

l'intégrale

Sous la direction de
Marie-Noëlle Sanz
Anne-Emmanuelle Badel
François Clausset

Physique

TOUT-EN-UN • 1^{re} année

Cours et exercices corrigés

**NOUVEAU
PROGRAMME**

**MPSI
PCSI
PTSI**

2^e édition

DUNOD

Table des matières

PREMIÈRE PÉRIODE

I Électrocinétique I

Preliminaires	5
1 Lois générales de l'électrocinétique dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires	8
1 Mouvement des porteurs de charges	8
1.1 Notion de charge électrique	8
1.2 Porteurs de charges	10
1.3 Mouvement d'agitation thermique ou mouvement d'ensemble – courant électrique	12
2 Le courant électrique	13
2.1 Définition	13
2.2 Sens conventionnel du courant	13
2.3 Signe du courant	14
2.4 Intensité du courant	14
2.5 Quelques ordres de grandeur d'intensité	15
3 Tension et potentiel	16
3.1 Définitions	16
3.2 Masse ou référence de potentiel	16
4 Loi des nœuds - loi des mailles	17
4.1 Terminologie des circuits	17
4.2 Régime continu ou variable	18
4.3 Approximation des régimes quasi-stationnaires ou ARQS	18
4.4 Loi des nœuds	19
4.5 Loi des mailles	20
5 Notion de dipôles	21
6 Puissance – dipôles récepteurs et générateurs	21
6.1 Définition de la puissance	21
6.2 Récepteurs et générateurs	22
2 Circuits linéaires dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires	24
1 Dipôles linéaires	24

2	Notion de force	107
2.1	Point isolé	108
2.2	Définition de la notion de force	108
2.3	Forces à distance	108
2.4	Forces de contact	111
3	Les trois lois de Newton de la dynamique	115
3.1	Première loi de Newton : principe d'inertie	115
3.2	Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique	116
3.3	Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques	118
4	Résolution d'un problème de mécanique - Exemples	119
4.1	Méthode de résolution	119
4.2	Mouvement d'un point matériel dans le champ de pesanteur en l'absence de résistance de l'air	120
4.3	Trajectoire d'un tir dans le vide	122
4.4	Mouvement d'un point matériel dans le champ de pesanteur en présence de résistance de l'air	126
4.5	Mouvement d'une masse attachée à un ressort dont l'autre extrémité est fixe	133
A	Applications directes du cours	137
B	Exercices et problèmes	137
6	Aspects énergétiques de la dynamique du point	139
1	Travail et puissance d'une force	139
1.1	Position du problème	139
1.2	Puissance d'une force	140
1.3	Travail élémentaire d'une force	140
1.4	Travail d'une force au cours d'un déplacement	141
2	Théorème de l'énergie cinétique	141
2.1	Définition de l'énergie cinétique	141
2.2	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel galiléen	141
2.3	Utilisation du théorème de l'énergie cinétique	142
2.4	Intérêt d'une approche énergétique pour les systèmes à un degré de liberté	143
2.5	Exemple d'étude d'un problème à l'aide du théorème de l'énergie cinétique	143
3	Énergie potentielle et forces conservatives	144
3.1	Définitions	144
3.2	Interprétation physique	145
3.3	Exemples de forces conservatives	145
3.4	Exemples de forces non conservatives	147
4	Énergie mécanique	147
4.1	Définition de l'énergie mécanique	147
4.2	Conservation de l'énergie mécanique	148
4.3	Cas général : non conservation de l'énergie mécanique	148

5	Application à l'étude qualitative des mouvements et des équilibres	149
5.1	Conséquence de la positivité de l'énergie cinétique	149
5.2	Nature du mouvement en fonction de l'énergie mécanique	149
5.3	Équilibre	150
5.4	Détermination des positions d'équilibre	150
5.5	Étude de la stabilité des équilibres	151
6	Approche à l'aide des portraits de phase	152
6.1	Définition	152
6.2	Solution et conditions initiales	153
6.3	Portrait de phase	154
6.4	Propriétés des plans de phase	154
6.5	Exemple de portrait de phase : la chute libre	156
6.6	Portraits de phase des systèmes conservatifs	156
6.7	Influence des frottements	159
7	Étude énergétique d'une masse suspendue à un ressort	159
7.1	Positions d'équilibre - Stabilité	160
7.2	Équation du mouvement	160
A	Applications directes du cours	162
B	Exercices et problèmes	162
7	Oscillateurs harmoniques et amortis par frottement fluide	165
1	Oscillateurs harmoniques	165
1.1	Exemples d'oscillateurs harmoniques	165
1.2	Étude du mouvement d'un oscillateur harmonique	167
1.3	Portrait de phase de l'oscillateur harmonique	169
2	Oscillateurs amortis	170
2.1	Équation différentielle du mouvement	170
2.2	Analogie avec le circuit électrique R, L, C série	171
2.3	Trois types de régimes	172
2.4	Aspects énergétiques	176
2.5	Portrait de phase de l'oscillateur amorti	178
A	Applications directes du cours	182
B	Exercices et problèmes	182
III Optique		
Préliminaires		189
8	Approximation de l'optique géométrique, rayon lumineux	191
1	Notion expérimentale de rayon lumineux	191
2	Aspect ondulatoire	192
2.1	Phénomène ondulatoire	192
2.2	Indice de réfraction d'un milieu	193
2.3	Longueur d'onde	194

3	Lois fondamentales de l'optique géométrique	195
3.1	Cadre de l'approximation de l'optique géométrique	195
3.2	Propagation rectiligne	196
3.3	Retour inverse	196
3.4	Indépendance des rayons lumineux	196
9	Réfraction, réflexion	197
1	Le vocabulaire de l'optique géométrique	197
1.1	Dioptrés et miroirs	197
1.2	Axe optique, plans transverses	197
1.3	Image	197
1.4	Faces d'entrée et de sortie	198
1.5	Réalité et virtualité	198
2	Lois de Descartes	200
2.1	Réflexion	200
2.2	Réfraction	201
2.3	Construction de Descartes	204
3	Cas des milieux stratifiés. Mirages	205
3.1	Réfraction dans un milieu stratifié	205
3.2	Mirages	206
4	Complément : l'arc-en-ciel	208
A	Applications directes du cours	211
10	Stigmatisme et aplanétisme. Dioptrés et miroirs	214
1	Stigmatisme et aplanétisme rigoureux	214
1.1	Définitions	214
1.2	Notion de foyer	214
1.3	Exemple de système rigoureusement stigmatique : le miroir plan	215
2	Stigmatisme et aplanétisme approchés	217
2.1	Stigmatisme approché	217
2.2	Cas du dioptré plan	217
2.3	Conditions de Gauss, optique paraxiale	219
3	Cas du miroir sphérique	221
3.1	Relation de Thalès dans les triangles	221
3.2	Miroirs sphériques	221
3.3	Stigmatisme et aplanétisme approchés du miroir sphérique	222
3.4	Caractère focal des miroirs sphériques dans l'approximation de Gauss. Distance focale	223
3.5	Représentation symbolique des miroirs	224
3.6	Quelques règles de construction préliminaires	224
3.7	Relations avec origine aux foyers, dites relations de Newton	225
3.8	Relation avec origine au centre	226
3.9	Formules de conjugaison avec origine au sommet	227
3.10	Constructions	228
3.11	Complément : Relation de Lagrange-Helmholtz	235

A	Applications directes du cours	237
B	Exercices et problèmes	239
11	Lentilles minces sphériques	242
1	Présentation	242
1.1	Les différentes lentilles	242
1.2	Distance focale, vergence	243
2	Relations de conjugaison	245
2.1	Relations avec origine aux foyers, dites relations de Newton	246
2.2	Relations avec origine au centre, dites relations de Descartes	247
2.3	Complément : Relation de Lagrange - Helmholtz	248
3	Construction	248
3.1	Les règles de construction	248
3.2	Construction d'une image correspondant à un objet	249
3.3	Construction d'un rayon correspondant à un incident	254
3.4	Lentille accolées	255
4	Quelques instruments d'optique	256
4.1	Le microscope	256
4.2	La lunette de Galilée	258
4.3	La lunette astronomique	259
4.4	Conclusion	260
5	Projection d'image et aberrations	260
5.1	Projection d'image	260
5.2	Quelques aberrations	264
A	Applications directes du cours	267
B	Problème	268
12	Instruments de Travaux Pratiques	270
1	L'œil	270
1.1	Description	270
1.2	Caractéristiques	271
1.3	Les défauts de l'œil	272
2	Sources de lumière	274
2.1	Dispositif expérimental de visualisation des spectres par projection	274
2.2	Source de lumière blanche	275
2.3	Lampes spectrales (tube à décharge)	275
2.4	Laser	277
3	Loupes et oculaires	277
3.1	La loupe	277
3.2	L'oculaire	278
4	Lunettes et viseurs	279
4.1	Lunette de visée à l'infini ou afocale	280
4.2	Réglage d'une lunette afocale	281
4.3	Lunettes de visée autocollimatrices	282
4.4	Viseurs ou lunettes à frontale fixe	285

5	Collimateur	286
6	Le goniomètre	287
6.1	Description	287
6.2	Réglage	288
6.3	Mesure de l'angle d'un prisme	294
A	Problème	295
13	T.P. : Focométrie	297
1	Reconnaissance rapide du caractère d'une lentille ou d'un miroir	297
1.1	Miroirs	297
1.2	Lentilles	298
2	Méthode directe	299
2.1	Lentille convergente	299
2.2	Lentille divergente	300
2.3	Miroir concave	301
3	Autocollimation	301
3.1	Lentille convergente	301
3.2	Lentille divergente	302
4	Méthode de Silberman	302
4.1	Lentille convergente	302
4.2	Lentille divergente	303
5	Méthode de Bessel	303
5.1	Lentille convergente	303
6	Méthode de Badal	304
6.1	Lentille divergente	304
7	Méthode des points conjugués	305
7.1	Lentille convergente	305
7.2	Lentille divergente	306
8	Utilisation d'abaques à points alignés	306
8.1	Manipulations	306
8.2	Explication	306
14	T.P. : Spectroscopie à prisme	307
1	Présentation	307
2	Application des lois de Descartes au prisme	307
2.1	Description	307
2.2	Relations du prisme	308
2.3	Dispersion par un prisme	309
2.4	Condition d'émergence par la deuxième face	309
2.5	Existence d'un minimum de déviation	310
2.6	Mesure de l'indice d'un prisme	311
3	Spectromètre à prisme	312

DEUXIÈME PÉRIODE

IV Électrocinétique II

15	Circuits linéaires en régime sinusoïdal forcé	319
1	Caractéristiques d'un signal sinusoïdal	319
1.1	Définition	319
1.2	Amplitude	320
1.3	Pulsation, fréquence et période	320
1.4	Phases	320
1.5	Ensemble des caractéristiques d'un signal sinusoïdal	321
1.6	Valeur efficace	321
1.7	Différence de phase entre deux signaux synchrones	321
2	Intérêt de la notation complexe	322
2.1	Exemple du circuit R, C	322
2.2	Méthode fastidieuse et risquée	324
3	Notation complexe	325
3.1	Signaux complexes ou analytiques associés	325
3.2	Représentation de Fresnel	326
3.3	Addition de signaux de même pulsation	327
3.4	Dérivation de signaux	328
3.5	Intégration de signaux	329
3.6	Utilisation de la notation complexe pour l'étude du circuit R, C	330
4	Lois de Kirchhoff en notation complexe	331
4.1	Validité des lois du continu pour le régime sinusoïdal	331
4.2	Loi des nœuds	332
4.3	Loi des mailles	333
4.4	Lois de Kirchhoff	333
5	Impédance et admittance complexes	334
5.1	Modèles de Thévenin et de Norton	334
5.2	Définition de l'impédance et de l'admittance complexe pour un dipôle linéaire	335
5.3	Impédance et déphasage	336
5.4	Résistance et réactance	336
5.5	Exemples d'impédances	336
5.6	Association de dipôles linéaires	338
6	Loi des nœuds exprimée en termes de potentiels	339
6.1	Expression de la loi des nœuds en termes de potentiels	339
6.2	Complément : théorème de Millman	339
7	Régime sinusoïdal forcé et régime transitoire	341
7.1	Rappels sur les définitions	341
7.2	Régime transitoire et forcé	342
7.3	Importance du régime transitoire : exemple des tubes fluorescents	344
8	Stabilité des circuits du premier et du second ordre (PCSI)	344
8.1	Stabilité d'un circuit	344
8.2	Stabilité des circuits du premier ordre	345
8.3	Stabilité des circuits du second ordre	345

18 Réponse fréquentielle d'un circuit linéaire - Filtres linéaires du premier et du second ordre

1	Notion de quadripôle	385
1.1	Quadripôle	385
1.2	Complément : notion d'impédances d'entrée et de sortie	386
2	Fonction de transfert	387
2.1	Transfert statique	387
2.2	Fonction de transfert en régime sinusoïdal forcé	387
2.3	Cas d'un quadripôle chargé	389
3	Gain	389
3.1	Gain en puissance	390
3.2	Gain en tension	390
4	Étude du comportement en fonction de la fréquence.	
	Diagramme de Bode	391
4.1	Diagramme de Bode	392
4.2	Bande passante	393
5	Filtres du premier ordre	395
5.1	Filtre passe-bas du premier ordre	395
5.2	Filtre passe-haut du premier ordre	401
5.3	Récapitulatif	406
5.4	Composition de filtres d'ordre 1	407
6	Filtres du deuxième ordre (PCSI, PTSI)	410
6.1	Fonction de transfert principale du deuxième ordre. Filtre passe-bas du deuxième ordre	410
6.2	Filtre passe-haut du deuxième ordre	415
6.3	Filtre passe-bande du deuxième ordre	419
6.4	Filtre coupe-bande ou réjecteur de bande du deuxième ordre	425
6.5	Récapitulatif sur les filtres du deuxième ordre	430
7	Lien entre fonction de transfert et équation différentielle.	
	Transformations réciproques	431
A	Applications directes du cours	434
B	Exercices et problèmes	434
19	Étude expérimentale de quelques filtres	439
1	Décomposition harmonique d'un signal	439
1.1	Quelques observations	439
1.2	Fonction périodique et série de Fourier	441
1.3	Analyse harmonique	445
1.4	Remarque sur le contenu spectral	446
1.5	Généralisation	447
2	Analyse harmonique et circuits linéaires	447
2.1	Importance de l'analyse harmonique pour les circuits linéaires	447
2.2	Lien avec les fonctions de transfert et les diagrammes de Bode	448

2.3	Utilisation du diagramme de Bode	449
3	Notion de filtrage	450
3.1	But du filtrage	450
3.2	Filtre idéal	451
3.3	Différents types de filtres	451
3.4	Ordre des filtres	452
4	Résultats du filtrage	453
4.1	Filtrage de la somme de deux sinusoïdes	453
4.2	Filtrage d'un créneau	456
5	Étude d'un filtre sélectif	462
5.1	Analyse théorique du comportement avec la fréquence	462
5.2	Filtrage d'un créneau	464
A	Applications directes du cours	466
B	Exercices et problèmes	466
20	T.P. Cours : Instrumentation électrique	472
1	Générateurs basses fréquences ou G.B.F. (PCSI, PTSI)	472
1.1	Principe	472
1.2	Types de signaux délivrés	472
1.3	Gammes de fréquences	473
1.4	Choix de l'amplitude	473
1.5	Tension de décalage ou d'offset	474
1.6	Résistance interne	474
1.7	Balayage en fréquence ou wobulation	475
2	Alimentations stabilisées (PCSI, PTSI)	475
3	Oscilloscopes	477
3.1	Rappel : principe des oscilloscopes analogiques	477
3.2	Principe des oscilloscopes numériques	478
3.3	Réglages préliminaires d'un oscilloscope	479
3.4	Choix du circuit d'entrée	480
3.5	Modes de fonctionnement	482
3.6	Synchronisation	482
4	Masse et Terre	485
4.1	Définitions	485
4.2	Importance de la Terre pour la sécurité	486
4.3	Risque de court-circuit avec la Terre	486
4.4	Masse et Terre en pratique	486
4.5	Exemple : visualisation de caractéristiques à l'oscilloscope	487
5	Multimètres	488
5.1	Valeurs moyenne et efficace	488
5.2	Description des multimètres	489
5.3	Multimètres RMS et non RMS	489
5.4	Impédance d'entrée des multimètres	490
5.5	Bande passante des multimètres	491

6	Modèles réels des dipôles linéaires passifs	491
6.1	Modèles du condensateur	491
6.2	Modèles d'une bobine réelle	494
6.3	Modèles d'un résistor	495
6.4	En pratique	496
7	Mesure de déphasages	497
7.1	Méthode de Lissajous en XY	497
7.2	Méthode des neuf carreaux	498
7.3	Utilisation d'un phasemètre numérique	499
8	Mesures d'impédances par diviseur de tension	499
8.1	Principe de la mesure	499
8.2	Mesure d'une résistance	499
8.3	Mesure d'une inductance ou d'une capacité	500
A	Applications directes du cours	502
B	Exercices et problèmes	502
21	T.P. Cours : Amplificateur opérationnel	506
1	Modèle de l'amplificateur idéal	506
1.1	Description	506
1.2	Régimes de l'amplificateur opérationnel	507
1.3	Régime saturé	508
1.4	Régime linéaire	508
1.5	Modèle de l'amplificateur opérationnel idéal	509
1.6	Conséquence du caractère idéal sur le régime linéaire	510
2	Deux montages simples	511
2.1	Montage suiveur	511
2.2	Montage amplificateur non inverseur	511
3	Quelques écarts au modèle idéal de l'amplificateur opérationnel	513
3.1	Saturation en tension	513
3.2	Saturation en courant	514
3.3	Comportement en fréquence de l'amplificateur opérationnel réel	515
3.4	Stabilité d'un montage à amplificateur opérationnel - Influence du bouclage (PCSI)	516
3.5	Vitesse de balayage ou slew rate	517
3.6	Tension de décalage ou offset	517
3.7	Courants de polarisation	520
3.8	Impédances d'entrée et de sortie	521
3.9	Schéma de l'amplificateur opérationnel réel	521
4	Montage suiveur	522
4.1	Étude de la stabilité du montage	522
4.2	Étude dans l'hypothèse d'un amplificateur opérationnel idéal	523
4.3	Adaptation d'impédance en tension	523
4.4	Limitation due à la saturation en tension	524
4.5	Impédance d'entrée et impédance de sortie	524

4.6	Influence de la tension d'offset	526
4.7	Influence du slew rate	526
5	Montage amplificateur non inverseur	527
5.1	Étude de la stabilité du montage	527
5.2	Influence du comportement en fréquence de l'amplificateur opérationnel	528
5.3	Validité de l'approximation de l'amplificateur opérationnel idéal . .	530
5.4	Influence de la tension d'offset	531
6	Montages intégrateur et pseudo-intégrateur	531
6.1	Montage intégrateur théorique et amplificateur opérationnel idéal .	531
6.2	Influence de la tension d'offset	532
6.3	Influence des courants de polarisation	534
6.4	Montage pseudo-intégrateur	534
7	Complément : autres exemples de montages simples	536
7.1	Amplificateur inverseur	536
7.2	Montage sommateur	537
7.3	Montage dérivateur	538
8	Comparateurs à amplificateur opérationnel	539
8.1	Comparateur simple	539
8.2	Comparateur à hystérésis	540
9	Complément : multivibrateur astable	544
9.1	Analyse du fonctionnement	545
9.2	Mise en équation du phénomène	545
9.3	Principe de fonctionnement d'un générateur basse fréquence . . .	548
A	Applications directes du cours	549
B	Exercices et problèmes	552
22	Étude expérimentale de quelques circuits à diode (PCSI)	557
1	La diode : un dipôle non linéaire	557
1.1	Caractéristiques externes courant tension	557
1.2	Obtention expérimentale de la caractéristique de la diode	558
1.3	Point de fonctionnement	559
1.4	Résistance différentielle ou dynamique	560
1.5	Modélisation des caractéristiques de la diode	561
1.6	Méthode graphique pour trouver le point de fonctionnement de la diode	562
2	Redressement et filtrage	563
2.1	Redressement monoalternance	564
2.2	Redressement double-alternance	567
2.3	Filtrage avec un condensateur	569
2.4	Détecteur de crête	571
3	Enrichissement du spectre par un dipôle non linéaire	572
4	Multiplieurs analogiques	573
4.1	Multiplication de deux signaux sinusoïdaux	573
4.2	Modulation et démodulation d'amplitude	574

A	Applications directes du cours	577
B	Exercices et problèmes	580

V Mécanique II

23	Compléments de cinématique du point matériel	585
1	Systèmes de coordonnées dans l'espace	585
1.1	Coordonnées cartésiennes	585
1.2	Coordonnées cylindriques	586
1.3	Coordonnées sphériques	590
2	Dérivée d'un vecteur unitaire tournant par rapport à l'angle de rotation	594
2.1	Cas des coordonnées cylindriques	594
2.2	Cas des coordonnées sphériques	595
2.3	Cas général d'un vecteur unitaire	595
3	Expressions de la vitesse et de l'accélération	596
3.1	Coordonnées cartésiennes	596
3.2	Coordonnées cylindriques	596
3.3	Coordonnées sphériques	597
4	Compléments sur le mouvement circulaire	598
4.1	Vecteur rotation	598
4.2	Expression de l'accélération	599
A	Applications directes du cours	600
B	Exercices et problèmes	600
24	Oscillations mécaniques forcées	601
1	Position du problème et équation du mouvement	601
1.1	Entretien des oscillations	601
1.2	Équation du mouvement	601
1.3	Cas d'une excitation sinusoïdale	602
2	Étude de la solution	602
2.1	Régimes libre, transitoire et permanent	602
2.2	Détermination de la solution forcée	604
3	Étude de l'amplitude en fonction de la fréquence - Résonance en amplitude	605
3.1	Notion de résonance	605
3.2	Bande passante	607
4	Résonance en vitesse	608
4.1	Expression de la vitesse	608
4.2	Phénomène de résonance	609
4.3	Bande passante	609

5	Impédance mécanique	610
6	Aspects énergétiques - Résonance en puissance	611
6.1	Expression de la puissance moyenne absorbée par l'oscillateur	611
6.2	Bilan énergétique	611
6.3	Résonance en puissance	611
7	Portrait de phase d'un oscillateur forcé	613
A	Applications directes du cours	615
B	Exercices et problèmes	617
25	Théorème du moment cinétique	619
1	Définition du moment cinétique d'un point matériel	619
1.1	Moment cinétique par rapport à un point	619
1.2	Dépendance du moment cinétique par rapport au point considéré	620
1.3	Moment cinétique par rapport à un axe	620
2	Moment d'une force	621
2.1	Moment d'une force par rapport à un point	621
2.2	Moment d'une force par rapport à un axe	622
3	Théorème du moment cinétique en référentiel galiléen	623
3.1	Théorème du moment cinétique par rapport à un point fixe O	623
3.2	Cas où le point O n'est pas fixe	624
3.3	Théorème du moment cinétique par rapport à un axe	625
4	Exemple d'utilisation du théorème du moment cinétique : le pendule simple	626
4.1	Résolution par le théorème du moment cinétique	626
4.2	Résolution par le principe fondamental de la dynamique	627
4.3	Méthode énergétique	628
4.4	Quelle méthode choisir ?	628
A	Applications directes du cours	629
B	Exercices et problèmes	629
26	Changement de référentiel : aspects cinématiques	632
1	Position du problème	632
1.1	Exemples	632
1.2	Formalisation du problème	633
1.3	Notion de point coïncidant	634
1.4	Lien avec le torseur cinématique d'entraînement vu en Sciences Industrielles	634
1.5	Définitions	635
2	Composition des vitesses	635
2.1	Loi de composition des vitesses	636
2.2	Cas où $\mathcal{R}'$ est en translation par rapport à $\mathcal{R}$	637
2.3	Cas où $\mathcal{R}'$ est en rotation autour d'un axe fixe de $\mathcal{R}$	637
2.4	Cas général	638

3	Composition des accélérations	639
3.1	Loi de composition des accélérations	639
3.2	Cas où $\mathcal{R}'$ est en translation par rapport à $\mathcal{R}$	640
3.3	Cas où $\mathcal{R}'$ est en rotation par rapport à $\mathcal{R}$	640
3.4	Cas général	642
A	Applications directes du cours	644
B	Exercices et problèmes	644
27	Changement de référentiel : aspects dynamiques	646
1	Relativité galiléenne	646
1.1	Infinité de référentiels galiléens	646
1.2	Recherche d'un référentiel galiléen	647
1.3	Principe de relativité de Galilée	649
2	Expression du principe fondamental de la dynamique en référentiel non galiléen	650
2.1	Position du problème	650
2.2	Principe fondamental de la dynamique et forces d'inertie	651
2.3	Cas où $\mathcal{R}'$ est en translation par rapport à $\mathcal{R}$	652
2.4	Cas où $\mathcal{R}'$ est en rotation par rapport à $\mathcal{R}$	652
2.5	Solutions pratiques	652
3	Théorème du moment cinétique en référentiel non galiléen	653
4	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel non galiléen	653
5	Exemple de résolution d'un problème dans un référentiel non galiléen	654
A	Applications directes du cours	657
B	Exercices et problèmes	659
28	Cinétique d'un système de deux points matériels	663
1	Masse et centre d'inertie	663
1.1	Système de deux points matériels	663
1.2	Masse d'un système de deux points matériels	664
1.3	Centre d'inertie	664
2	Éléments dynamiques d'un système de points matériels	664
2.1	Quantité de mouvement	664
2.2	Moment cinétique	665
2.3	Énergie cinétique	666
2.4	Éléments cinétiques d'un système de deux points matériels	666
3	Référentiel barycentrique et théorèmes de Koenig	667
3.1	Référentiel barycentrique	667
3.2	Propriétés fondamentales	668
3.3	Premier théorème de Koenig : moment cinétique dans le référentiel barycentrique	668
3.4	Second théorème de Koenig : énergie cinétique dans le référentiel barycentrique	669

29	Dynamique d'un système de deux points matériels	671
1	Actions extérieures et intérieures	671
1.1	Système de forces	671
1.2	Forces intérieures et forces extérieures	671
1.3	Résultante des forces	672
1.4	Moment résultant des forces	673
2	Théorème de la résultante cinétique	674
2.1	En référentiel galiléen	674
2.2	En référentiel non galiléen	675
2.3	Application au cas d'un système de points matériels isolé	675
3	Théorème du moment cinétique	676
3.1	Par rapport à un point fixe en référentiel galiléen ou non	676
3.2	En référentiel barycentrique	676
4	Puissance et travail d'un système de forces	678
4.1	Expression	678
4.2	Non nullité de la puissance et du travail des forces intérieures	679
4.3	Indépendance de la puissance et du travail des forces intérieures par rapport au référentiel	680
5	Théorème de l'énergie cinétique - Énergie mécanique	681
5.1	Théorème de l'énergie cinétique	681
5.2	Énergie potentielle	682
5.3	Énergie mécanique	685
A	Applications directes du cours	687
B	Exercices et problèmes	687
30	Systèmes de deux points matériels isolés	688
1	Décomposition du mouvement	688
1.1	Mouvement du centre d'inertie	688
1.2	Mouvement relatif	689
2	Référentiel barycentrique et éléments dynamiques	690
2.1	Référentiel barycentrique	690
2.2	Expression des quantités de mouvement dans $\mathcal{R}^*$	690
2.3	Masse réduite	691
2.4	Expression du moment cinétique du système dans $\mathcal{R}^*$	692
2.5	Expression de l'énergie cinétique du système dans $\mathcal{R}^*$	692
3	Particule fictive	692
3.1	Définition	692
3.2	Éléments dynamiques	693
3.3	Conséquences	693
4	Lois de conservation et conséquences	694
4.1	Hypothèse d'un système isolé	694
4.2	Caractère galiléen du référentiel barycentrique	694
4.3	Trajectoires	695

4.4	Conservation du moment cinétique	695
4.5	Conséquences de la conservation du moment cinétique	696
4.6	Forces conservatives et conservation de l'énergie	697
5	Analyse qualitative du mouvement	698
5.1	Énergie potentielle effective	698
5.2	Puits d'énergie potentielle effective	698
5.3	Barrière d'énergie potentielle effective	700
5.4	Intérêt de cette approche	701
A	Applications directes du cours	702
B	Exercices et problèmes	702
31	Mouvement à force centrale et potentiel newtonien	708
1	Force centrale conservative	708
1.1	Définitions	708
1.2	Conservation du moment cinétique	709
1.3	Mouvement plan	710
1.4	Constante des aires	710
1.5	Conservation de l'énergie mécanique	711
1.6	Énergie potentielle effective et étude qualitative du mouvement	712
1.7	Trajectoire	712
2	Potentiel newtonien	713
2.1	Interaction newtonienne	713
2.2	Expression de l'énergie potentielle newtonienne	713
2.3	Interaction attractive ou répulsive	714
2.4	Discussion qualitative du mouvement	714
3	Détermination de l'expression de la trajectoire (MPSI, PCSI)	716
3.1	Établissement de la trajectoire à partir du vecteur excentricité	716
3.2	Établissement de la trajectoire par la conservation de l'énergie mécanique	718
3.3	Établissement de la trajectoire à partir de l'invariant de Runge-Lenz ou de Laplace	719
3.4	Établissement de la trajectoire par les formules de Binet	720
3.5	Conclusion	722
4	Discussion sur la nature du mouvement (MPSI, PCSI)	722
4.1	À partir de la courbe de l'énergie potentielle effective	722
4.2	À partir de la valeur de l'excentricité	723
4.3	À partir de la valeur de l'énergie mécanique	723
5	Mouvement des planètes - Lois de Kepler	724
5.1	Énoncé des lois de Kepler	724
5.2	Étude de la trajectoire circulaire	726
5.3	Caractéristiques du mouvement elliptique (MPSI, PCSI)	728
5.4	Expression de l'énergie mécanique (MPSI, PCSI)	729
5.5	Période de révolution (MPSI, PCSI)	730
5.6	Troisième loi de Kepler (MPSI, PCSI)	730
5.7	Variation de la vitesse sur la trajectoire (MPSI, PCSI)	731

6	Quelques remarques sur le mouvement des satellites (MPSI, PCSI)	732
6.1	Position du problème	732
6.2	Vitesse circulaire ou première vitesse cosmique	732
6.3	Vitesse de libération ou seconde vitesse cosmique	733
6.4	Troisième vitesse cosmique	734
6.5	Rayon de la trajectoire d'un satellite géostationnaire	736
A	Applications directes du cours	737
B	Exercices et problèmes	738
32	Quelques aspects de la mécanique terrestre (PCSI)	741
1	Interaction gravitationnelle	741
1.1	Force gravitationnelle	741
1.2	Champ gravitationnel	742
2	Champ de pesanteur terrestre	743
2.1	Référentiel terrestre	743
2.2	Bilan des forces dans le référentiel terrestre	744
2.3	Définition du poids d'un corps	745
2.4	Expression de la force d'inertie d'entraînement	745
2.5	Expression du champ de pesanteur terrestre	746
2.6	Importance relative des différents termes	747
2.7	Principe fondamental de la dynamique dans le référentiel terrestre	749
3	Terme de marée	749
3.1	Définition	749
3.2	Ordres de grandeur	751
3.3	Déformations de la surface de la Terre	752
3.4	Existence des marées semi-diurnes	754
3.5	Marées de mortes et de vives eaux	754
3.6	Marées d'équinoxe	756
3.7	Phénomène de résonance	756
3.8	Marées, anneaux planétaires et limite de Roche	756
4	Exemple de l'influence de la force de Coriolis : déviation vers l'est	757
4.1	Équation du mouvement	757
4.2	Ordre de grandeur de la force de Coriolis	758
4.3	Déviation vers l'Est	758
4.4	Ordre de grandeur de la déviation	759
4.5	Déviation Nord-Sud	759
A	Applications directes du cours	761
B	Exercices et problèmes	761
VI Thermodynamique		
Préliminaires		769
33	Généralités sur les systèmes thermodynamiques	771
1	Notions de base	771
1.1	Système thermodynamique	771
1.2	Les différentes descriptions	772

1.3	Équilibre thermodynamique	773
1.4	Densité d'un système	774
1.5	Pression	774
2	Température	775
2.1	Équilibre thermique	775
2.2	Repérage de la température	776
2.3	Échelles centésimales linéaires	776
2.4	Propriétés des gaz aux faibles pressions	778
2.5	Température absolue	779
2.6	Mesure des températures	780
3	Équation d'état	781
3.1	Variables d'état	781
3.2	Équation d'état	782
3.3	Gaz parfait	783
3.4	Écart au gaz parfait ; gaz réels	783
3.5	Coefficients thermoélastiques	785
A	Applications directes du cours	787
B	Exercices et problèmes	788
34	Statique des fluides dans le champ de pesanteur	790
1	Définition	790
2	Pression d'un fluide soumis au champ de pesanteur	791
2.1	Relation fondamentale de la statique des fluides	791
2.2	Fluide incompressible et homogène	793
2.3	Validité du modèle incompressible	794
2.4	Applications de la statique des fluides incompressibles	795
2.5	Gaz parfait : atmosphère isotherme	797
2.6	Conclusion	799
3	Actions exercées par les fluides au repos. Poussée d'Archimède	799
3.1	Théorème d'Archimède	799
3.2	Quelques applications de la poussée d'Archimède	802
3.3	Cas où on ne peut pas appliquer la poussée d'Archimède	803
A	Applications directes du cours	805
B	Exercices et problèmes	807
35	Interprétation microscopique de T et P. Énergie interne. Cas du gaz parfait monoatomique	812
1	Les hypothèses	812
1.1	Propriétés du gaz	812
1.2	Valeurs moyennes	814
2	Calcul de la pression	815
2.1	Présentation du modèle	815
2.2	Modèle simplifié avec choc frontal	816

3	Température cinétique	818
4	Énergie interne	819
4.1	Cas du gaz parfait monoatomique	819
4.2	Extension aux gaz parfaits polyatomiques	820
4.3	Interprétation de l'expression de l'énergie interne	820
4.4	Cas du gaz de Van der Waals	822
4.5	Extension aux solides et liquides peu compressibles	823
A	Applications directes du cours	824
B	Exercices et problèmes	825
36	Premier principe	827
1	Premier principe – Énergie interne	827
1.1	Énergie interne – Énergie totale	827
1.2	Énoncé du premier principe de la thermodynamique	828
1.3	Convention d'orientation du système	830
1.4	Délimitation du système	830
2	Transformations d'un système thermodynamique	831
2.1	Cas général	831
2.2	Transformations quasi-statiques	832
2.3	Transformations réversibles	834
3	Expression du travail	835
3.1	Système soumis à des forces de pression extérieures	835
3.2	Représentation graphique	837
3.3	Cas d'une transformation isochore	839
3.4	Travail électrique	839
4	Enthalpie	839
4.1	Transformation monobare et transformation isobare	839
4.2	Définition de l'enthalpie	840
4.3	Capacité thermique à pression constante	841
37	Applications du premier principe	844
1	Calorimétrie	844
1.1	Méthode des mélanges ; détermination de la capacité thermique d'un solide	845
1.2	Méthode électrique	845
1.3	Cas d'un changement d'état	846
2	Transformations d'un gaz parfait	848
2.1	Transformation quasi-statique isotherme d'un gaz parfait	848
2.2	Transformation quasi-statique isochore d'un gaz parfait	849
2.3	Transformation quasi-statique isobare d'un gaz parfait	849
2.4	Transformation quasi-statique adiabatique d'un gaz parfait	850
2.5	Comparaison des pentes d'une isotherme et d'une adiabatique dans le diagramme de Watt (P, V)	851
2.6	Cycle de Carnot réversible d'un gaz parfait	852

3	Travail fourni par un opérateur lors du déplacement d'un piston .	854
4	Détente de Joule-Gay Lussac	855
4.1	Description de l'expérience	855
4.2	Cas du gaz parfait	856
4.3	Cas du gaz de Van der Waals	857
5	Détente de Joule - Thomson ou Joule - Kelvin	858
5.1	Étude de la détente	858
5.2	Cas d'un gaz parfait	861
5.3	Cas d'un gaz de Van der Waals	861
6	Récapitulatif : utiliser U ou H	862
A	Applications directes du cours	863
B	Exercices et problèmes	865
38	Deuxième principe de la thermodynamique	870
1	Nécessité d'un second principe. Limites du premier principe . . .	870
2	Réversibilité - Irréversibilité	871
2.1	Énoncé du deuxième principe	873
2.2	Conséquences immédiates	873
3	Température et pression thermodynamique	874
3.1	Température thermodynamique	874
3.2	Pression thermodynamique	876
3.3	Identité thermodynamique	878
3.4	Cas d'une transformation réversible	878
4	Exemples de calculs d'entropie	879
4.1	Entropie d'un gaz parfait	879
4.2	Variation d'entropie d'un gaz parfait lors de quelques transformations simples	880
4.3	Refroidissement ou échauffement d'un corps	881
4.4	Notion de thermostat ou source de chaleur	882
4.5	Analyse du système global thermostat - corps en contact	884
4.6	Compression isotherme d'un gaz parfait	886
4.7	Détentes de gaz parfait	889
5	Relation de Clausius	890
A	Applications directes du cours	892
B	Exercices et problèmes	894
39	Interprétation statistique de l'entropie (PCSI)	897
1	Microétat et macroétat	897
2	État macroscopique le plus probable	898
3	Entropie statistique	901
3.1	Définition et propriétés	901
3.2	L'entropie statistique est-elle celle du deuxième principe ?	902

4	Troisième principe de la thermodynamique	904
5	Complément : entropie et information	904
40	Équilibre d'un corps pur sous plusieurs phases	906
1	Généralités	906
1.1	Solide, liquide, vapeur	906
1.2	Utilisation des changements d'états	907
1.3	Variétés allotropiques	908
1.4	Retard au changement d'état et état métastable	908
2	Diagramme d'équilibre	909
2.1	Diagramme pression, température : (P,T)	909
2.2	Diagramme de Clapeyron pour l'équilibre liquide-vapeur	912
2.3	Titres massiques et molaires (PCSI)	913
2.4	Expérience des tubes de Natterer	915
2.5	Pression de vapeur saturante	916
2.6	Exemples	918
3	Les fonctions d'état	919
3.1	Enthalpie massique de changement d'état	919
3.2	Variation de l'enthalpie de vaporisation l_V avec la température	920
3.3	Capacité thermique du liquide saturant seul	921
3.4	Calcul de l'enthalpie en un point du mélange	922
3.5	Calcul de l'énergie interne en un point du mélange	924
3.6	Calcul de l'entropie en un point du mélange	924
4	Expression des fonctions d'états à partir de valeurs tabulées	925
A	Applications directes du cours	926
B	Exercices et problèmes	926
41	Machines thermiques	931
1	Description	931
2	Machine monotherme	932
2.1	Travail maximal récupérable	932
2.2	Principe de Carnot (1824)	933
3	Étude d'une machine ditherme	933
3.1	Inégalité de Clausius (vers 1850)	933
3.2	Diagramme de Raveau	935
4	Exemples de machines dithermes	937
4.1	Moteur thermique	937
4.2	Machine frigorifique et pompe à chaleur	938
4.3	Tableau récapitulatif	942
5	Autres exemples de machines thermiques	942
5.1	Machine avec écoulement de fluide	942
5.2	Cas où le cycle n'est pas fermé	945
5.3	Moteur à essence	946

5.4	Moteur Diesel	948
5.5	Cycle de Rankine	949
5.6	Cycle de Hirn	951
A	Applications directes du cours	952
B	Exercices et problèmes	953

VII Électromagnétisme

Préliminaires (Électrostatique)	961
--	------------

42 Charge électrique et distributions de charges	963
---	------------

1	Distributions de charges	963
1.1	Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique	964
1.2	Densité volumique de charges	965
1.3	Densité surfacique de charges	965
1.4	Densité linéique de charges	966
1.5	Charges ponctuelles	967
2	Déplacements, surfaces et volumes élémentaires	967
2.1	Coordonnées cartésiennes	967
2.2	Coordonnées cylindriques	968
2.3	Coordonnées sphériques	969
3	Invariances par transformation géométrique	969
3.1	Invariance par translation	969
3.2	Invariance par rotation	970
3.3	Remarque fondamentale	972
3.4	Invariances et choix des coordonnées	972
A	Applications directes du cours	973

43 Champ électrostatique	974
---------------------------------	------------

1	Loi de Coulomb	974
1.1	Influence de la distance	974
1.2	Principe des actions réciproques	974
1.3	Énoncé de la loi de Coulomb	975
1.4	Principe de superposition	975
1.5	Définition expérimentale de la charge	976
2	Notion de champ	977
2.1	Définition	977
2.2	Champ uniforme	977
2.3	Champ stationnaire	977
3	Définition du champ électrostatique	977
3.1	Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle	977
3.2	Application du principe de superposition	978
3.3	Champ créé par une distribution quelconque de charges	978
4	Analogie avec le champ de gravitation	980
4.1	Rappel : force de gravitation	980
4.2	Champ de gravitation	981

5	Invariances, symétries et propriétés du champ	982
5.1	Principe de Curie	982
5.2	Conséquences des invariances de la distribution	982
5.3	Invariance des lois de l'électrostatique	983
5.4	Symétries des sources par rapport à un plan	984
5.5	Plans de symétrie et d'antisymétrie des sources	985
5.6	Distribution ayant un plan de symétrie	986
5.7	Distribution ayant un plan d'antisymétrie	987
5.8	Caractère polaire du champ électrostatique	988
5.9	Application au champ gravitationnel	988
6	Application au champ électrostatique créé par un segment dans son plan médiateur ou par un fil infini uniformément chargé . . .	988
6.1	Champ créé par un segment uniformément chargé dans son plan médiateur	988
6.2	Champ électrostatique créé par un fil infini uniformément chargé .	990
A	Applications directes du cours	992
B	Exercices et problèmes	993
44	Propriétés du champ électrostatique	994
1	Flux du champ électrostatique - Théorème de Gauss	994
1.1	Flux d'un champ de vecteurs	994
1.2	Flux du champ électrostatique créé par une charge ponctuelle . . .	997
1.3	Théorème de Gauss	999
2	Circulation du champ électrostatique - Potentiel électrostatique . .	1002
2.1	Circulation d'un champ de vecteurs	1002
2.2	Notion de gradient d'une fonction scalaire	1003
2.3	Potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle	1004
2.4	Potentiel électrostatique d'une distribution quelconque	1006
2.5	Continuité du potentiel	1008
2.6	Conséquences des symétries des distributions sur le potentiel électrostatique	1009
3	Énergie électrostatique	1010
3.1	Énergie potentielle d'interaction	1010
3.2	Énergie électrostatique	1012
3.3	Énergie électrostatique propre d'un système de deux charges . . .	1014
4	Topographies du champ et du potentiel électrostatiques	1015
4.1	Topographie du champ électrostatique	1015
4.2	Lignes de champ	1015
4.3	Equipotentiels	1016
4.4	Propriétés des lignes de champ et des équipotentiels	1016
4.5	Exemple de topographie d'un champ	1018
A	Applications directes du cours	1020
B	Exercices et problèmes	1021

45 Exemples de champs et potentiels électrostatiques	1024
1 Méthodes de calcul	1024
1.1 Démarche générale	1024
1.2 Calcul direct de l'intégrale vectorielle	1025
1.3 Passage par le potentiel	1026
1.4 Passage par le théorème de Gauss	1026
2 Champ et potentiel créés par une sphère uniformément chargée en volume	1027
2.1 Analyse des invariances	1027
2.2 Analyse des symétries	1027
2.3 Choix de la surface de Gauss	1028
2.4 Calcul	1028
2.5 Détermination du potentiel	1029
2.6 Analogie avec le champ gravitationnel	1031
3 Champ et potentiel créés par un cylindre ou un fil uniformément chargé	1032
3.1 Analyse des invariances	1033
3.2 Analyse des symétries	1033
3.3 Choix de la surface de Gauss	1034
3.4 Calcul pour le fil	1034
3.5 Calcul pour le cylindre	1034
3.6 Détermination du potentiel pour le cylindre	1035
4 Champ et potentiel créés par un plan uniformément chargé	1036
4.1 Analyse des invariances	1036
4.2 Analyse des symétries	1036
4.3 Détermination de la surface de Gauss	1037
4.4 Calcul	1037
4.5 Détermination du potentiel	1038
4.6 Application au condensateur plan	1039
4.7 Analyse des discontinuités	1041
5 Champ et potentiel créés par un disque uniformément chargé le long de son axe	1043
5.1 Analyse des invariances	1044
5.2 Analyse des symétries	1044
5.3 Calcul direct	1044
5.4 Lien entre champ et potentiel	1045
5.5 Courbes représentatives et commentaires	1046
A Exercices et problèmes	1047
46 Dipôle électrostatique (MPSI, PCSI)	1050
1 Définition, potentiel et champ créés	1050
1.1 Définition du dipôle électrostatique	1050
1.2 Moment dipolaire	1050
1.3 Potentiel électrostatique créé par un dipôle	1051

1.4	Champ électrostatique créé par un dipôle	1052
1.5	Lignes de champ et équipotentiellles	1054
2	Action d'un champ extérieur sur un dipôle	1056
2.1	Cas d'un champ uniforme	1056
2.2	Cas d'un champ non uniforme	1058
2.3	Énergie potentielle d'un dipôle dans un champ électrostatique exté- rieur (PCSI)	1061
3	Complément : approximation dipolaire	1065
3.1	Position du problème	1065
3.2	Potentiel électrostatique créé par une distribution de charges ponctuelles en un point éloigné	1065
3.3	Distribution unipolaire	1066
3.4	Distribution dipolaire	1067
3.5	Distribution quadripolaire	1067
3.6	Application à l'étude des molécules	1068
A	Exercices et problèmes	1070
Préliminaires (magnétostatique)		1072
47	Courant électrique et distributions de courants	1074
1	Courant électrique	1074
1.1	Définition du courant électrique	1074
1.2	Divers types de courants électriques	1075
1.3	Intensité électrique	1076
2	Densité de courant	1076
2.1	Définition de la densité de courant	1076
2.2	Lignes et tubes de courant	1078
2.3	Cas du régime stationnaire	1078
2.4	Différentes distributions de courant	1079
3	Invariances d'une distribution de courants	1081
3.1	Invariance par translation	1081
3.2	Invariance par rotation	1081
A	Applications directes du cours	1082
48	Champ magnétique créé par des courants permanents	1083
1	Définition du champ magnétique	1083
1.1	Observations expérimentales des actions magnétiques	1083
1.2	Force de Lorentz	1084
1.3	Ordres de grandeur	1084
1.4	Principe de superposition	1084
2	Propriétés de symétrie du champ magnétique et conséquences . .	1085
2.1	Invariances des lois de la magnétostatique	1085
2.2	Caractère axial du champ magnétique - Notion de pseudo-vecteur .	1085
2.3	Distribution présentant un plan de symétrie	1087
2.4	Distribution présentant un plan d'antisymétrie	1088

3	Loi de Biot et Savart	1090
3.1	Énoncé de la loi de Biot et Savart	1090
3.2	Complément : cas d'une charge en mouvement	1091
3.3	Application : cas du fil rectiligne infini	1091
4	Interactions magnétiques	1093
4.1	Action d'un champ magnétique sur une particule chargée	1093
4.2	Force de Laplace	1093
4.3	Définition légale de l'ampère	1093
A	Applications directes du cours	1095
B	Exercices et problèmes	1096
49	Propriétés du champ magnétique	1097
1	Conservation du flux	1097
1.1	Cas du fil rectiligne infini	1097
1.2	Cas d'un élément de courant	1098
1.3	Généralisation	1098
2	Circulation du champ magnétique - Théorème d'Ampère	1099
2.1	Exemple du fil rectiligne infini	1099
2.2	Énoncé du théorème d'Ampère	1100
3	Topographie	1100
3.1	Lignes de champ	1100
3.2	Propriétés des lignes de champ	1101
3.3	Conséquence sur le flux	1101
3.4	Conséquence sur la circulation	1102
3.5	Exemples de topographie d'un champ	1102
A	Applications directes du cours	1105
B	Exercices et problèmes	1106
50	Exemples de champs magnétiques	1108
1	Méthodes de calculs	1108
1.1	Démarche générale	1108
1.2	Calcul direct par la loi de Biot et Savart	1109
1.3	Utilisation du théorème d'Ampère	1109
2	Fil rectiligne infini	1110
2.1	Étude des invariances	1110
2.2	Étude des symétries	1110
2.3	Calcul de la norme du champ magnétique	1111
2.4	Topographie	1111
2.5	Complément : cas où on ne néglige plus la section du fil	1112
3	Spire circulaire	1113
3.1	Symétries et invariances pour un point quelconque	1113
3.2	Symétries et invariances pour un point de l'axe	1113
3.3	Calcul de la valeur du champ par la loi de Biot et Savart	1114
3.4	Topographie du champ magnétique créé par la spire	1115
3.5	Application aux bobines de Helmholtz	1116

4	Bobine torique	1118
4.1	Étude des invariances	1118
4.2	Étude des symétries	1118
4.3	Calcul du champ par le théorème d'Ampère	1119
5	Solénoïde	1119
5.1	Calcul du champ magnétique sur l'axe	1119
5.2	Analyse des variations le long de l'axe	1121
5.3	Topographie du solénoïde de longueur finie	1123
5.4	Cas d'un solénoïde infini	1123
6	Complément : nappe plane de courant	1126
6.1	Étude des invariances	1126
6.2	Étude des symétries	1126
6.3	Calcul du champ par le théorème d'Ampère	1127
A	Applications directes du cours	1129
B	Exercices et problèmes	1129
51	Dipôle magnétique (PCSI)	1133
1	Définitions	1133
1.1	Moment magnétique	1133
1.2	Expérience d'Oersted	1134
1.3	Quelques ordres de grandeur de moment magnétique	1134
1.4	Dipôle magnétique	1135
2	Champ magnétique créé par un dipôle magnétique	1135
2.1	Champ magnétique créé par une boucle de courant	1135
2.2	Topographie du champ « loin » du dipôle magnétique	1136
2.3	Champ magnétique créé par un dipôle magnétique	1137
3	Complément : action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique	1138
3.1	Résultante exercée sur un dipôle	1138
3.2	Moment exercé sur un dipôle	1139
3.3	Énergie potentielle d'un dipôle dans un champ magnétique	1139
A	Applications directes du cours	1140
B	Exercices et problèmes	1140
52	Comparaison des propriétés des champs électrostatique et magnétique	1142
1	Définitions des champs	1142
2	Flux	1142
3	Circulation	1142
4	Expression à partir de ses sources	1143
5	Propriétés de symétrie	1143
5.1	Distributions ayant un plan de symétrie	1143
5.2	Distributions ayant un plan d'antisymétrie	1145

6	Récapitulatif des propriétés des champs électrostatique et magnétique	1145
7	Dipôles électrostatique et magnétique	1146
53	Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	1147
1	Force de Lorentz	1147
1.1	Rappel de l'expression	1147
1.2	Ordre de grandeur et conséquences	1148
2	Mouvement dans un champ électrique	1149
2.1	Équation du mouvement	1149
2.2	Étude de la trajectoire	1150
2.3	Accélération d'une particule chargée par un champ électrique . . .	1152
2.4	Déviation d'une particule chargée par un champ électrique . . .	1154
2.5	Application à l'oscilloscope	1156
3	Mouvement d'une particule chargée dans un métal - modèle de la loi d'Ohm locale	1157
3.1	Mouvement d'une particule chargée dans un métal	1157
3.2	Interprétation de la loi d'Ohm locale	1158
3.3	Lien avec la loi d'Ohm intégrale	1160
4	Mouvement dans un champ magnétique	1161
4.1	Équation du mouvement - fréquence cyclotron	1161
4.2	Travail de la force magnétique	1162
4.3	Étude de la trajectoire	1163
4.4	Déviation d'une particule chargée par un champ magnétique . . .	1170
4.5	Application à la télévision et aux moniteurs d'ordinateur	1171
5	Mouvement dans un champ électrique et magnétique	1171
5.1	Expérience de Thomson	1171
5.2	Spectromètre de masse	1173
5.3	Cyclotron	1175
6	Effet Hall	1176
6.1	Étude du phénomène	1176
6.2	Interprétation de la force de Laplace	1179
6.3	Application à la mesure de champ magnétique	1180
A	Applications directes du cours	1181
B	Exercices et problèmes	1181
	Solutions des exercices	1183
	Index	1491