

PHYSIQUE

MP-MP*

TOUT-EN-UN

Sous la direction de BERNARD SALAMITO

MARIE-NOËLLE SANZ | FRANÇOIS VANDENBROUCK | MARC TULOUP

PHYSIQUE

MP-MP*

TOUT-EN-UN

4^e édition

DUNOD

l'intégrale

Conception et création de couverture : Hokus Pokus Créations

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, 2020

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081184-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), 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 ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Avant propos

Ce livre contient un cours entièrement conforme au programme officiel des classes MP/MP* et rédigé avec le souci de le rendre aussi facile à lire que possible. Quelques paragraphes, intitulés « complément », proposent des développements en dehors du programme.

Dans la partie cours, des encadrés gris rassemblent tout ce qu'il faut retenir. Ils facilitent le travail de révision.

En fin de chaque chapitre, une synthèse récapitule les savoirs et savoir-faire à acquérir et liste les mots clés à maîtriser.

Les exercices sont regroupés en deux catégories : dans la rubrique *s'entraîner* des exercices d'application directe du cours et dans la rubrique *approfondir* des exercices demandant plus de réflexion dont certains proviennent d'épreuves de concours récentes. Des solutions complètes sont proposées.

Un appendice est consacré aux méthodes mathématiques qui sont nouvelles dans le cours de deuxième année.

Table des matières

I Mécanique	19
1 Changements de référentiels en mécanique classique	21
1 Exemples	21
1.1 Cas de deux référentiels en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre	21
1.2 Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un autre référentiel	22
1.3 Conclusion	22
2 Référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel	23
2.1 Transformation de Galilée	23
2.2 Composition des vitesses	24
3 Référentiel en translation par rapport à un autre référentiel	25
3.1 Présentation de la situation	25
3.2 Composition des vitesses	26
3.3 Composition des accélérations	26
4 Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un autre référentiel	27
4.1 Présentation de la situation	27
4.2 Composition des vitesses	29
4.3 Composition des accélérations	30
5 Notion de point coïncident	32
5.1 Point coïncident	32
5.2 Lien avec la vitesse et l'accélération d'entraînement	33
6 Complément : cinématique classique et relativiste	34

TABLE DES MATIÈRES

- 2 Dynamique dans un référentiel non galiléen** **45**
- 1 Référentiels galiléens 45
- 2 Référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen . . . 46
 - 2.1 Principe fondamental de la dynamique dans un référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen 46
 - 2.2 Autres lois de la dynamique dans un référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen 47
 - 2.3 Exemples d'études dans un référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen 49
 - 2.4 Cas d'un référentiel en translation rectiligne uniformément accélérée par rapport à un référentiel galiléen 53
- 3 Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen 54
 - 3.1 Principe fondamental de la dynamique dans un référentiel en rotation autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen 54
 - 3.2 Forces d'inertie 55
 - 3.3 Autres lois de la dynamique dans un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen 56
 - 3.4 Énergie potentielle associée à la force d'inertie d'entraînement 57
 - 3.5 Exemples d'études dans un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen 58
- 4 Les différents référentiels classiques de la mécanique et la question de leur caractère galiléen 63
 - 4.1 Critère pour déterminer si un référentiel est galiléen ou non 63
 - 4.2 Le référentiel terrestre 63
 - 4.3 Le référentiel géocentrique 64
 - 4.4 Le référentiel de Copernic 67
- 3 Lois du frottement solide** **85**
- 1 Observations expérimentales 85
 - 1.1 Dispositif 85
 - 1.2 Première expérience 85
 - 1.3 Deuxième expérience 86
- 2 Lois de Coulomb pour le frottement de glissement 86
 - 2.1 Composantes normale et tangentielle 86
 - 2.2 Glissement, non glissement 87
 - 2.3 Loi de Coulomb pour la composante normale 88
 - 2.4 Loi de Coulomb pour la composante tangentielle dans le cas du non-glissement 88

2.5	Loi de Coulomb pour la composante tangentielle dans le cas du glissement	89
2.6	Les coefficients de frottement	89
2.7	Cas d'un contact sans frottement	90
3	Méthode de résolution d'un problème avec frottement solide	90
4	Interprétations des observations expérimentales	91
4.1	Notations et mise en équation générale	91
4.2	Interprétation de la première expérience	91
4.3	Interprétation de la deuxième expérience	93
5	Aspect énergétique	94
5.1	Cas d'un freinage par frottement	94
5.2	Cas d'une mise en mouvement par frottement	94
5.3	Puissance totale des forces de contact entre deux solides	95

II Éléments de traitement du signal 113

4 Signaux périodiques, filtrage 115

1	Signaux périodiques non sinusoïdaux	115
1.1	Spectre d'un signal périodique	115
1.2	Signification physique	116
2	Action d'un filtre sur un signal périodique non sinusoïdal	120
2.1	Filtres	120
2.2	Effet d'un filtre sur un signal sinusoïdal	122
2.3	Effet d'un filtre sur un signal périodique de forme quelconque	122
2.4	Diagramme de Bode et type du filtre	123
2.5	Composition spectrale du signal de sortie	125
2.6	Caractère intégrateur ou dérivateur du filtre	125
3	Exemples de filtrage de signaux périodiques non sinusoïdaux	127
3.1	Filtrage d'un créneau par un filtre passe-bas du premier ordre	127
3.2	Filtrage d'un signal triangulaire par un filtre passe-haut du premier ordre	130
3.3	Filtrage par un filtre passe-bande du deuxième ordre	133
4	Génération d'harmoniques due à une non-linéarité	136
4.1	Premier exemple : redressement d'une tension sinusoïdale	136
4.2	Deuxième exemple : écrêtage d'un signal	138
4.3	Conclusion	139

TABLE DES MATIÈRES

5	Électronique numérique	159
1	Échantillonnage	159
1.1	Acquisition, échantillonnage	159
1.2	Spectre d'un signal échantillonné	160
1.3	Critère de Nyquist-Shannon	163
1.4	Pratique de l'analyse spectrale	166
1.5	Complément théorique	170
2	Filtrage numérique	173
2.1	Filtre passe-bas du premier ordre	173
2.2	Filtres passe-bas du deuxième ordre	177
2.3	Génération d'un signal analogique à partir d'un signal numérique	178
III	Optique	185
6	Modèle scalaire des ondes lumineuses	187
1	Le modèle scalaire de la lumière	187
1.1	Nature de l'onde lumineuse	187
1.2	La vibration lumineuse	188
1.3	Éclairement et intensité vibratoire	189
2	Lumière monochromatique	191
2.1	Définition	191
2.2	Domaine visible	192
2.3	Notation complexe	192
2.4	Expression de l'éclairement	192
3	Chemin optique	193
3.1	Définition	193
3.2	Calcul pratique du chemin optique	193
3.3	Chemin optique et retard de phase	194
3.4	Surface d'onde	195
3.5	Théorème de Malus	196
3.6	Égalité des chemins optiques entre points conjugués	196
4	Onde sphérique, onde plane	197
4.1	Onde sphérique	197
4.2	Onde plane	198
4.3	Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss	200
5	Lumières réelles	202
5.1	Composition spectrale	202

5.2	Sources de lumière blanche	203
5.3	Lampes spectrales	203
5.4	Faisceaux lasers	204
6	Trains d'ondes	204
6.1	La largeur des raies spectrales	204
6.2	Interprétation	205
6.3	Longueur de cohérence	206
6.4	Modèle des trains d'ondes aléatoires	207
7	Interférences de 2 ondes lumineuses	219
1	Interférences lumineuses	219
2	Intensité vibratoire résultante	220
2.1	Terme d'interférences	220
2.2	Notion d'ondes cohérentes	221
3	Formule de Fresnel	222
3.1	Énoncé	222
3.2	Interprétation physique	223
3.3	Ordre d'interférences	224
3.4	Différence de marche	224
4	Figure d'interférences	225
4.1	Champ d'interférences	225
4.2	Franges d'interférences	225
4.3	Contraste	226
5	Retour sur la notion de cohérence	228
5.1	Cas de deux sources distinctes	228
5.2	Cas de deux sources mutuellement cohérentes	228
8	Dispositif interférentiel par division du front d'onde : les trous d'Young	233
1	Le dispositif des trous d'Young	233
1.1	Présentation du dispositif	233
1.2	Notion de dispositif interférentiel à division du front d'onde	234
1.3	Description du champ d'interférences	236
1.4	Montage de Fraunhofer	240
2	Influence de l'extension spatiale de la source principale	243
2.1	Variation de l'ordre d'interférence due à un déplacement de la source primaire	243
2.2	Utilisation d'une fente source	245

TABLE DES MATIÈRES

2.3	Visibilité des franges produites par deux sources ponctuelles incohérentes	245
2.4	Visibilité des franges produites par une source étendue	248
3	Influence de la largeur spectrale de la source	250
3.1	Doublet de longueurs d'onde	250
3.2	Source de faible largeur spectrale	252
3.3	Éclairage en lumière blanche	253
4	Complément : déplacement des franges par variation de l'ordre d'interférence	255
4.1	Effet d'une lame à faces parallèles	255
4.2	L'interféromètre de Rayleigh	256
9	L'interféromètre de Michelson	269
1	L'interféromètre de Michelson	269
1.1	Présentation du dispositif	269
1.2	Les deux voies de l'interféromètre	270
1.3	Le dispositif séparateur	270
1.4	Modélisation de l'interféromètre	272
1.5	Flux lumineux dans l'interféromètre	273
2	Interféromètre de Michelson en « lame d'air » éclairé par une source étendue	274
2.1	Configuration de la « lame d'air »	274
2.2	Notion de division d'amplitude	274
2.3	Localisation des interférences dans le cas d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air	275
2.4	Étude des franges	276
2.5	Applications	281
3	Interféromètre de Michelson en « coin d'air » éclairé par une source étendue	285
3.1	Configuration du « coin d'air »	285
3.2	Localisation des franges dans le cas d'un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air	285
3.3	Étude des franges	286
3.4	Application : détection des défauts d'une lame de verre	289
10	Interférences de N ondes cohérentes	305
1	Superposition de N ondes lumineuses	305
1.1	Expression de la vibration lumineuse résultante	305
1.2	Intensité vibratoire résultante	306
1.3	Maxima principaux d'intensité	308
1.4	Interprétation à l'aide de la représentation de Fresnel	309

2	Réseaux de diffraction	311
2.1	Définition	311
2.2	Diffraction par un réseau	312
2.3	Formule fondamentale des réseaux	312
2.4	Principe du spectromètre à réseau	315

IV Électromagnétisme 327

11	Champ électrostatique	329
1	Charge électrique	329
1.1	Rappels	329
1.2	Charges ponctuelles	329
1.3	Distributions continues de charges	330
2	Champ créé par une charge ponctuelle	332
2.1	Loi de Coulomb	332
2.2	Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle	333
3	Champ créé par une distribution de charges	334
3.1	Principe de superposition	334
3.2	Champ créé par une distribution discrète de charges ponctuelles	334
3.3	Champ créé par une distribution continue de charges	335
4	Propriétés de symétrie	336
4.1	Symétries usuelles des distributions de charges	336
4.2	Symétries du champ	339
5	Circulation du champ électrostatique, potentiel électrostatique	343
5.1	Circulation d'un champ de vecteurs	344
5.2	Potentiel électrostatique	345
5.3	Lien entre le champ et le potentiel électrostatiques	346
5.4	Propriétés de symétrie du potentiel	347
5.5	Énergie potentielle d'une charge placée dans un champ extérieur	348
6	Flux du champ électrostatique - Théorème de Gauss	348
6.1	Flux d'un champ de vecteurs	348
6.2	Théorème de Gauss	350
7	Topographie du champ électrostatique	350
7.1	Lignes de champ et équipotentiels	350
7.2	Propriétés des lignes de champ électrostatique et des équipotentiels	351
7.3	Quelques exemples	354
8	Analogie avec le champ gravitationnel	357

TABLE DES MATIÈRES

8.1	Interaction gravitationnelle	357
8.2	Champ gravitationnel	357
8.3	Propriétés du champ gravitationnel	358
12	Exemples de champs électrostatiques	375
1	Méthodes d'étude des champs et des potentiels	375
2	Exemple de problème à symétrie sphérique : sphère uniformément chargée.	376
2.1	Étude des symétries	376
2.2	Application du théorème de Gauss	377
2.3	Champ et potentiel créés par la sphère.	378
3	Exemple de problème à symétrie cylindrique : cylindre uniformément chargé	380
3.1	Étude des symétries	380
3.2	Application du théorème de Gauss	380
3.3	Champ et potentiel électrostatiques créés par le cylindre	381
4	Exemples de problèmes à symétrie plane	382
4.1	Étude des symétries	382
4.2	Calcul du champ par le théorème de Gauss	383
4.3	Expression du potentiel	384
4.4	Modélisation surfacique	385
4.5	Application au condensateur plan	386
13	Dipôle électrostatique	407
1	Potentiel et champ créés	407
1.1	Introduction	407
1.2	Dipôle électrostatique, approximation dipolaire	407
1.3	Moment dipolaire	408
1.4	Analyse des symétries et des invariances	408
1.5	Potentiel créé par un dipôle électrostatique	409
1.6	Champ créé par un dipôle électrostatique	410
1.7	Topographie du champ	411
1.8	Application aux molécules polaires	412
2	Action d'un champ extérieur sur un dipôle	412
2.1	Cas d'un champ uniforme	412
2.2	Cas d'un champ non uniforme	414
2.3	Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique extérieur	416

14	Champ magnétostatique	427
1	Courant électrique	427
1.1	Vecteur densité de courant	427
1.2	Intensité traversant une surface orientée	429
1.3	Distributions filiformes	429
2	Propriétés globales du champ magnétostatique	429
2.1	Flux du champ magnétostatique	429
2.2	Circulation du champ magnétostatique - Théorème d' Ampère	430
3	Symétries et invariances du champ magnétique	431
3.1	Symétries et invariances usuelles des distributions de courants	431
3.2	Symétries du champ magnétique	433
4	Topographie du champ magnétostatique	437
4.1	Propriétés des lignes de champ du champ magnétostatique	437
4.2	Comment distinguer une carte de champ électrostatique d'une carte de champ magnétostatique ?	438
4.3	Exemples	438
5	Exemples de calculs de champ magnétostatique	440
5.1	Comment appliquer le théorème d' Ampère ?	440
5.2	Exemple de problème à symétrie cylindrique : fil infini, de rayon a , parcouru par un courant uniformément réparti en volume	440
5.3	Solénoïde long	443
15	Dipôle magnétique	463
1	Moments magnétiques	463
1.1	Notion de moment magnétique	463
1.2	Ordres de grandeur	464
2	Champ créé par un dipôle magnétique	465
2.1	Approximation dipolaire	465
2.2	Champ magnétique créé par le dipôle	466
3	Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique	467
3.1	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique uniforme	467
3.2	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique non uniforme	468
3.3	Approche documentaire : l'expérience Stern et Gerlach	468
16	Équations de Maxwell	483
1	La loi de la conservation de la charge électrique	483
1.1	Cas unidimensionnel	483
1.2	Cas général	484

TABLE DES MATIÈRES

2	Champ électromagnétique - Équations de Maxwell	485
2.1	Définition du champ électromagnétique	485
2.2	Équations de Maxwell	485
2.3	Remarques et commentaires	486
2.4	Compatibilité des équations de Maxwell avec la loi de conservation de la charge	487
3	Forme intégrale des équations de Maxwell	487
3.1	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Gauss : théorème de Gauss	488
3.2	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-flux	488
3.3	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday : loi de Faraday .	488
3.4	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Ampère : théorème d'Am- père généralisé	490
4	Équation de propagation des champs dans un milieu vide de charge et de courant	491
4.1	Couplage spatio-temporel entre le champ électrique et le champ ma- gnétique	491
4.2	Démonstration de l'équation de propagation	491
4.3	Nature de l'onde lumineuse	492
5	Champs statiques	493
5.1	Équations de Maxwell en régime stationnaires	493
5.2	Théorème de Gauss et théorème d'Ampère	493
5.3	Existence d'un potentiel électrostatique	493
5.4	Équation de Poisson et équation de Laplace de l'électrostatique . . .	494
6	Approche numérique : résolution de l'équation de Laplace	494
6.1	Méthodes de résolution numérique	494
6.2	Premier exemple : condensateur plan fini	495
6.3	Deuxième exemple : capteur capacitif	497
17	Énergie du champ électromagnétique	517
1	Interaction entre le champ électromagnétique et la matière	517
1.1	Densité volumique de force électromagnétique	517
1.2	Puissance volumique	518
1.3	Cas d'un conducteur ohmique	519
2	Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting	520
2.1	Définitions	520
2.2	Expressions	520
2.3	Quelques ordres de grandeur	521
3	Bilan d'énergie électromagnétique	522

3.1	Bilan global	522
3.2	Équation locale de Poynting	523
3.3	Complément : justification des expressions de la densité volumique d'énergie et du vecteur de Poynting	523
4	Exemples	524
4.1	Régime stationnaire	524
4.2	Solénoïde en régime variable	528
18	Propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide	541
1	Équation de d'Alembert	541
1.1	Définition	541
1.2	Solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle	542
1.3	Complément : démonstration de la solution	543
2	Onde électromagnétique plane progressive dans le vide	544
2.1	Définition d'une onde plane progressive (OPP)	544
2.2	Structure de l'OPP électromagnétique dans le vide	545
2.3	Lien du modèle de l'OPP électromagnétique avec la réalité	546
3	Onde électromagnétique plane progressive et monochromatique dans le vide .	547
3.1	Définition d'une onde plane progressive et monochromatique (OPPM)	547
3.2	Expression générale d'une OPPM et notation complexe	548
3.3	Lien du modèle de l'OPPM électromagnétique avec la réalité	549
3.4	Spectre électromagnétique	549
4	Polarisation rectiligne	551
5	Étude énergétique des OPP électromagnétiques	553
5.1	Expressions des grandeurs énergétiques	553
5.2	Cas des OPPM électromagnétiques, valeurs moyennes	554
6	Utilisation de la notation complexe des OPPM	555
6.1	Choix d'une convention de notation complexe	555
6.2	Dérivation et notation complexe	555
6.3	Équations de Maxwell en représentation complexe	556
6.4	Grandeurs énergétiques en notation complexe	556
6.5	Application à une OPPM électromagnétique se propageant dans le vide	557
7	Approche expérimentale : polarisation rectiligne de la lumière	558
7.1	Lumière naturelle	558
7.2	Le polariseur (ou polaroïd)	558
7.3	Production de lumière polarisée rectilignement	558
7.4	Loi de Malus	559

TABLE DES MATIÈRES

19 Propagation d'ondes électromagnétiques dans un plasma, dispersion	573
1 Onde électromagnétique plane progressive dans un plasma	573
1.1 Interaction entre une OPPM et un plasma	573
1.2 Relation de dispersion du plasma	575
1.3 Vitesse de phase, dispersion	576
1.4 Complément : étude du cas où $\omega > \omega_p$	578
1.5 Complément : étude du cas où $\omega < \omega_p$	579
1.6 Approche documentaire : ionosphère et télécommunications	580
2 Propagation d'un paquet d'ondes	585
2.1 Le modèle du paquet d'ondes	585
2.2 Étude de deux exemples	586
2.3 Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif	589
2.4 Complément : étude théorique de l'évolution du paquet d'ondes	590
2.5 Retour sur la propagation dans un plasma	592
20 Onde électromagnétique dans un conducteur, réflexion	605
1 Propagation d'une onde électromagnétique dans un conducteur	605
1.1 Conductivité d'un métal en régime variable	605
1.2 Relation de dispersion d'un conducteur ohmique	607
1.3 Cas des basses fréquences, effet de peau	609
2 Réflexion d'une OPPM électromagnétique sur un conducteur parfait	614
2.1 Le modèle du conducteur parfait	614
2.2 Réflexion d'une OPPM en incidence normale sur un conducteur	617
2.3 Onde électromagnétique stationnaire	622
2.4 Onde électromagnétique dans une cavité	626
21 Rayonnement dipolaire électrique	645
1 Dipôle électrique oscillant	645
1.1 Moment dipolaire électrique	645
1.2 Définition d'un dipôle électrique oscillant	646
2 Champ électromagnétique créé par un dipôle oscillant	646
2.1 Étude des symétries	647
2.2 Zone de rayonnement	648
2.3 Champ électromagnétique dans la zone de rayonnement	648
2.4 Anisotropie du rayonnement	650
2.5 Affaiblissement de l'onde avec la distance	651
2.6 Puissance totale rayonnée	654
3 Approche documentaire : diffusion Rayleigh	654

3.1	Couleur du ciel	654
3.2	Polarisation par diffusion Rayleigh	655
V	Thermodynamique	671
22	Systèmes ouverts en régime stationnaire	673
1	Énergie et entropie d'un système	673
1.1	Équilibre thermodynamique et équilibre thermodynamique local . . .	673
1.2	Énergie d'un système thermodynamique	675
1.3	Entropie d'un système thermodynamique	676
2	Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé	677
2.1	Le premier principe	677
2.2	Le second principe	683
3	Principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire	688
3.1	Système ouvert	688
3.2	Bilan d'une grandeur extensive Y en régime stationnaire	689
3.3	Premier principe pour un système ouvert en régime stationnaire . . .	690
3.4	Second principe pour un système ouvert en régime stationnaire	694
3.5	Premier et second principes pour un système ouvert sous forme infinitésimale	695
4	Diagramme $(\ln P, h)$ d'un fluide	696
4.1	Principe d'un diagramme thermodynamique	696
4.2	Zone d'équilibre entre le liquide et le gaz et courbe isotitre	697
4.3	Le diagramme $(\ln P, h)$ ou diagramme des frigoristes	698
4.4	Application des deux principes à l'aide du diagramme	701
5	Exemples d'application des principes de la thermodynamique pour un système ouvert	702
5.1	Application 1 : étude du circuit d'eau d'une centrale électrique thermique	702
5.2	Application 2 : étude d'une machine frigorifique	709
23	Transferts thermiques	741
1	Les trois modes de transfert thermique	741
1.1	Transfert thermique conductif	741
1.2	Transfert thermique convectif	742
1.3	Transfert thermique radiatif	742
2	Le courant thermique	744
2.1	Vecteur densité de courant thermique	744

TABLE DES MATIÈRES

2.2	Flux thermique	745
3	Loi de Fourier - Conductivité thermique	745
3.1	Loi phénoménologique de Fourier	745
3.2	Limites de validité de la loi de Fourier	746
3.3	Ordre de grandeur des conductivités thermiques	746
4	Équation locale de bilan thermique	747
4.1	Bilan thermique local à une dimension	747
4.2	Bilan thermique local en symétrie cylindrique	749
4.3	Bilan thermique local en symétrie sphérique	750
4.4	Complément : équation locale de bilan thermique	752
5	Équation de la diffusion thermique	753
5.1	Diffusion thermique en l'absence de sources	753
5.2	Diffusion thermique en présence de sources	757
5.3	Conditions aux limites pour le champ de température	758
5.4	Champ de température en régime stationnaire	760
5.5	Approche numérique : exemples de résolution de l'équation de diffusion thermique	763
6	Résistance thermique	766
6.1	Définition	766
6.2	Résistance thermique dans le cas d'un transfert unidimensionnel	768
6.3	Résistance thermique en géométries cylindrique et sphérique	769
6.4	Lois d'association des résistances thermiques	771
6.5	Résistance thermique d'une interface solide-fluide	773
6.6	Cas du régime lentement variable	774
7	Comment déterminer expérimentalement une conductivité thermique ?	774
7.1	Mesure de conductivité thermique	774
7.2	Mesure de résistance thermique	776
8	Complément : irréversibilité du phénomène de conduction thermique	778
8.1	Irréversibilité	778
8.2	Production d'entropie	778

VI Physique quantique 803

24 Introduction à la mécanique quantique 805

1	Ondes ou particules ?	805
1.1	La vision classique de matière et du rayonnement	805
1.2	Interférences lumineuses avec des photons uniques	806

1.3	Interférences avec des ondes de matière	809
1.4	Principe de complémentarité de Bohr	810
2	La fonction d'onde	811
2.1	Description de l'état d'une particule	811
2.2	Fonction d'onde à 1 dimension	811
2.3	Condition de normalisation	812
2.4	Interprétation physique de la densité de probabilité	812
3	L'équation de Schrödinger	813
3.1	Énoncé	813
3.2	Principe de superposition	814
4	États stationnaires, équation de Schrödinger indépendante du temps	815
4.1	États stationnaires	815
4.2	Équation de Schrödinger indépendante du temps	816
4.3	Fonction d'onde propre $\varphi(x)$	817
4.4	Relation de Planck pour l'énergie	818
5	Principe d'indétermination de Heisenberg	818
5.1	Indétermination quantique	819
5.2	Inégalité de Heisenberg	819
6	États non stationnaires d'une particule quantique	820
6.1	Superposition de deux états stationnaires	820
6.2	Relation temps-énergie de Heisenberg	821
25	Particule quantique dans un puits infini	833
1	Puits de potentiel infiniment profond	833
2	États stationnaires dans un puits infini	834
2.1	Fonctions d'onde propres	834
2.2	Niveaux d'énergie	836
2.3	Densité de probabilité de présence	837
2.4	Analogie avec une corde vibrante	838
3	Énergie cinétique de confinement	840
3.1	Définition	840
3.2	Exemples	841
3.3	Application : ordre de grandeur de l'énergie de l'état fondamental dans un puits de potentiel	841
4	États non stationnaires dans un puits infini d'une particule quantique	842
4.1	Exemple d'état non stationnaire	842
4.2	Complément : solution générale de l'équation de Schrödinger pour une particule dans un puits infini	843

TABLE DES MATIÈRES

26	Particule quantique libre	859
1	Introduction	859
2	États stationnaires d'une particule quantique libre	859
3	Ondes de De Broglie	861
3.1	Définition	861
3.2	Relation de dispersion et vitesse de phase dans le cas de la particule libre	861
3.3	Relation de Planck pour la quantité de mouvement	861
3.4	Quel sens physique associer à une onde de De Broglie ?	862
4	Paquet d'ondes quantique	863
4.1	Étude d'un exemple	863
4.2	Généralisation	866
4.3	Relation position-vitesse de Heisenberg	866
4.4	Relation temps-énergie de Heisenberg	867
5	Vecteur densité de courant de probabilité	869
5.1	Définition	869
5.2	Expression pour un paquet d'onde quasi-monochromatique	869
5.3	Expression pour une onde de De Broglie	869
5.4	Cas d'un faisceau de particules	870
27	Particule quantique soumise à un potentiel constant par morceaux	873
1	Marche de potentiel	874
1.1	Introduction	874
1.2	Continuité de la fonction d'onde	875
1.3	Premier cas : $E > V_0$	875
1.4	Second cas : $E < V_0$	879
2	Barrière de potentiel et effet tunnel	882
2.1	Expression de la fonction d'onde	883
2.2	Probabilités de réflexion et de transmission. Effet tunnel	884
2.3	Représentation de la densité de probabilité de présence	886
2.4	Approximation d'une barrière épaisse	886
2.5	Variation du facteur de transmission tunnel	887
2.6	Complément : interprétation qualitative de l'effet tunnel	888
3	Applications de l'effet tunnel	889
3.1	Approche documentaire 1 : le microscope à effet tunnel	889
3.2	Approche documentaire 2 : la radioactivité α	893

VII Thermodynamique statistique 917**28 Éléments de thermodynamique statistique 919**

1	Monde microscopique, monde macroscopique	919
1.1	Ordres de grandeur moléculaires	919
1.2	Mouvements moléculaires	921
1.3	Échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique	922
2	Objet de la thermodynamique statistique	923
2.1	Système thermodynamique	923
2.2	Macro-état et micro-état	923
2.3	Système à l'équilibre thermodynamique	924
2.4	Probabilité d'un micro-état	924
2.5	Valeurs moyennes et fluctuations	925
3	Facteur de Boltzmann	925
3.1	Pression dans une atmosphère isotherme	925
3.2	Poids de Boltzmann pour une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat	931
4	Systèmes à spectre discret d'énergie	932
4.1	Probabilité d'occupation d'un état quantique donné par une particule donnée	932
4.2	Énergie moyenne	933
4.3	Système à deux niveaux d'énergie non dégénérés	935
5	Capacités thermiques classiques des gaz et des solides	939
5.1	Théorème d'équirépartition de l'énergie	939
5.2	Théorie classique de la capacité thermique des gaz parfaits	942
5.3	Amélioration du modèle du gaz parfait diatomique	944
5.4	Capacité thermique à volume constant d'un solide	947

VIII Appendice 977**A Outils mathématiques 979**

1	Analyse vectorielle	979
1.1	Gradient d'un champ scalaire	979
1.2	Divergence d'un champ de vecteurs	980
1.3	Rotationnel d'un champ de vecteurs	981
1.4	Laplacien scalaire	983
1.5	Laplacien vectoriel	984
1.6	Le vecteur symbolique "nabla"	985

TABLE DES MATIÈRES

- 1.7 Cas des champs proportionnels à $\exp(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}))$ 985
- 2 Analyse de Fourier 986
 - 2.1 Décomposition d'une fonction périodique en série de Fourier 986
 - 2.2 Synthèse de Fourier d'un signal non périodique 987
- 3 Équations aux dérivées partielles 990
 - 3.1 Équations fondamentales 990
 - 3.2 Résolution par substitution d'une forme donnée 991
 - 3.3 Conditions aux limites et conditions initiales 991
- 4 Calcul différentiel 992
 - 4.1 Dérivées partielles d'une fonction de plusieurs variables 992
 - 4.2 Différentielle d'une fonction de plusieurs variables 992
- 5 Variables aléatoires 993
 - 5.1 Variables aléatoires discrètes 993
 - 5.2 Variables aléatoires à densité 993

Première partie

Mécanique

Changements de référentiels en mécanique classique



En première année, la mécanique du point et du solide se plaçait dans le cadre d'un seul référentiel, supposé galiléen. Dans ce chapitre, on va étudier les effets cinématiques lorsque deux référentiels différents sont utilisés, tout en restant dans le cadre de la mécanique classique. Au chapitre suivant on verra comment on doit modifier les lois de la dynamique dans un référentiel non galiléen.

1 Exemples

1.1 Cas de deux référentiels en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre

a) Premier exemple

Un observateur O se trouve, immobile, sur le quai de la gare. Un train passe à vitesse constante sur la voie rectiligne. Dans ce train, un enfant E joue à faire rebondir une balle. Pour l'en-

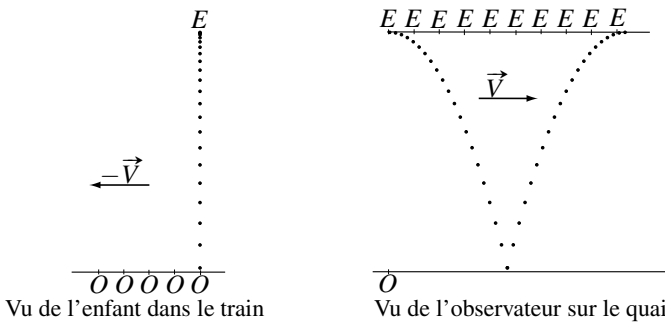


Figure 1.1 – Mouvement de la balle vu par l'enfant dans le train et vu par l'observateur sur le quai.

fant, la trajectoire de la balle est rectiligne : la balle descend, rebondit sur le sol du train et remonte verticalement jusqu’à sa main. La trajectoire de la balle vue par l’observateur O est complètement différente : il voit la balle suivre une trajectoire parabolique vers le bas puis parabolique vers le haut pour revenir dans la main de l’enfant.

Chacun des deux, enfant et observateur, voit une trajectoire différente et attribue à la balle un vitesse différente. Pour l’enfant, le mouvement de la balle sera le même que si le train est immobile. On reviendra plus loin sur ce fait.

b) Deuxième exemple

On suppose maintenant que le train freine avec une accélération constante. Pour l’enfant, la trajectoire de la balle sera toujours rectiligne mais elle ne sera plus verticale. La trajectoire de la balle vue par l’enfant est représentée sur la figure ci-dessous :

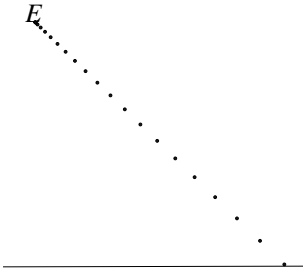


Figure 1.2 – Trajectoire de la balle dans le train qui freine, vue par l’enfant.

De la même façon, si le bus dans lequel on se trouve, debout car il y a du monde, freine, on se sent projeté vers l’avant.

1.2 Cas d’un référentiel en rotation uniforme autour d’un axe fixe par rapport à un autre référentiel

Le plateau circulaire d’un manège tourne autour de son axe vertical à vitesse angulaire constante. Deux amis se trouvent sur ce manège. L’un d’eux (A) est assis au niveau de l’axe de rotation alors que l’autre (B) se trouve en un point de la périphérie du manège.

(A) demande à (B) de lui lancer son téléphone portable. Celui-ci, pour ne pas risquer de l’endommager, préfère lui envoyer en le posant sur le manège et en le faisant glisser sur le plateau. S’il ne se déplace pas, (A) ne pourra pas se saisir du téléphone.

En effet, la trajectoire du téléphone, si on néglige les frottements avec le plateau du manège est représentée figure 1.3.

Sur cet exemple, on constate que la rotation du plateau a entraîné une déviation de la trajectoire du téléphone.

1.3 Conclusion

À partir des exemples présentés, on a mis en évidence que le mouvement d’un référentiel par rapport à un autre modifie les trajectoires des objets donc leurs vitesses et leurs accélérations.

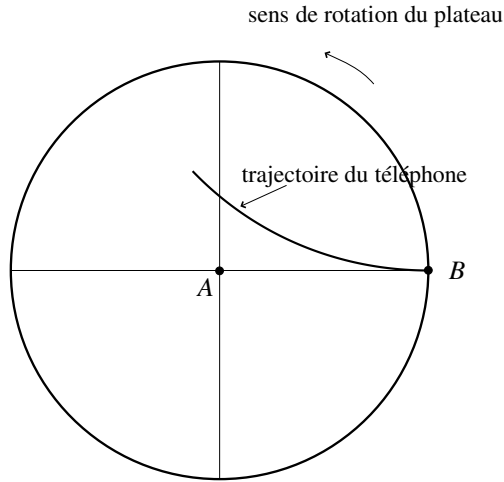


Figure 1.3 – Trajectoire du téléphone sur le plateau du manège

Dès lors, quand deux référentiels différents, \mathcal{R} et \mathcal{R}' , interviennent, il faut impérativement préciser vis-à-vis de quel référentiel on calcule le vecteur vitesse ou le vecteur accélération. On notera $\vec{v}_{|\mathcal{R}}(M)$, $\vec{v}_{|\mathcal{R}'}(M)$ les vitesses d'un point matériel M par rapport aux deux référentiels et $\vec{a}_{|\mathcal{R}}(M)$ et $\vec{a}_{|\mathcal{R}'}(M)$ ses accélérations. Dans la suite du chapitre, on va voir quelles relations existent entre ces vecteurs.

2 Référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel

2.1 Transformation de Galilée

On reprend l'exemple du paragraphe (1.1). On associe des repères d'espace au quai de la gare et au train :

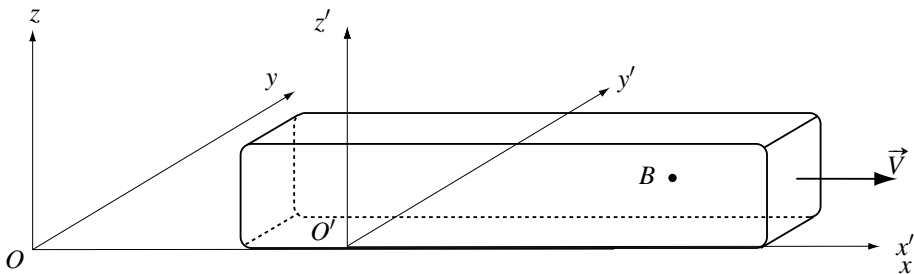


Figure 1.4 – Référentiel lié au quai et référentiel lié au train

Le référentiel $\mathcal{R}(O, x, y, z)$ est lié au quai, le référentiel $\mathcal{R}'(O', x', y', z')$ est lié au train qui est animé de la vitesse $\vec{V} = V\vec{u}_x$ par rapport au quai où V est une constante. \mathcal{R}' est en translation

rectiligne uniforme par rapport à \mathcal{R} . La balle se trouve au point B .

On imagine que l'enfant dans le train et l'observateur sur le quai de la gare aient réglé leurs montres à la même heure le matin. Au moment où le train passe en gare, les deux montres indiquent toujours la même heure : dans le cadre de la mécanique classique, le temps revêt un caractère absolu, il est le même dans tous les référentiels (on reviendra sur ce point plus loin). Si on suppose que les points O et O' coïncident à l'instant initial, alors : $\overrightarrow{OO'} = Vt\vec{u}_x$.

On peut écrire :

$$\overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'B} \tag{1.1}$$

En projection sur les trois axes et en posant $\overrightarrow{OB} = x\vec{u}_x + y\vec{u}_y + z\vec{u}_z$ et $\overrightarrow{O'B} = x'\vec{u}_x + y'\vec{u}_y + z'\vec{u}_z$, cette équation donne :

$$\begin{cases} x = x' + Vt \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x' = x - Vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}, \tag{1.2}$$

Ces relations constituent la **transformation de Galilée** valable pour un référentiel \mathcal{R}' en translation rectiligne uniforme à la vitesse $\vec{V} = V\vec{u}_x$ par rapport \mathcal{R} , dans le cadre de la mécanique classique.

2.2 Composition des vitesses

Le vecteur vitesse de la balle, pour l'observateur sur le quai de la gare, est égal à la dérivée par rapport au temps du vecteur position \overrightarrow{OB} , calculée dans \mathcal{R} , référentiel lié au quai :

$$\vec{v}_{|\mathcal{R}}(B) = \left(\frac{d\overrightarrow{OB}}{dt} \right)_{\mathcal{R}} = \dot{x}(t)\vec{u}_x + \dot{y}(t)\vec{u}_y + \dot{z}(t)\vec{u}_z,$$

car les vecteurs \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z sont des vecteurs fixes (donc indépendants du temps) dans \mathcal{R} . De même la vitesse de la balle pour l'enfant est égale à la dérivée par rapport au temps du vecteur position $\overrightarrow{O'B}$, calculée dans \mathcal{R}' , référentiel lié au train :

$$\vec{v}_{|\mathcal{R}'}(B) = \left(\frac{d\overrightarrow{O'B}}{dt} \right)_{\mathcal{R}'} = \dot{x}'(t)\vec{u}_x + \dot{y}'(t)\vec{u}_y + \dot{z}'(t)\vec{u}_z,$$

car les vecteurs \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z sont aussi fixes dans \mathcal{R} . Or, avec la transformation de Galilée :

$$\dot{x}(t) = \dot{x}'(t) + V, \quad \dot{y}(t) = \dot{y}'(t) \quad \text{et} \quad \dot{z}(t) = \dot{z}'(t).$$

On a donc : $\vec{v}_{|\mathcal{R}}(B) = \vec{v}_{|\mathcal{R}'}(B) + V\vec{u}_x$. La **formule de composition des vitesses** dans le cadre de la transformation de Galilée est :

$$\vec{v}_{|\mathcal{R}}(B) = \vec{v}_{|\mathcal{R}'}(B) + \vec{V}. \tag{1.3}$$