

# PHYSIQUE

MP/MP\* - MPI/MPI\*



**Bernard Salamito**

Marie-Noëlle Sanz | Marc Tuloup

# PHYSIQUE

MP/MP\* - MPI/MPI\*

TOUT-EN-UN

5<sup>e</sup> édition

DUNOD

*l'intégrale*

Avec la collaboration de :  
Anne-Emmanuelle Badel  
François Clausset

Couverture : création Hokus Pokus, adaptation Studio Dunod

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.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> 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

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.

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).



© Dunod, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-084123-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> 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.

## Les auteurs



**Bernard Salamito**

Ancien élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres, ex Ulm), il est professeur de chaire supérieure enseignant au lycée François 1<sup>er</sup> de Fontainebleau en classe de seconde année MP. Il a participé aux jurys de plusieurs concours, à l'écrit et à l'oral.



**Marie-Noëlle Sanz**

Ancienne élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres ex-Sèvres Ulm), agrégée de Sciences Physiques, professeur de Chaires Supérieures. Depuis plus de 25 ans, elle enseigne en seconde année de CPGE (PC puis PC\*) au lycée Saint-Louis à Paris. Elle a participé à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral. Elle a été membre du jury de l'Agrégation (externe et interne). Depuis 2003, elle dirige et coécrit les Tout-en-un (première et deuxième année).



**Marc Tuloup**

Ancien élève de l'école Polytechnique, il a travaillé 6 six ans dans l'industrie informatique (recherche et développement) avant d'enseigner (agrégation, professeur de chaire supérieure) au lycée Victor Hugo de Besançon (PCSI, MP, MP\*, puis MPI\*/MP\*). Il participe au jury des concours de recrutement (agrégation interne) et des grandes écoles, à l'écrit et à l'oral.



# Avant-propos

Ce livre contient :

- un cours entièrement conforme au programme officiel 2022 des classes MP/MP\* et MPI/MPI\* ;
- les approches numériques figurant au programme (nouveau 2022) ;
- de très nombreux exercices de niveaux variés avec des corrections rédigées ;
- un appendice consacré aux outils mathématiques du cours de deuxième année.

Les parties spécifiques à l'une ou l'autre des deux filières sont signalées par l'ajout de **(MP)** ou **(MPI)** à la fin du titre.

Dans la partie cours des encadrés rassemblent tout ce qu'il faut retenir, afin de faciliter les révisions.



Des points de méthode sont mis en valeur dans le cours.



Des erreurs à éviter sont signalées.

Les approches numériques sont développées en détail. Un code Python, complet et commenté, est proposé pour chacune d'entre elles.

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 classés en deux catégories :

- « S'entraîner » : exercices d'application directe du cours ;
- « Approfondir » : exercices demandant plus de réflexion, dont certains proviennent d'épreuves de concours récentes.

Les auteurs espèrent que cet ouvrage sera utile aux étudiants de C.P.G.E., et aussi à tout étudiant intéressé par la physique. Ils remercient tous ceux qui ont participé aux précédentes éditions, en particulier François Vandenbrouck.





# Table des matières

<b>I</b>	<b>Mécanique</b>	<b>19</b>
<b>1</b>	<b>Changements de référentiels en mécanique classique</b>	<b>21</b>
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 . . . . .	34

TABLE DES MATIÈRES

<b>2</b>	<b>Dynamique dans un référentiel non galiléen</b>	<b>45</b>
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 . . . . .	54
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 . . . . .	55
3.2	Forces d'inertie . . . . .	56
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 . . . . .	64
4.3	Le référentiel géocentrique . . . . .	65
4.4	Le référentiel de Copernic . . . . .	67
<b>3</b>	<b>Lois du frottement solide</b>	<b>87</b>
1	Aspect microscopique . . . . .	87
1.1	Interaction entre atomes . . . . .	87
1.2	Surface de contact réel entre deux solides . . . . .	87
1.3	Méthode d'étude . . . . .	88
2	Observations expérimentales . . . . .	88
2.1	Dispositif . . . . .	88
2.2	Première expérience . . . . .	89
2.3	Deuxième expérience . . . . .	89
3	Lois de Coulomb pour le frottement de glissement . . . . .	89
3.1	Composantes normale et tangentielle . . . . .	89

3.2	Glissement, non-glissement . . . . .	90
3.3	Loi de Coulomb pour la composante normale . . . . .	91
3.4	Loi de Coulomb pour la composante tangentielle dans le cas du non-glissement . . . . .	91
3.5	Loi de Coulomb pour la composante tangentielle dans le cas du glissement . . . . .	91
3.6	Les coefficients de frottement . . . . .	92
3.7	Cas d'un contact sans frottement . . . . .	92
4	Méthode de résolution d'un problème avec frottement solide . . . . .	93
5	Interprétations des observations expérimentales . . . . .	93
5.1	Notations et mise en équation générale . . . . .	93
5.2	Interprétation de la première expérience . . . . .	94
5.3	Interprétation de la deuxième expérience . . . . .	96
6	Aspect énergétique . . . . .	96
6.1	Cas d'un freinage par frottement . . . . .	97
6.2	Cas d'une mise en mouvement par frottement . . . . .	97
6.3	Puissance totale des forces de contact entre deux solides . . . . .	98
7	Approche numérique : mouvements avec changement de mode de glissement . . . . .	99
7.1	La méthode d'Euler . . . . .	99
7.2	Mouvement « collé-glissé » . . . . .	100
7.3	Programme Python . . . . .	101
7.4	Résultats . . . . .	103

**II Éléments de traitement du signal 121**

**4 Signaux périodiques, filtrage 123**

1	Signaux périodiques non sinusoïdaux . . . . .	123
1.1	Spectre d'un signal périodique . . . . .	123
1.2	Signification physique . . . . .	124
2	Action d'un filtre sur un signal périodique non sinusoïdal . . . . .	128
2.1	Filtres . . . . .	128
2.2	Effet d'un filtre sur un signal sinusoïdal . . . . .	130
2.3	Effet d'un filtre sur un signal périodique de forme quelconque . . . . .	130
2.4	Diagramme de Bode et type du filtre . . . . .	131
2.5	Composition spectrale du signal de sortie . . . . .	133
2.6	Caractère intégrateur ou dérivateur du filtre . . . . .	133
3	Exemples de filtrage de signaux périodiques non sinusoïdaux . . . . .	135

## TABLE DES MATIÈRES

3.1	Filtrage d'un créneau par un filtre passe-bas du premier ordre . . . . .	135
3.2	Filtrage d'un signal triangulaire par un filtre passe-haut du premier ordre . . . . .	138
3.3	Filtrage par un filtre passe-bande du deuxième ordre . . . . .	141
<b>5</b>	<b>Électronique numérique</b>	<b>165</b>
1	Échantillonnage . . . . .	165
1.1	Acquisition, échantillonnage . . . . .	165
1.2	Spectre d'un signal échantillonné . . . . .	166
1.3	Critère de Nyquist-Shannon . . . . .	169
1.4	Pratique de l'analyse spectrale . . . . .	172
1.5	Approche numérique : implémentation du calcul du spectre d'un signal numérisé (MPI) . . . . .	176
2	Filtrage numérique . . . . .	179
2.1	Filtre passe-bas du premier ordre . . . . .	179
2.2	Filtres passe-bas du deuxième ordre . . . . .	183
2.3	Génération d'un signal analogique à partir d'un signal numérique . . . . .	184
<b>6</b>	<b>Circuits logiques (MPI)</b>	<b>191</b>
1	Logique combinatoire . . . . .	191
1.1	Signaux logiques . . . . .	191
1.2	Interrupteur commandé par une tension . . . . .	192
1.3	Portes logiques . . . . .	192
2	Logique séquentielle . . . . .	197
2.1	Description d'un circuit séquentiel . . . . .	197
2.2	Chronogramme . . . . .	197
2.3	État stable d'un circuit séquentiel . . . . .	200
2.4	Circuits astable, monostable et bistable . . . . .	200
2.5	Un circuit bistable : la bascule RS . . . . .	200
2.6	Exemple de circuit monostable . . . . .	203
2.7	Exemple de circuit astable . . . . .	205
<b>III</b>	<b>Optique</b>	<b>215</b>
<b>7</b>	<b>Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	<b>217</b>
1	Le modèle scalaire de la lumière . . . . .	217
1.1	Nature de l'onde lumineuse . . . . .	217
1.2	La vibration lumineuse . . . . .	218

1.3	Éclairement et intensité vibratoire . . . . .	219
2	Lumière monochromatique . . . . .	221
2.1	Définition . . . . .	221
2.2	Domaine visible . . . . .	222
2.3	Notation complexe . . . . .	222
2.4	Expression de l'éclairement . . . . .	222
3	Chemin optique . . . . .	223
3.1	Définition . . . . .	223
3.2	Calcul pratique du chemin optique . . . . .	223
3.3	Chemin optique et retard de phase . . . . .	224
3.4	Surface d'onde . . . . .	225
3.5	Théorème de Malus . . . . .	226
3.6	Égalité des chemins optiques entre points conjugués . . . . .	226
4	Onde sphérique, onde plane . . . . .	227
4.1	Onde sphérique . . . . .	227
4.2	Onde plane . . . . .	228
4.3	Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss . . . . .	230
5	Lumières réelles . . . . .	232
5.1	Composition spectrale . . . . .	232
5.2	Sources de lumière blanche . . . . .	233
5.3	Lampes spectrales . . . . .	233
5.4	Faisceaux lasers . . . . .	234
6	Trains d'ondes . . . . .	234
6.1	La largeur des raies spectrales . . . . .	234
6.2	Interprétation . . . . .	235
6.3	Longueur de cohérence . . . . .	236
6.4	Modèle des trains d'ondes aléatoires . . . . .	237
<b>8</b>	<b>Interférences de deux ondes lumineuses</b> . . . . .	<b>249</b>
1	Interférences lumineuses . . . . .	249
2	Intensité vibratoire résultante . . . . .	250
2.1	Terme d'interférences . . . . .	250
2.2	Notion d'ondes cohérentes . . . . .	251
3	Formule de Fresnel . . . . .	252
3.1	Énoncé . . . . .	252
3.2	Interprétation physique . . . . .	253
3.3	Ordre d'interférences . . . . .	254
3.4	Différence de marche . . . . .	255

TABLE DES MATIÈRES

4	Figure d'interférences . . . . .	255
4.1	Champ d'interférences . . . . .	255
4.2	Franges d'interférences . . . . .	255
4.3	Contraste . . . . .	256
5	Retour sur la notion de cohérence . . . . .	258
5.1	Cas de deux sources distinctes . . . . .	258
5.2	Cas de deux sources mutuellement cohérentes . . . . .	258
<b>9</b>	<b>Dispositif interférentiel par division du front d'onde : les trous d'Young</b>	<b>263</b>
1	Le dispositif des trous d'Young . . . . .	263
1.1	Présentation du dispositif . . . . .	263
1.2	Notion de dispositif interférentiel à division du front d'onde . . . . .	264
1.3	Description du champ d'interférences . . . . .	266
1.4	Montage de Fraunhofer . . . . .	270
2	Influence de l'extension spatiale de la source principale . . . . .	273
2.1	Variation de l'ordre d'interférence due à un déplacement de la source primaire . . . . .	273
2.2	Utilisation d'une fente source . . . . .	275
2.3	Visibilité des franges produites par deux sources ponctuelles incohé- rentes . . . . .	275
2.4	Visibilité des franges produites par une source étendue . . . . .	278
3	Influence de la largeur spectrale de la source . . . . .	280
3.1	Doublet de longueurs d'onde . . . . .	280
3.2	Source de faible largeur spectrale . . . . .	282
3.3	Éclairage en lumière blanche . . . . .	283
4	Complément : déplacement des franges par variation de l'ordre d'interférence	285
4.1	Effet d'une lame à faces parallèles . . . . .	285
4.2	L'interféromètre de Rayleigh . . . . .	286
<b>10</b>	<b>L'interféromètre de Michelson</b>	<b>299</b>
1	L'interféromètre de Michelson . . . . .	299
1.1	Présentation du dispositif . . . . .	299
1.2	Les deux voies de l'interféromètre . . . . .	300
1.3	Le dispositif séparateur . . . . .	300
1.4	Modélisation de l'interféromètre . . . . .	302
1.5	Flux lumineux dans l'interféromètre . . . . .	303
2	Interféromètre de Michelson en « lame d'air » éclairé par une source étendue	304
2.1	Configuration de la « lame d'air » . . . . .	304

2.2	Notion de division d'amplitude . . . . .	304
2.3	Localisation des interférences dans le cas d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air . . . . .	305
2.4	Étude des franges . . . . .	306
2.5	Applications . . . . .	311
3	Interféromètre de Michelson en « coin d'air » éclairé par une source étendue .	315
3.1	Configuration du « coin d'air » . . . . .	315
3.2	Localisation des franges dans le cas d'un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air . . . . .	315
3.3	Étude des franges . . . . .	316
3.4	Application : détection des défauts d'une lame de verre . . . . .	318
<b>11</b>	<b>Interférences de <math>N</math> ondes cohérentes (MP)</b>	<b>333</b>
1	Superposition de $N$ ondes lumineuses . . . . .	333
1.1	Expression de la vibration lumineuse résultante . . . . .	333
1.2	Intensité vibratoire résultante . . . . .	334
1.3	Maxima principaux d'intensité . . . . .	336
2	Réseaux de diffraction . . . . .	337
2.1	Définition . . . . .	337
2.2	Diffraction par un réseau . . . . .	338
2.3	Formule fondamentale des réseaux . . . . .	338
2.4	Principe du spectromètre à réseau . . . . .	341
<b>IV</b>	<b>Électromagnétisme</b>	<b>353</b>
<b>12</b>	<b>Champ électrostatique</b>	<b>355</b>
1	Charge électrique . . . . .	355
1.1	Rappels . . . . .	355
1.2	Charge ponctuelle . . . . .	355
1.3	Distributions continues de charges . . . . .	356
2	Champ créé par une charge ponctuelle . . . . .	358
2.1	Loi de Coulomb . . . . .	358
2.2	Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle . . . . .	359
3	Champ créé par une distribution de charges . . . . .	360
3.1	Principe de superposition . . . . .	360
3.2	Champ créé par une distribution discrète de charges ponctuelles . . .	360
3.3	Champ créé par une distribution continue de charges . . . . .	361
4	Propriétés de symétrie . . . . .	362

## TABLE DES MATIÈRES

4.1	Symétries usuelles des distributions de charges . . . . .	362
4.2	Symétries du champ . . . . .	365
5	Circulation du champ électrostatique, potentiel électrostatique . . . . .	369
5.1	Circulation d'un champ de vecteurs . . . . .	370
5.2	Potentiel électrostatique . . . . .	371
5.3	Lien entre le champ et le potentiel électrostatiques . . . . .	372
5.4	Propriétés de symétrie du potentiel . . . . .	373
5.5	Énergie potentielle d'une charge placée dans un champ extérieur . . .	374
6	Flux du champ électrostatique - Théorème de Gauss . . . . .	374
6.1	Flux d'un champ de vecteurs . . . . .	374
6.2	Théorème de Gauss . . . . .	376
7	Topographie du champ électrostatique . . . . .	376
7.1	Lignes de champ et équipotentiels . . . . .	376
7.2	Propriétés des lignes de champ électrostatique et des équipotentiels	377
7.3	Quelques exemples . . . . .	380
8	Approche numérique : tracé des lignes de champ par ordinateur . . . . .	382
9	Analogie avec le champ gravitationnel . . . . .	386
9.1	Interaction gravitationnelle . . . . .	386
9.2	Champ gravitationnel . . . . .	386
9.3	Potentiel gravitationnel . . . . .	387
9.4	Propriétés du champ gravitationnel . . . . .	387
<b>13</b>	<b>Exemples de champs électrostatiques</b>	<b>403</b>
1	Méthodes d'étude des champs et des potentiels . . . . .	403
2	Exemple de problème à symétrie sphérique : sphère uniformément chargée . .	404
2.1	Étude des symétries . . . . .	404
2.2	Application du théorème de Gauss . . . . .	405
2.3	Champ et potentiel créés par la sphère. . . . .	406
3	Exemple de problème à symétrie cylindrique : cylindre uniformément chargé	408
3.1	Étude des symétries . . . . .	408
3.2	Application du théorème de Gauss . . . . .	408
3.3	Champ et potentiel électrostatiques créés par le cylindre . . . . .	409
4	Exemples de problèmes à symétrie plane . . . . .	410
4.1	Étude des symétries . . . . .	410
4.2	Calcul du champ par le théorème de Gauss . . . . .	411
4.3	Expression du potentiel . . . . .	412
4.4	Modélisation surfacique . . . . .	413
4.5	Application au condensateur plan . . . . .	414



<b>14 Dipôle électrostatique</b>	<b>435</b>
1 Potentiel et champ créés . . . . .	435
1.1 Introduction . . . . .	435
1.2 Dipôle électrostatique, approximation dipolaire . . . . .	435
1.3 Moment dipolaire . . . . .	436
1.4 Analyse des symétries et des invariances . . . . .	436
1.5 Potentiel créé par un dipôle électrostatique . . . . .	437
1.6 Champ créé par un dipôle électrostatique . . . . .	438
1.7 Topographie du champ . . . . .	439
1.8 Application aux molécules polaires . . . . .	440
2 Action d'un champ extérieur sur un dipôle . . . . .	440
2.1 Cas d'un champ uniforme . . . . .	440
2.2 Cas d'un champ non uniforme . . . . .	442
2.3 Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique extérieur . . . . .	444
<b>15 Champ magnétostatique</b>	<b>455</b>
1 Courant électrique . . . . .	455
1.1 Vecteur densité de courant . . . . .	455
1.2 Intensité traversant une surface orientée . . . . .	457
1.3 Distributions filiformes . . . . .	457
2 Propriétés globales du champ magnétostatique . . . . .	457
2.1 Théorème de superposition . . . . .	457
2.2 Flux du champ magnétostatique . . . . .	458
2.3 Circulation du champ magnétostatique - Théorème d'Ampère . . . . .	459
3 Symétries et invariances du champ magnétique . . . . .	459
3.1 Symétries et invariances usuelles des distributions de courants . . . . .	459
3.2 Symétries du champ magnétique . . . . .	462
4 Topographie du champ magnétostatique . . . . .	466
4.1 Propriétés des lignes de champ du champ magnétostatique . . . . .	466
4.2 Comment distinguer une carte de champ électrostatique d'une carte de champ magnétostatique? . . . . .	467
4.3 Exemples . . . . .	467
5 Exemples de calculs de champ magnétostatique . . . . .	468
5.1 Quand et comment appliquer le théorème d'Ampère? . . . . .	468
5.2 Modèle du fil rectiligne infini parcouru par un courant uniformément réparti en volume . . . . .	469
5.3 Modèle du solénoïde infini . . . . .	472

TABLE DES MATIÈRES

5.4	Utilisation du théorème de superposition (MP) . . . . .	474
<b>16</b>	<b>Dipôle magnétique</b>	<b>491</b>
1	Moments magnétiques . . . . .	491
1.1	Notion de moment magnétique . . . . .	491
1.2	Ordres de grandeur . . . . .	492
2	Champ créé par un dipôle magnétique . . . . .	493
2.1	Approximation dipolaire . . . . .	493
2.2	Champ magnétique créé par le dipôle . . . . .	494
3	Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique . . . . .	495
3.1	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique uniforme . . . . .	495
3.2	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique non uniforme . . . . .	496
<b>17</b>	<b>Équations de Maxwell</b>	<b>503</b>
1	La loi de la conservation de la charge électrique . . . . .	503
1.1	Cas unidimensionnel . . . . .	503
1.2	Cas général . . . . .	504
2	Champ électromagnétique - Équations de Maxwell . . . . .	505
2.1	Définition du champ électromagnétique . . . . .	505
2.2	Équations de Maxwell . . . . .	505
2.3	Contenu physique . . . . .	506
2.4	Théorème de superposition . . . . .	507
2.5	Compatibilité des équations de Maxwell avec la loi de conservation de la charge . . . . .	507
3	Forme intégrale des équations de Maxwell . . . . .	507
3.1	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Gauss : théorème de Gauss . . . . .	508
3.2	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-flux . . . . .	508
3.3	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday : loi de Faraday . . . . .	509
3.4	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Ampère : théorème d'Ampère généralisé . . . . .	510
4	Équation de propagation des champs dans un milieu vide de charge et de courant . . . . .	511
4.1	Couplage spatio-temporel entre le champ électrique et le champ magnétique . . . . .	511
4.2	Démonstration de l'équation de propagation . . . . .	511
4.3	Nature de l'onde lumineuse . . . . .	512
5	Champs statiques . . . . .	513
5.1	Équations de Maxwell en régime stationnaire . . . . .	513
5.2	Théorème de Gauss et théorème d'Ampère . . . . .	513

5.3	Existence d'un potentiel électrostatique . . . . .	513
5.4	Équation de Poisson et équation de Laplace . . . . .	513
5.5	Approche numérique : résolution de l'équation de Laplace (MPI) . .	514
<b>18</b>	<b>Énergie du champ électromagnétique</b>	<b>539</b>
1	Interaction entre le champ électromagnétique et la matière . . . . .	539
1.1	Densité volumique de force électromagnétique . . . . .	539
1.2	Puissance volumique . . . . .	540
1.3	Cas d'un conducteur ohmique . . . . .	541
2	Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting . . . .	542
2.1	Définitions . . . . .	542
2.2	Expressions . . . . .	542
2.3	Quelques ordres de grandeur . . . . .	543
3	Bilan d'énergie électromagnétique . . . . .	544
3.1	Bilan global . . . . .	544
3.2	Équation locale de Poynting . . . . .	545
4	Exemples . . . . .	546
4.1	Régime stationnaire . . . . .	546
4.2	Solénoïde en régime variable . . . . .	549
<b>19</b>	<b>Propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide</b>	<b>563</b>
1	Équation de d'Alembert . . . . .	563
1.1	Définition . . . . .	563
1.2	Solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle . . . . .	564
1.3	Complément : démonstration de la solution . . . . .	565
2	Onde électromagnétique plane progressive dans le vide . . . . .	566
2.1	Définition d'une onde plane progressive (OPP) . . . . .	566
2.2	Structure de l'OPP électromagnétique dans le vide . . . . .	567
2.3	Lien du modèle de l'OPP électromagnétique avec la réalité . . . . .	568
3	Onde électromagnétique plane progressive et monochromatique dans le vide .	569
3.1	Onde plane progressive et monochromatique (OPPM) . . . . .	569
3.2	OPPM électromagnétique se propageant dans le vide . . . . .	571
3.3	Intérêt du modèle de l'OPPM . . . . .	571
3.4	Spectre électromagnétique . . . . .	571
4	Étude énergétique des OPP électromagnétiques . . . . .	573
4.1	Expressions des grandeurs énergétiques . . . . .	573
4.2	Cas des OPPM électromagnétiques, valeurs moyennes . . . . .	574
5	Polarisation des ondes électromagnétiques . . . . .	575

TABLE DES MATIÈRES

5.1	Polarisation rectiligne . . . . .	575
5.2	Polarisation circulaire . . . . .	577
6	Utilisation de la notation complexe des OPPM . . . . .	579
6.1	Choix d'une convention de notation complexe . . . . .	579
6.2	Dérivation et notation complexe . . . . .	579
6.3	Équations de Maxwell en représentation complexe . . . . .	580
6.4	Grandeurs énergétiques en notation complexe . . . . .	580
6.5	Application à une OPPM électromagnétique se propageant dans le vide	581
7	Approche expérimentale : polarisation rectiligne de la lumière . . . . .	582
7.1	Lumière naturelle . . . . .	582
7.2	Le polariseur (ou polaroïd) . . . . .	582
7.3	Production de lumière polarisée rectilignement . . . . .	582
7.4	Loi de Malus . . . . .	583
<b>20</b>	<b>Onde électromagnétique dans un plasma, dispersion</b>	<b>597</b>
1	Onde électromagnétique plane progressive dans un plasma . . . . .	597
1.1	Conductivité complexe du plasma . . . . .	597
1.2	Relation de dispersion du plasma . . . . .	599
1.3	Pulsation de coupure . . . . .	600
1.4	Caractère dispersif du plasma . . . . .	601
1.5	Étude du cas propagatif ( $\omega > \omega_p$ ) . . . . .	602
1.6	Étude du cas non propagatif ( $\omega < \omega_p$ ), onde évanescence . . . . .	604
2	Propagation d'un paquet d'ondes . . . . .	605
2.1	Le modèle du paquet d'ondes . . . . .	605
2.2	Étude de deux exemples . . . . .	606
2.3	Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif . . . . .	609
2.4	Complément : étude théorique de l'évolution du paquet d'ondes . . . . .	611
2.5	Retour sur la propagation dans un plasma . . . . .	612
<b>21</b>	<b>Onde électromagnétique dans un conducteur, réflexion</b>	<b>625</b>
1	Propagation d'une onde électromagnétique dans un conducteur . . . . .	625
1.1	Conductivité d'un métal en régime variable . . . . .	625
1.2	Relation de dispersion dans un conducteur ohmique . . . . .	627
1.3	Cas des basses fréquences, effet de peau . . . . .	629
2	Réflexion d'une OPPM électromagnétique sur un conducteur parfait . . . . .	634
2.1	Le modèle du conducteur parfait . . . . .	634
2.2	Réflexion d'une OPPM en incidence normale sur un conducteur . . . . .	637
2.3	Onde électromagnétique stationnaire . . . . .	642

2.4	Onde électromagnétique dans une cavité . . . . .	646
<b>22</b>	<b>Rayonnement dipolaire électrique</b>	<b>665</b>
1	Dipôle électrique oscillant . . . . .	665
1.1	Moment dipolaire électrique . . . . .	665
1.2	Définition d'un dipôle électrique oscillant . . . . .	666
2	Champ électromagnétique créé par un dipôle oscillant . . . . .	666
2.1	Étude des symétries . . . . .	667
2.2	Zone de rayonnement . . . . .	668
2.3	Champ électromagnétique dans la zone de rayonnement . . . . .	668
2.4	Anisotropie du rayonnement . . . . .	670
2.5	Affaiblissement de l'onde avec la distance . . . . .	671
2.6	Puissance totale rayonnée . . . . .	674
3	Diffusion d'une onde électromagnétique par une molécule (MP) . . . . .	674
3.1	Position du problème . . . . .	674
3.2	Le modèle de la charge élastiquement liée . . . . .	674
3.3	Onde électromagnétique incidente et hypothèses . . . . .	675
3.4	Dipôle oscillant induit sur la molécule par l'OPPM . . . . .	675
3.5	Onde diffusée . . . . .	677
3.6	Section efficace de diffusion . . . . .	677
3.7	Exemples de phénomènes de diffusion d'une onde électromagnétique . . . . .	679
<b>V</b>	<b>Thermodynamique</b>	<b>693</b>
<b>23</b>	<b>Principes de la thermodynamique</b>	<b>695</b>
1	Énergie et entropie d'un système . . . . .	695
1.1	Équilibre thermodynamique et équilibre thermodynamique local . . . . .	695
1.2	Énergie d'un système thermodynamique . . . . .	697
1.3	Entropie d'un système thermodynamique . . . . .	698
2	Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé . . . . .	699
2.1	Le premier principe . . . . .	699
2.2	Le second principe . . . . .	705
3	Principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire (MP) . . . . .	710
3.1	Système ouvert . . . . .	710
3.2	Bilan d'une grandeur extensive $Y$ en régime stationnaire . . . . .	711
3.3	Premier principe pour un système ouvert en régime stationnaire . . . . .	712
3.4	Second principe pour un système ouvert en régime stationnaire . . . . .	716

TABLE DES MATIÈRES

3.5	Premier et second principes pour un système ouvert sous forme infinitésimale . . . . .	717
4	Diagramme $(\ln P, h)$ d'un fluide (MP) . . . . .	718
4.1	Principe d'un diagramme thermodynamique . . . . .	718
4.2	Zone d'équilibre entre le liquide et le gaz et courbe isotitre . . . . .	719
4.3	Le diagramme $(\ln P, h)$ ou diagramme des frigoristes . . . . .	720
4.4	Application des deux principes à l'aide du diagramme . . . . .	723
5	Exemples d'application des principes de la thermodynamique pour un système ouvert (MP) . . . . .	724
5.1	Application 1 : étude du circuit d'eau d'une centrale électrique thermique . . . . .	724
5.2	Application 2 : étude d'une machine frigorifique . . . . .	731
<b>24</b>	<b>Transferts thermiques</b>	<b>763</b>
1	Les trois modes de transfert thermique . . . . .	763
1.1	Transfert thermique conductif . . . . .	763
1.2	Transfert thermique convectif . . . . .	764
1.3	Transfert thermique radiatif . . . . .	764
2	Le courant thermique . . . . .	766
2.1	Vecteur densité de courant thermique . . . . .	766
2.2	Flux thermique . . . . .	767
3	Loi de Fourier - Conductivité thermique . . . . .	767
3.1	Loi phénoménologique de Fourier . . . . .	767
3.2	Limites de validité de la loi de Fourier . . . . .	768
3.3	Ordre de grandeur des conductivités thermiques . . . . .	768
4	Équation locale de bilan thermique . . . . .	769
4.1	Bilan thermique local à une dimension . . . . .	769
4.2	Bilan thermique local en symétrie cylindrique . . . . .	771
4.3	Bilan thermique local en symétrie sphérique . . . . .	772
4.4	Complément : équation locale de bilan thermique . . . . .	774
5	Équation de la diffusion thermique . . . . .	774
5.1	Diffusion thermique en l'absence de sources . . . . .	774
5.2	Diffusion thermique en présence de sources . . . . .	778
5.3	Conditions aux limites pour le champ de température . . . . .	779
5.4	Champ de température en régime stationnaire . . . . .	781
5.5	Approche numérique : résolution de l'équation de diffusion thermique à 1D . . . . .	784
5.6	Exemple de champ de température stationnaire à 2D . . . . .	788

6	Résistance thermique . . . . .	790
6.1	Définition . . . . .	790
6.2	Résistance thermique dans le cas d'un transfert unidimensionnel . . .	791
6.3	Résistance thermique en géométries cylindrique et sphérique . . . . .	792
6.4	Lois d'association des résistances thermiques . . . . .	794
6.5	Résistance thermique d'une interface solide-fluide . . . . .	796
6.6	Cas du régime lentement variable . . . . .	796
7	Comment déterminer expérimentalement une conductivité thermique ? . . . .	797
7.1	Mesure de conductivité thermique . . . . .	797
7.2	Mesure de résistance thermique . . . . .	799
8	Approche descriptive du rayonnement thermique : corps noir (MPI) . . . . .	801
8.1	Réflexion, transmission et absorption . . . . .	801
8.2	Définition du corps noir . . . . .	802
8.3	Puissance émise par un corps noir : loi de Stefan . . . . .	802
8.4	Domaine spectral de l'émission du corps noir : loi de Wien . . . . .	803
8.5	Notion d'équilibre radiatif . . . . .	803
8.6	Température d'équilibre de la Terre, effet de serre . . . . .	804

## **VI Physique quantique 829**

<b>25</b>	<b>Fonction d'onde, équation de Schrödinger</b>	<b>831</b>
1	La fonction d'onde . . . . .	831
1.1	Description de l'état d'une particule . . . . .	831
1.2	Fonction d'onde à 1 dimension . . . . .	832
1.3	Condition de normalisation . . . . .	832
1.4	Interprétation physique de la densité de probabilité . . . . .	833
2	L'équation de Schrödinger . . . . .	834
2.1	Énoncé . . . . .	834
2.2	Principe de superposition . . . . .	835
3	États stationnaires, équation de Schrödinger indépendante du temps . . . . .	835
3.1	États stationnaires . . . . .	835
3.2	Équation de Schrödinger indépendante du temps . . . . .	836
3.3	Fonction d'onde propre $\varphi(x)$ . . . . .	838
3.4	Relation de Planck pour l'énergie . . . . .	839
4	Principe d'indétermination de Heisenberg . . . . .	839
4.1	Indétermination quantique . . . . .	839
4.2	Inégalité de Heisenberg . . . . .	840

TABLE DES MATIÈRES

5	États non stationnaires d'une particule quantique (MP)	840
5.1	Superposition de deux états stationnaires	840
5.2	Relation temps-énergie de Heisenberg	841
<b>26</b>	<b>Particule quantique dans un puits infini</b>	<b>851</b>
1	Puits de potentiel infiniment profond	851
2	États stationnaires dans un puits infini	852
2.1	Fonctions d'onde propres	852
2.2	Niveaux d'énergie	854
2.3	Densité de probabilité de présence	855
2.4	Analogie avec une corde vibrante	856
3	Énergie cinétique de confinement	857
3.1	Définition	857
3.2	Exemples	858
3.3	Application : ordre de grandeur de l'énergie de l'état fondamental dans un puits de potentiel	859
4	Exemple d'état non stationnaire dans un puits infini (MP)	860
<b>27</b>	<b>Particule quantique libre</b>	<b>875</b>
1	Introduction	875
2	États stationnaires d'une particule quantique libre	875
3	Ondes de De Broglie	877
3.1	Définition	877
3.2	Relation de dispersion et vitesse de phase dans le cas de la particule libre	877
3.3	Relation de Planck pour la quantité de mouvement	877
3.4	Quel sens physique associer à une onde de De Broglie?	878
4	Paquet d'ondes quantique	879
4.1	Étude d'un exemple	879
4.2	Généralisation	882
4.3	Relation position-vitesse de Heisenberg	882
4.4	Relation temps-énergie de Heisenberg	883
5	Vecteur densité de courant de probabilité (MP)	885
5.1	Définition	885
5.2	Expression pour un paquet d'ondes quasi monochromatique	885
5.3	Expression pour une onde de De Broglie	885
5.4	Cas d'un faisceau de particules	886



<b>28</b>	<b>Particule quantique soumise à une marche de potentiel, effet tunnel</b>	<b>889</b>
1	Marche de potentiel . . . . .	889
1.1	Position du problème . . . . .	889
1.2	Continuité de la fonction d'onde . . . . .	890
1.3	Premier cas : $E > V_0$ . . . . .	891
1.4	Second cas : $E < V_0$ . . . . .	895
2	Barrière de potentiel et effet tunnel . . . . .	898
2.1	Position du problème . . . . .	898
2.2	Expression de la fonction d'onde . . . . .	899
2.3	Densité de probabilité de présence . . . . .	900
2.4	Calcul des probabilités de réflexion et de transmission (MP) . . . . .	901
2.5	Effet tunnel . . . . .	902
2.6	Applications de l'effet tunnel . . . . .	904
<b>VII</b>	<b>Thermodynamique statistique (MP)</b>	<b>919</b>
<b>29</b>	<b>Éléments de thermodynamique statistique (MP)</b>	<b>921</b>
1	Facteur de Boltzmann . . . . .	921
1.1	Pression dans une atmosphère isotherme . . . . .	921
1.2	Poids de Boltzmann pour une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat . . . . .	927
2	Systèmes à spectre discret d'énergie . . . . .	928
2.1	Probabilité d'occupation d'un état quantique donné par une particule donnée . . . . .	928
2.2	Énergie moyenne . . . . .	929
2.3	Système à deux niveaux d'énergie non dégénérés . . . . .	931
2.4	Système de $N$ particules dans un puits infini à 1 dimension . . . . .	935
3	Capacités thermiques classiques des gaz et des solides . . . . .	938
3.1	Théorème d'équipartition de l'énergie . . . . .	938
3.2	Théorie classique de la capacité thermique des gaz parfaits . . . . .	941
3.3	Amélioration du modèle du gaz parfait diatomique . . . . .	944
3.4	Capacité thermique à volume constant d'un solide . . . . .	946

<b>VIII</b>	<b>Appendice</b>	<b>975</b>
<b>A</b>	<b>Outils mathématiques</b>	<b>977</b>
1	Systèmes de coordonnées curvilignes . . . . .	977
1.1	Coordonnées cylindriques . . . . .	977
1.2	Coordonnées sphériques . . . . .	978
2	Analyse vectorielle . . . . .	979
2.1	Gradient d'un champ scalaire . . . . .	979
2.2	Divergence d'un champ de vecteurs . . . . .	980
2.3	Rotationnel d'un champ de vecteurs . . . . .	982
2.4	Laplacien scalaire . . . . .	983
2.5	Laplacien vectoriel . . . . .	984
2.6	Le vecteur symbolique "nabla" . . . . .	985
3	Analyse de Fourier . . . . .	985
3.1	Décomposition d'une fonction périodique en série de Fourier . . . . .	985
3.2	Synthèse de Fourier d'un signal non périodique . . . . .	986

**Première partie**

**Mécanique**



# Changements de référentiels en mécanique classique

## 1

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-

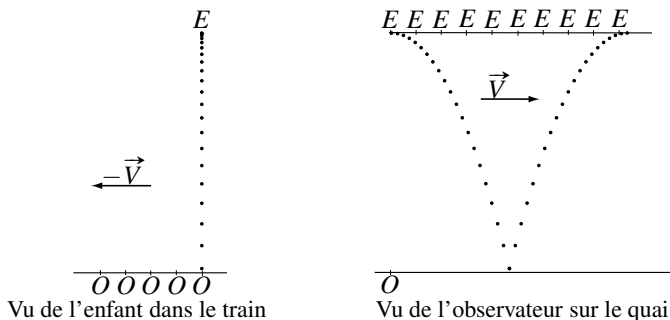


Figure 1.1 – Mouvement de la balle vu par l'enfant dans le train et vu par l'observateur sur le quai.

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 une 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 :

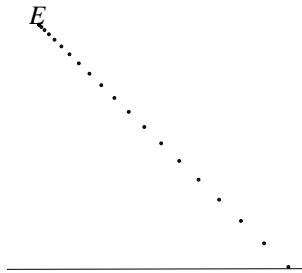


Figure 1.2 – Trajectoire de la balle dans le train qui freine, vue par l'enfant.

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.