord et en Europe. En particulier, les méthodes d'« apprentissage par problèmes » et d'« apprentissage par les pairs », reposent sur la notion de travail en groupe pour un meilleur apprentissage personnel.

Le travail est organisé sous la forme d'une alternance avec, d'une part, des séances en petits groupes (5 à 7 étudiants encadrés par un enseignant-tuteur qui stimule sans diriger mais dont les objectifs sont précis), et d'autre part, des périodes de travail individuel (étude des cours, réalisation des exercices de cours, d'application et d'entraînement).

Le travail en groupe conduit à une amélioration de l'apprentissage de chaque individu grâce à plusieurs facteurs. L'émulation due au groupe amène à une meilleure préparation du sujet et à une responsabilisation vis à vis des autres membres. La confrontation avec des points de vue différents fournit une meilleure compréhension des problèmes, et dirige le groupe, en général, vers la meilleure solution. Le bon fonctionnement du groupe implique la nécessité d'explicitement sa pensée et de la communiquer à d'autres.

Par ailleurs, cette approche requiert et développe des compétences générales : communication, raisonnement critique, approche logique et analytique d'un problème, prise de décision, auto-évaluation, travail de collaboration, résolution de conflits...

Afin d'optimiser le fonctionnement du groupe, il est important que chaque membre ait un rôle actif et particulier mais ceci est une autre histoire qui ne concerne pas le cœur du présent manuel. Pour plus d'informations sur ces formes d'apprentissages nous conseillons la lecture du guide des APP réalisé par des enseignants de l'université de Louvain et de l'INSA de Toulouse (http://enseignants.insa-toulouse.fr/fr/Lapp/le_guide_app.html), voir aussi le site du CCDMD (Centre Collegial de Développement de Matériel Didactique) au Canada (<http://pbl.ccdmd.qc.ca/fr/>).

Stratégie de résolution d'un problème

Obtenir la solution d'un problème n'est pas forcément une chose aisée en physique. Il y a cependant quelques étapes indispensables à respecter si on veut obtenir un résultat et avoir confiance en lui. La stratégie de résolution d'un problème de physique peut être résumée en quatre étapes essentielles :

1) Lire et analyser le problème

Tout en lisant l'énoncé du problème dans son intégralité, identifier les concepts physiques mis en jeu, le cadre de l'étude et ses approximations. Mesurer ce qui peut être fait sans difficulté et ce qui va demander du travail. Si possible, essayer d'avoir une vision du problème et une intuition de la solution.

2) Poser le problème

On commence à rentrer dans le cœur du problème et pour cela il faut fixer ses idées et les notations qu'on va utiliser. En général, la première chose que l'on doit faire c'est un schéma de la situation. On représente le système physique à un instant quelconque, mais on indique aussi les positions particulières s'il y en a (position d'équilibre, extremums...), les forces mise en jeu, les contraintes... On définit le système de coordonnées et l'ensemble des symboles qui sont donnés par l'énoncé et que l'on va utiliser par la suite. Si le problème est à trois dimensions, on évite les dessins en perspectives et on fait autant de plans de coupe que nécessaires. On distingue bien, au moins dans son esprit, les paramètres et les variables.

3) Résoudre le problème

C'est la partie mathématique proprement dite. Appliquée à la physique, ce sont des techniques à apprendre avec leurs lots de trucs et astuces à mémoriser. Rien de bien sorcier mais qui nécessite du travail et encore du travail pour mémoriser ces concepts abstraits.

4) Évaluer le résultat

C'est l'« art » du physicien ! Certains vont trouver cette étape naturelle (et ont en fait déjà le résultat à partir de l'étape 1), et pour d'autres c'est l'étape la plus dure voire impossible. En général, de la simple logique et un bon esprit critique suffisent. Cependant, un outil très puissant et spécifique à la physique va nous être d'une grande utilité : c'est le raisonnement dimensionnel. En effet, les quantités physiques ont une dimension qui s'exprime dans un système d'unités, et le jeu entre ces grandeurs permet de vérifier la validité d'une formule. Les ordres de grandeurs permettent de vérifier la valeur numérique d'un résultat.

Ces quatre étapes sont toutes aussi importantes, autant l'une que les autres. C'est le temps qu'on y passe qui diffère grandement selon le problème posé. On a tendance à négliger les deux premières étapes au profit de la troisième, et seuls les bons physiciens ont conscience de la dernière ! Insistons sur le fait que plus on passe de temps sur les deux premières étapes, plus la troisième est rapide. Quand vous ne savez pas par quel bout attaquer un problème c'est que vous êtes en train d'oublier la première étape... Quant à la quatrième étape qui ne vous est pas familière, elle ne nécessite aucune technique mathématique excepté le jeu des puissances (c-à-d savoir manipuler des exposants), et donc nous allons commencer par là, c'est le sujet du premier chapitre.

Index

- A**
- abscisse curviligne 56
- accélération
- angulaire 69
 - centripète . 60, 61, 69, 76, 78, 305
 - d'entraînement 300
 - de Coriolis 300
 - de la pesanteur 101, 309
 - instantanée 50, 59
 - loi de composition 300
 - moyenne 50, 59
 - normale *voir* centripète
 - polaire 76
 - tangentielle 60, 77
- amplitude maximale 176, 196, 346
- analyse dimensionnelle 20
- angle, dimension et unités 25
- apesanteur *voir* impesanteur
- Archimède, poussée d' 109
- atome 27, 29, 253
- Avogadro 17, 29, 33
- B**
- balistique 62
- battements 198
- Bohr 253
- boson 238
- C**
- Cavendish 289
- célérité 356
- centre de masse 216, 258
- champ
- électrique 104, 260, 374
 - gravitationnel 260, 373
 - magnétique 104
- chemin 143, 146, 153, 157, 349
- choc 211
- cinématique 45
- circulation 144, 349
- coefficients indéterminés, méthode 340
- collision
- élastique 220
 - angle de 225, 226
 - inélastique 219
- complexe, nombre 326
- coniques 269, 273, 286, 361
- paramètre 273, 361
- conservation
- énergie 139, 153, 269
 - impulsion 209, 214
 - lois de 139
 - moment cinétique .. 237, 243, 269
- constante d'Avogadro 17, 29, 33
- conversion (entre unités) 23
- Coriolis 300, 304, 314
- cosinus 324
- cotangente 325
- Coulomb, loi de/force de 103
- D**
- degré de liberté 219, 220, 226
- déphasage 176, 191, 192, 346
- déplacement élémentaire 56, 72, 79, 83
- dérivée 327
- Descartes, lois de 84
- développements limités 331
- diagramme d'espace-temps ... 48, 355
- différentielle
- définition 48, 327
 - équation 124, 337
 - opérateurs 333
 - opérations 328
- diffusion, angle de 226
- dimension
- analyse 21, 24
 - espace 45, 374

- divergence 153, 334, 373
 Doppler, effet 355, 358
 dynamique 99, 111
- E**
- effet Doppler 355, 358
 Einstein 15, 19, 26
 électromagnétisme 17, 102
 ellipse 247, 272, 361
 demi grand axe 273, 363
 demi petit axe 363
 énergie
 cinétique 144
 conservation 139
 diagramme 154
 mécanique 153
 potentielle 145, 156, 349
 de la pesanteur 148
 de rappel élastique 149
 effective 270
 gravitationnelle 150, 259
 travail 140, 143
 équation (de)
 différentielle 124, 337
 différentielle couplée 348
 différentielle non linéaire 342
 Euler-Lagrange 161
 Friedman 264
 horaire 47, 48, 355
 la dynamique 111, 159
 Poisson 374
 second degré 323
 équilibre 112, 155, 241
 équipotentielle, surface/ligne 152
 espace
 homogénéité 209
 isotropie 237
 état
 libre 263, 274, 275
 lié 263, 272
 étoile 35, 37
 Euler 161, 326
 évènement 355
 excentricité 273, 361
 exponentielle 323
- F**
- facteur de qualité 187, 197
- Fermat, principe de 84
 fermion 238
 fonctions à plusieurs variables 332
 force (de) 99
 Archimède 109
 centrale 100, 257, 374
 centrifuge 114, 304, 305, 311
 choc 211
 conservative ... 144, 145, 151, 349
 Coriolis 304, 314
 électrique 102–104
 électromagnétique 17, 104
 entraînement 304
 fictive 114, 295, 301
 frottements fluides 109
 frottements solides 107
 frottements visqueux 109
 gravitationnelle .. *voir* gravitation
 inertie 114, 295, 301
 Laplace 104
 Lorentz 104
 magnétique 102, 104
 non conservative 144, 157
 nucléaire faible 17, 106
 nucléaire forte 17, 105
 pesanteur *voir* poids
 rappel élastique 107
 réaction 106
 tension 106
 foyer 273, 362
 fréquence 55
 fréquence angulaire ... *voir* pulsation,
 voir vitesse angulaire
 Frenet, base de 77
 fréquence 171
 friction, coefficient de 108
 Friedman, équation de 264
- G**
- galaxie 38, 40, 42
 Galilée, transformation .. 68, 218, 298
 Gauss, théorème de 374
 géostationnaire, satellite 288
 gluon 238
 gradient 151, 333
 gravitation 17
 champ 260, 373

- énergie potentielle 150, 259
 force 100, 257
 marées 289
 potentiel 260, 373
- H**
- Halley, comète 288
 Heisenberg 20
 Higgs, boson de 33
 Hubble, loi de/constante de... 38, 264
 hyperbole 275, 365
- I**
- imaginaire, nombre 326
 impesanteur 321
 impulsion 111, 209
 incertitude 22
 intégrale 328
 interaction *voir* force
- K**
- Kepler
 1^e loi 247, 273
 2^e loi 245
 3^e loi 35, 38, 283
- L**
- Lagrange 84, 161
 Laplace, force de 104
 ligne d'univers 355
 logarithme 323
 Lorentz, force de 104
- M**
- marées 289
 Maupertuis 84
 méthode
 coefficients indéterminés 340
 variables séparables 341
 variation des constantes 340, 344
 moment
 cinétique 237, 242
 d'inertie 243
 d'une force 238, 240
 mouvement
 caractéristique du 50, 60
 circulaire 68, 75, 266, 361
 périodique *voir* oscillateur
- N**
- nabla 151, 333
 neutrino 106
 neutron 18, 28
 Newton, lois de 110, 257
 Noether, théorème de 139
 noyau 28, 32
- O**
- orbite 273, 276
 oscillateur harmonique 172
 amorti 180
 forcé 188
 libre 55, 174
- P**
- parabole 64, 274, 364
 Pauli 237
 pendule 202, 251, 320
 pente 48, 356
 période 55, 69, 171, 355
 PFDC. *voir* principe de la dynamique
 phase 176, 346
 photon 238
 planète 34, 37
 Planck, constante de 20
 poids 100
 Poisson, équation de 374
 polynôme caractéristique 124, 339, 343
 potentiel
 électrique 260, 374
 gravitationnel 260, 373
 principe (de)
 Einstein 19
 équivalence 259
 Fermat 84
 indiscernabilité 134
 inertie 110
 l'action-réaction 112
 la dynamique (PFDC) 111
 Maupertuis 84
 moindre action 84, 147
 Pauli 237
 relativité 114
 produit
 scalaire 330
 vectoriel 57, 330
 projectile *voir* balistique

proton 18, 28, 33
 pseudo-pulsation 186
 pseudopériode 186
 puissance 144
 pulsation 171, 189, 191, 346

Q

quantité de mouvement *voir* impulsion
 quasi-isolé 210

R

rayon de courbure 61
 référentiel 45, 113, 218, 258, 295
 réflexion, loi de la 84
 réfraction, loi de la 85
 régime
 critique 185
 faiblement amorti 187
 libre 174
 permanent 191
 pseudopériodique 186
 surcritique (apériodique) 182
 transitoire 191
 repos 110
 résonance 188, 191, 197
 ressort 107
 rotation 237, 243, 247
 de la Terre 309, 314
 rotationnel 153, 335, 349
 rupture 198

S

satellite 266, 276, 288
 sinus 324
 sonde 261
 spin 237
 stabilité, critères 155
 système de coordonnées
 cartésiennes 45, 72
 cylindriques 79
 polaires 70
 sphériques 81
 système
 isolé 110, 210
 quasi-isolé 210

T

tangente 48, 325, 356

Taylor, développements de 331

temps

 caractéristique 125, 185–187, 212
 homogénéité du 139
 mesure du 171

théorème

 de l'énergie cinétique 145
 de l'énergie mécanique 157
 de Noether 139
 du moment cinétique 242

travail 140, 143

trou noir 266, 287

U

univers 38, 41
 expansion de l' 38, 264
 ligne d' 355

V

variables séparables (méthode) ... 341
 variation des constantes 340, 344
 vecteur 45, 330
 rotation 69
 unitaire binormal 77
 unitaire normal 77
 unitaire tangent 56, 77
 vibrations 188
 vitesse

 angulaire 68
 aréolaire 283
 célérité 356
 d'entraînement 298
 d'un satellite 247
 de libération 261, 262
 de satellisation 268
 instantanée 47, 59
 loi de composition ... 68, 218, 298
 moyenne 47, 59
 polaire 76
 relative 67

Y

Yukawa, potentiel de 105

Table des matières

Avant-propos	5
1 Physique et mécanique, analyse dimensionnelle et ordres de grandeur	13
1.1 Introduction	15
1.1.1 Physique et démarche scientifique	15
1.1.2 Les mécaniques	15
1.2 Un aperçu de physique fondamentale	16
1.3 Analyse dimensionnelle, ordres de grandeur	20
1.3.1 Unités, dimensions et présentation des résultats	20
1.3.2 Angle : dimension et unités	25
1.3.3 Exercice de cours C1.3 – Forces, énergies, actions	26
1.3.4 Exercice de cours C1.4 – Atomes et noyaux	27
1.3.5 Exercice de cours C1.5 – Planètes et étoiles	34
1.3.6 Exercice de cours C1.6 – Galaxies et Univers	38
1.4 Conclusion / À retenir	42
2 Cinématique	43
2.1 Introduction	45
2.2 Cinématique à une dimension	47
2.2.1 Position et vitesses	47
2.2.2 Accélérations	50
2.2.3 Exercices de cours – Équations horaires	51
2.2.4 Oscillateur harmonique	55
2.2.5 Abscisse curviligne et vecteur déplacement différentiel élémentaire	56
2.3 Cinématique 2d et 3d	57
2.3.1 Opérations sur les vecteurs	57
2.3.2 Vitesses et accélérations	59
2.3.3 Balistique sans frottements	62
2.3.4 Notion de vitesse relative	67
2.3.5 Mouvement circulaire	68
2.3.6 Système de coordonnées polaires	70
2.3.7 Base de Frenet	77
2.3.8 Système de coordonnées cylindriques (3d)	79
2.3.9 Système de coordonnées sphériques (3d)	81
2.4 Principe de Fermat et lois de Descartes	84
2.5 Exercices	89

2.5.1	Cinématique 1d	89
2.5.2	Cinématique 2d et 3d	92
3	Dynamique - Forces et lois de Newton	97
3.1	Forces	99
3.1.1	Interactions fondamentales et forces à distance	100
3.1.2	Forces de contact normales	106
3.1.3	Forces de contact tangentielles	107
3.2	Lois de Newton	110
3.2.1	Les lois de Newton	110
3.2.2	Référentiels	113
3.2.3	Applications des lois de Newton – Exercices de cours	115
3.3	Exercices	130
3.3.1	Bilan des forces, PFDC avec forces constantes	130
3.3.2	Forces variables et équations différentielles	133
4	Énergie et loi de conservation 1	137
4.1	Introduction	139
4.2	Travail et énergie cinétique	140
4.2.1	Travail	140
4.2.2	Énergie cinétique et théorème de l'énergie cinétique	144
4.3	Énergie potentielle, forces conservatives et conservation de l'énergie	145
4.3.1	Définition de l'énergie potentielle	145
4.3.2	Exemples d'énergies potentielles	147
4.3.3	Forces conservatives	151
4.3.4	Conservation de l'énergie mécanique	153
4.3.5	Critères d'équilibre et de stabilité	155
4.4	Forces non-conservatives	157
4.5	Équation de la dynamique	159
4.6	Formulations de la physique moderne	160
4.7	Exercices	162
5	Oscillateurs et mouvements périodiques	169
5.1	Introduction et mesure du temps	171
5.2	Oscillateur harmonique simple : régime libre	174
5.3	Oscillateur harmonique amorti	180
5.4	Oscillateur harmonique forcé : résonance	188
5.5	Exercices	201
6	Impulsion et loi de conservation 2	207
6.1	Introduction	209
6.2	Chocs	211
6.3	Conservation de l'impulsion	214
6.4	Centre de masse	216
6.4.1	Définition du centre de masse	216
6.4.2	Référentiel du centre de masse	218
6.5	Collisions	219
6.5.1	Collisions inélastiques : $Q = -\Delta T$	219

6.5.2	Collisions élastiques	220
6.6	Exercices	230
7	Rotation, moment cinétique et loi de conservation 3	235
7.1	Introduction	237
7.2	Moment d'une force	238
7.2.1	Intuition et définition	238
7.2.2	Propriétés du moment d'une force	240
7.2.3	C7.1 – Couple de forces et équilibre	241
7.3	Moment cinétique	242
7.3.1	Définition	242
7.3.2	Théorème du moment cinétique	242
7.3.3	Conservation du moment cinétique	243
7.3.4	Liens translation \longleftrightarrow rotation, moment d'inertie	243
7.3.5	C7.2 – Rotation du patineur	244
7.4	Applications	245
7.4.1	Loi des aires (2 ^{nde} loi de Kepler)	245
7.4.2	Mouvement sur une ellipse	247
7.5	Formulations mathématiques des rotations	247
7.6	Exercices	250
8	Gravitation	255
8.1	Introduction	257
8.1.1	Définition	257
8.1.2	Complications	257
8.2	Énergie potentielle et applications	259
8.2.1	Énergie potentielle gravitationnelle	259
8.2.2	Potentiel gravitationnel et champ gravitationnel	260
8.2.3	Vitesse de libération, états libres et états liés	261
8.2.4	Expansion de l'Univers	264
8.2.5	Trous noirs	266
8.3	Mouvements avec une force en $1/r^2$	266
8.3.1	C8.3 – Satellite en mouvement circulaire	266
8.3.2	Conservation de l'énergie et du moment cinétique	268
8.3.3	Étude de l'énergie potentielle effective U^{eff}	270
8.3.4	Mise en orbite d'un satellite	276
8.3.5	Dépendance temporelle et troisième loi de Kepler	283
8.3.6	Équation polaire de la trajectoire	285
8.4	Exercices	287
9	Forces d'inertie et changement de référentiel	293
9.1	Introduction	295
9.2	Cinématique	296
9.2.1	Positions et notations	296
9.2.2	Vitesses	297
9.2.3	Accélération	299
9.3	Dynamique	301
9.3.1	Translation rectiligne non uniforme	301

9.3.2	Cas général	303
9.4	Applications liées à la rotation de la Terre	309
9.4.1	C9.3 – g et la rotation de la Terre	309
9.4.2	C9.4 – Force de Coriolis et rotation de la Terre	314
9.5	Exercices	320
ANNEXES		323
A	Formulaire mathématique	323
A.1	Fonctions usuelles	323
A.1.1	Puissances, racines et équation du second degré	323
A.1.2	Exponentielle et logarithme népérien	323
A.1.3	Fonctions trigonométriques	324
A.2	Nombres complexes	326
A.3	Dérivées, différentielles et intégrales	327
A.3.1	Dérivées et différentielles	327
A.3.2	Intégrales	328
A.4	Vecteurs	330
A.5	Développements limités	331
A.6	Différentielles, opérateurs différentiels	332
A.6.1	Différentielles des fonctions à plusieurs variables	332
A.6.2	Opérateurs différentiels	333
B	Équations différentielles	337
B.1	Définitions	337
B.2	Équations différentielles du premier ordre	338
B.2.1	Méthode générale	338
B.2.2	Exemples	340
B.2.3	Méthode des variables séparables	341
B.3	Équations différentielles du second ordre	343
B.3.1	Solution homogène	343
B.3.2	Solution particulière	348
B.3.3	Équations différentielles couplées	348
C	Comment savoir si une force est conservative ? Rotationnel, potentiel et circulations	349
D	Diagramme d'espace-temps : effet Doppler	355
E	Coniques	361
F	Gravitation pour une sphère homogène	367
	Index	375
	Table des matières	379

Réalisation de la couverture Valérie Julia – PUP – Aix-en-Provence
Mise en page Jean-Marc Virey – Marseille

Imprimé en France
Imprimerie France Quercy – Mercuès

Dépôt légal 3^e trimestre 2015

ISBN 978-2-85399-984-7

ISSN en cours