



Classes préparatoires
scientifiques

Physique

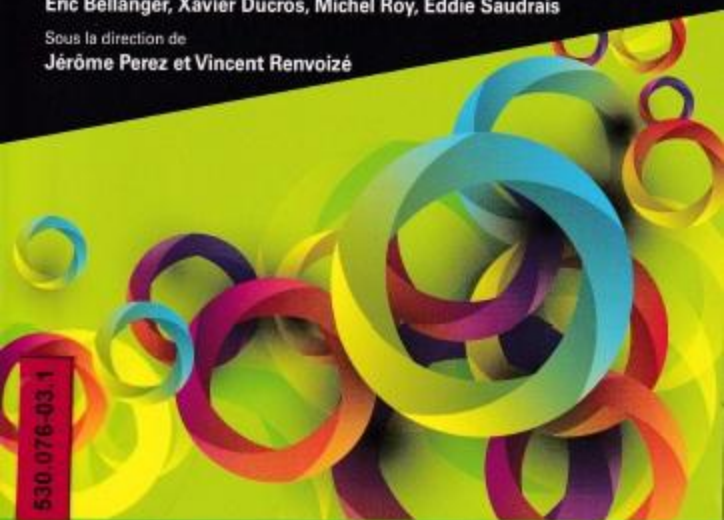
MPSI-PCSI-PTSI

Programme 2013

Éric Bellanger, Xavier Ducros, Michel Roy, Eddie Saudrais

Sous la direction de

Jérôme Perez et Vincent Renvoizé



530.076-03.1

Avant-propos

CET OUVRAGE est un cours de physique destiné à servir de support et de guide aux élèves des classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques. Il a été conçu de façon que les étudiants puissent mettre en pratique et développer leurs acquis à travers de nombreux exercices, dont la correction a été particulièrement soignée.

La tonalité générale de l'ouvrage s'inscrit directement dans l'état d'esprit du nouveau programme : les notions sont abordées progressivement, les outils mathématiques utiles sont présentés au fil des besoins, l'approche documentaire a été fondue dans les différents chapitres et de nombreuses références historiques émaillent le discours.

Dans chaque chapitre, le lecteur trouvera dans un premier temps des définitions très souvent associées à des faits expérimentaux. Il se verra ensuite proposer une démarche synthétique le menant vers des lois, des théorèmes ou des principes. Les nombreuses applications envisagées dans le cadre du nouveau programme seront alors présentées. Le lecteur pourra enfin contrôler ses acquis en résolvant des exercices illustratifs, très progressifs et corrigés de façon détaillée. Tout au long de l'ouvrage, il s'habitue à un grand nombre de balises clairement identifiées : « Rappel », « Synthèse », « Méthode », « Attention », qui lui permettront d'ancrer son apprentissage. Chaque partie se conclut par un formulaire précis des notions abordées.

Les quatre parties de l'ouvrage traitent, dans l'ordre préconisé, les thèmes prévus au nouveau programme de première année des classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques dans les filières MPST, PCST et PTST.

◊ **La partie I – SIGNAUX PHYSIQUES** – met l'accent sur les signaux sinusoïdaux, qui jouent un rôle central dans l'approche des systèmes linéaires. Elle s'appuie sur une démarche inductive dans l'esprit du nouveau programme. On a recours au formalisme seulement lorsqu'il est nécessaire ; on dégage les similitudes de comportement entre systèmes analogues par une mise en équation pertinente utilisant variables réduites et paramètres caractéristiques adimensionnés ; on réalise des constructions graphiques claires pour appuyer un raisonnement ou un calcul. Cette partie contient, par exemple, l'introduction au monde quantique envisagée par le nouveau programme. Celle-ci est construite dans une démarche constructive à partir de l'interprétation des expériences fondatrices.

◊ **La partie II – MÉCANIQUE** – prend racine dans l'étude du mouvement du point matériel pour présenter certaines des notions les plus fondamentales de la physique, comme la vitesse, la force, le moment cinétique et l'énergie. À partir de situations simples, elle analyse certains modèles fondamentaux, comme le mouvement des planètes dans les champs de gravitation ou celui d'une particule chargée dans un champ électromagnétique stationnaire. Elle aborde également l'étude mécanique des solides indéformables dans les cas de mouvements simples prévus au programme.

◊ **La partie III – THERMODYNAMIQUE** – formalise l'étude des échanges énergétiques déjà abordée au lycée. Les principes de la thermodynamique sont présentés sur des situations simples (calorimétrie, compressions ou détente de gaz parfaits) et sont progressivement appliqués à des situations plus complexes, pour aboutir à l'étude des machines thermiques (moteurs, réfrigérateurs, etc.).

◊ **La partie IV – INDUCTION ET FORCES DE LAPLACE** – détaille les propriétés du champ magnétique ainsi que ses effets sur les circuits électriques. Les phénomènes d'induction électromagnétique, décrits par la loi de Faraday, sont ensuite étudiés sur des géométries simples qui illustrent leurs nombreuses applications dans la vie courante (moteurs et générateurs électriques, cartes RFID, etc.).

Même si cet ouvrage s'adresse à des étudiants préparant un concours, il demeure avant tout un manuel de physique, et donc de philosophie naturelle. Les auteurs espèrent que les lecteurs sauront découvrir cette science passionnante dans l'enchaînement constructif proposé par le nouveau programme.

Les programmes de première année de CPGE diffèrent un peu d'une filière à l'autre. Celui de PTSI est très proche de celui de MPSL. Les notions propres à chacun des programmes MPSI et PCSI ont été clairement indiquées, en général à l'aide d'un triangle noté MP ou PC.

Table des matières

Avant-propos	v
Les auteurs	vii
Partie I Signaux physiques	1
1 Oscillateur harmonique	3
I Introduction, définitions	3
I.1 Exemple	3
I.2 Caractérisation du mouvement	3
II Oscillateur harmonique masse-ressort	5
II.1 Loi de Hooke	6
II.2 Mise en équation de l'oscillateur	8
II.3 Résolution de l'équation différentielle	10
II.4 Conservation de l'énergie	10
III Exercices	12
2 Propagation d'un signal	13
I Quelques définitions	13
II Propriétés générales des ondes mécaniques	14
II.1 Direction de propagation	14
II.2 Propriété d'une onde progressive monodimensionnelle	15
II.3 Superposition de deux ondes progressives	18
III Ondes sinusoïdales progressives	19
III.1 Propriétés générales	19
III.2 Double périodicité	19
IV Interférences à deux ondes	21
IV.1 Front d'onde - Onde plane	21
IV.2 Interférences	22
V Ondes stationnaires	27
V.1 Réflexion d'une onde progressive	27
V.2 Conditions aux limites : onde stationnaire	28
V.3 Corde fixée à ses deux extrémités : modes de vibration	29
VI Diffraction d'une onde	32
VI.1 Phénomène de diffraction	32
VI.2 Fentes de Young en lumière monochromatique	34
VII Exercices	38

3	Optique géométrique	43
I	Cadre de l'étude	43
	I.1 Onde lumineuse	43
	I.2 Approximation de l'optique géométrique, rayon lumineux	45
	I.3 Sources de lumière	46
II	Lois de Snell-Descartes	49
	II.1 Réflexion	49
	II.2 Réfraction	50
	II.3 Conséquences immédiates	52
III	Formation des images; conditions de Gauss	54
	III.1 Stigmatisme rigoureux	54
	III.2 Objet et image; nature réelle ou virtuelle	55
	III.3 Stigmatisme approché des systèmes centrés, aplanétisme	57
	III.4 Aberrations	58
IV	Lentilles minces	60
	IV.1 Définitions	60
	IV.2 Relations de conjugaison, grandissements	62
	IV.3 Constructions géométriques pour les lentilles	63
	IV.4 Correspondance objet-image	66
	IV.5 Présentation rudimentaire du fonctionnement de l'œil	70
	IV.6 Quelques notions sur l'appareil photographique	71
V	Exercices	72
4	Introduction au monde quantique	83
I	Physique classique et physique quantique	83
II	L'effet photoélectrique	86
	II.1 Description de l'expérience	86
	II.2 Face à l'expérience	87
	II.3 Les incohérences de l'interprétation classique	88
	II.4 L'hypothèse d'Einstein sur la quantification du rayonnement	88
	II.5 La nature singulière du photon	89
III	Expériences à une particule	92
	III.1 Les outils d'observation	92
	III.2 Expériences préliminaires	92
	III.3 Expériences interférométriques	94
	III.4 Un début de modèle mathématique	97
IV	Inégalités de Heisenberg spatiales	100
	IV.1 Dispositif des trous de Young	100
	IV.2 Principe d'indétermination de Heisenberg	102
	IV.3 Application à l'oscillateur harmonique quantique	104
V	Confinement d'une particule libre	106
	V.1 Étude d'une particule libre	106
	V.2 Confinement de la particule	107
VI	Exercices	109
5	Circuits électriques dans l'ARQS	111
I	Courant électrique	111
	I.1 Courant électrique et porteurs de charges	111
	I.2 Intensité du courant électrique	112
II	Tension et potentiel	113

III	Lois de Kirchhoff, ARQS	114
III.1	Réseau	114
III.2	Loi des nœuds, ARQS	115
III.3	Loi des mailles	117
IV	Puissance et conventions pour les dipôles	118
IV.1	Puissance reçue - Convention récepteur	118
IV.2	Convention générateur	119
V	Dipôles linéaires classiques	119
V.1	Résistance	120
V.2	Condensateur	121
V.3	Bobine	123
VI	Association de résistances	124
VI.1	Lois d'associations de résistances	124
VI.2	Diviseurs de tension et de courant	126
VII	Modélisation linéaire d'une source	128
VII.1	Sources idéales de tension et de courant	128
VII.2	Sources réelles de tension et de courant	129
VII.3	Représentation équivalente de Thévenin	130
VIII	Point de fonctionnement	132
VIII.1	Caractéristique courant-tension d'un dipôle	132
VIII.2	Dipôles symétriques et polarisés	133
VIII.3	Point de fonctionnement d'un dipôle non linéaire	133
IX	Exercices	134
6	Circuit linéaire du premier ordre	139
I	Échelon de tension, notion de régime transitoire	139
I.1	Définition d'un échelon	139
I.2	Étude qualitative de deux circuits	139
II	Étude analytique du circuit RC	142
II.1	Tension aux bornes du condensateur	142
II.2	Courant électrique dans le circuit	143
II.3	Bilan énergétique	144
III	Étude analytique du circuit RL	146
III.1	Tension aux bornes de la bobine et courant	146
III.2	Aspects énergétiques	147
IV	Exercices	148
7	Oscillateurs amortis	151
I	Régime transitoire d'un oscillateur amorti	151
I.1	Analogies entre oscillateurs électrique et mécanique	151
I.2	Régime libre d'un oscillateur amorti	155
I.3	Étude analytique d'un oscillateur soumis à un échelon	158
II	Régime sinusoïdal forcé, impédances complexes	164
II.1	Signaux sinusoïdaux	164
II.2	Représentation de Fresnel	168
II.3	Représentation complexe	170
II.4	Impédance et admittance complexes	172

III	Excitation sinusoïdale d'un oscillateur	176
III.1	Présentation	176
III.2	Résonance en tension	177
III.3	Résonance en intensité	181
III.4	Étude de la phase	184
IV	Exercices	185
8	Filtrage linéaire	195
I	Signaux périodiques	195
I.1	Décomposition en série de Fourier	195
I.2	Analyse harmonique - Spectre	198
II	Quadripôle linéaire, filtrage	200
II.1	Fonction de transfert d'un quadripôle linéaire	200
II.2	Modélisation de l'entrée et de la sortie d'un quadripôle	202
II.3	Filtres linéaires	204
III	Filtres linéaires passifs d'ordres un et deux	209
III.1	Filtre passe-bas d'ordre un	210
III.2	Filtre passe-haut d'ordre un	212
III.3	Filtre passe-bas d'ordre deux	214
III.4	Filtre passe-bande	216
IV	Filtrage d'un signal périodique	220
IV.1	Principe	220
IV.2	Exemple du filtrage d'un signal créneau pour obtenir une tension continue de valeur variable	221
IV.3	Illustrations	223
V	Exercices	224
	Formulaire sur les signaux	229
	Partie II Mécanique	241
9	Cinématique du point et du solide indéformable	243
I	Mouvement d'un point dans un référentiel	243
I.1	Instant d'un événement	243
I.2	Repérage d'un point	244
I.3	Lois horaires et trajectoire	245
I.4	Relativité du mouvement	246
I.5	Repérages classiques - Approche constructive du vecteur vitesse	247
II	Vecteurs vitesse et accélération	253
II.1	Dérivation temporelle d'un vecteur	253
II.2	Définition du vecteur vitesse	256
II.3	Définition du vecteur accélération	257
III	Exemples de mouvements simples	259
III.1	Mouvement rectiligne d'un point	260
III.2	Mouvement d'un point soumis à accélération constante	260
III.3	Mouvement de translation d'un solide	262
III.4	Mouvement circulaire d'un point	263
III.5	Mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe	265
IV	Exercices	266

10	Dynamique du point	271
I	Lois de Newton	271
I.1	Principe d'inertie	271
I.2	Principe fondamental de la dynamique	273
I.3	Principe des actions réciproques	274
II	Lois de force	274
II.1	Lois d'interaction	274
II.2	Forces de gravitation	275
II.3	Forces élastiques	279
II.4	Liaisons et frottements	282
II.5	Forces électromagnétiques	285
III	Exercices	286
11	Travail, puissance et énergie	291
I	Puissance et travail	292
I.1	Puissance	292
I.2	Travail	293
II	Théorème de l'énergie cinétique	294
II.1	Théorème de la puissance cinétique	294
II.2	Théorème de l'énergie cinétique	295
III	Énergie mécanique	296
III.1	Forces conservatives	296
III.2	Théorème de l'énergie mécanique	298
III.3	Exemples de forces conservatives	300
IV	Mouvements unidimensionnels	302
IV.1	Définition et exemples	302
IV.2	Équilibre d'un système conservatif unidimensionnel	303
IV.3	Mouvement autour d'un équilibre	305
V	Exercices	308
12	Particules chargées dans des champs électrique et magnétique	313
I	Force de Lorentz	313
I.1	Force électrique	313
I.2	Force magnétique	314
I.3	Force électromagnétique de Lorentz	314
I.4	Force électromagnétique <i>vs</i> poids	315
I.5	Puissance et travail de la force de Lorentz	316
II	Particule chargée dans un champ électrique uniforme et permanent	317
II.1	Étude du mouvement	317
II.2	Utilisation pratique des champs électrostatiques	319
III	Particule dans un champ magnétique uniforme	324
III.1	Étude du mouvement	324
III.2	Applications physiques des champs magnétiques uniformes	326
IV	Exercices	329

13 Moment cinétique et applications	335
I Théorème du moment cinétique	335
I.1 Notion de moment	335
I.2 Théorème du moment cinétique	339
I.3 Applications	340
II Mouvements à force centrale	342
II.1 Forces centrales	342
II.2 Propriétés des mouvements à force centrale	343
III Forces centrales conservatives	345
III.1 Force centrale et énergie potentielle	345
III.2 Mouvements et forces centrales conservatives	347
IV Trajectoires dans un champ newtonien	349
IV.1 Définition et exemples	350
IV.2 Point soumis à une force newtonienne attractive, cas d'une trajectoire circulaire	351
IV.3 Lois de Kepler	354
IV.4 Trajectoire elliptique en astronomie	356
V Moment cinétique d'un système de points	357
V.1 Moment cinétique par rapport à un point	357
V.2 Théorèmes du moment cinétique d'un système de points	358
V.3 Notion de couple	361
V.4 Cas d'un solide indéformable	362
VI Exercices	367
Formulaire de mécanique	373

Partie III Thermodynamique **377**

14 Description d'un système à l'équilibre	379
I Les différentes échelles de description	379
I.1 Échelle microscopique, libre parcours moyen	379
I.2 Échelle macroscopique	380
I.3 Échelle mésoscopique	380
II Théorie cinétique du gaz parfait	380
II.1 Distribution des vitesses moléculaires d'un gaz	381
II.2 Pression cinétique	382
II.3 Température cinétique	384
III Description d'un système thermodynamique	385
III.1 Système thermodynamique	385
III.2 Grandeur extensive, grandeur intensive	386
III.3 Construction d'une grandeur intensive	387
III.4 Bilan d'une grandeur extensive	388
IV Équation d'état	390
IV.1 Équation d'état d'un fluide homogène	390
IV.2 Exemple du gaz parfait	390
IV.3 Exemple d'une phase condensée indilatable et incompressible	391

V	Énergie interne d'un système	391
V.1	Définition	391
V.2	Cas du gaz parfait monoatomique	392
V.3	Cas d'une phase condensée indilatable et incompressible	395
VI	Les fluides réels	396
VI.1	Approximation des phases condensées peu compressibles et peu dilatables	396
VI.2	Du gaz réel au gaz parfait	398
VII	Corps pur diphasé en équilibre	399
VII.1	Corps pur sous plusieurs phases	399
VII.2	Les états de la matière	399
VII.3	Diagramme de phases (p, T)	400
VII.4	Cas de l'équilibre liquide-vapeur	403
VIII	Équilibre liquide-vapeur de l'eau en présence d'une atmosphère inerte	410
IX	Exercices	415
15	Échanges d'énergie au cours d'une transformation	421
I	Transformation thermodynamique subie par un système	421
I.1	Introduction	421
I.2	Détermination de l'état d'équilibre final	423
I.3	Quelques transformations particulières	424
II	Échange d'énergie mécanique avec l'extérieur : travail des forces de pression	425
II.1	Travail mécanique	425
II.2	Travail des forces de pression lors d'une évolution élémentaire	425
II.3	Travail des forces de pression lors d'une évolution non élémentaire : cas particuliers	427
II.4	Principe du calcul du travail pour une transformation quasi stationnaire	428
II.5	Lien avec le diagramme de Clapeyron	431
II.6	Cas d'une transformation cyclique	432
III	Échange thermique d'énergie avec l'extérieur : transfert thermique	434
III.1	Notion de transfert thermique	434
III.2	Les différents types de transferts thermiques	435
III.3	Transformation adiabatique	436
III.4	Thermostat	436
III.5	Transformation monotherme	438
III.6	Transformation isotherme	438
IV	Exercices	439
16	Premier principe. Bilans d'énergie	443
I	Le premier principe de la thermodynamique	443
I.1	Conservation de l'énergie	443
I.2	Énoncé du premier principe	444

II	Enthalpie d'un système	452
II.1	Définition	452
II.2	Cas du gaz parfait	452
II.3	Cas d'une phase condensée incompressible et indilatable	452
II.4	Capacité thermique à pression constante	453
II.5	Cas particulier du premier principe : bilan d'enthalpie pour une transformation monobare	455
III	Étude de détente de gaz	456
III.1	Détente de Joule et Gay-Lussac	456
III.2	Détente de Joule-Thomson	458
IV	Application aux transitions de phase	462
IV.1	Enthalpie associée à une transition de phase	462
IV.2	Bilans énergétiques en présence de transitions de phases	465
V	Calorimétrie	468
V.1	Mesure de la capacité thermique d'un solide : méthode des mélanges	469
V.2	Mesure de la capacité thermique d'un liquide : méthode électrique	471
VI	Exercices	471
17	Deuxième principe. Bilans d'entropie	475
I	Le deuxième principe de la thermodynamique	475
I.1	Insuffisance du premier principe	475
I.2	Énoncé du deuxième principe	477
II	Interprétation statistique de l'entropie	480
III	Bilan d'entropie	484
III.1	Terme d'échange d'entropie	484
III.2	Variation d'entropie d'un système	484
III.3	Exemples	490
IV	Loi de Laplace	494
V	Cas particulier d'une transition de phase	497
VI	Exercices	500
18	Machines thermiques	505
I	Machines thermiques	505
I.1	Machines thermiques cycliques	505
I.2	Irréversibilité et inégalité de Clausius	505
II	Machines thermiques cycliques diathermes	507
II.1	Moteur cyclique diatherme	507
II.2	Réfrigérateur	509
II.3	Pompe à chaleur	511
II.4	Rendement et efficacité	512
III	Évolutions dans une machine réelle : modélisation du moteur à combustion interne	513
IV	Machines thermiques à écoulement de fluide permanent	516
IV.1	Premier principe de la thermodynamique pour un écoulement permanent	516
IV.2	Diagrammes thermodynamiques	521
V	Exercices	523
VI	Problèmes	525

19 Statique des fluides (PCSI)	535
I Modèle du milieu continu	535
I.1 Les différentes échelles de description d'un fluide	535
I.2 Pression dans un fluide	536
I.3 Champs de grandeurs intensives locales	537
II Statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme	537
II.1 Champ de pression dans un liquide (hydrostatique)	539
II.2 Modèle isotherme de l'atmosphère	541
III Le facteur de Boltzmann	545
III.1 Construction du facteur de Boltzmann	545
III.2 Utilisation du facteur de Boltzmann	546
IV Actions de pression	547
IV.1 Résultante d'actions de pression	547
IV.2 Poussée d'Archimède	549
V Équation locale de la statique des fluides	551
V.1 Équivalent volumique des actions de pression	551
V.2 Relation fondamentale de la statique des fluides	553
VI Exercices	554
Formulaire de thermodynamique	559
Partie IV Induction et forces de Laplace	565
20 Le champ magnétique	567
I Sources et cartes du champ magnétique	567
I.1 Aimant droit	567
I.2 Champs magnétiques créés par des courants	569
II Intensité du champ magnétique	570
II.1 Lien entre intensité et carte du champ magnétique	571
II.2 Lien entre courant et champ magnétique	572
II.3 Principe de superposition des champs magnétiques	574
III Moment magnétique	575
IV Exercices	578
21 Actions d'un champ magnétique	579
I Forces de Laplace	579
II Actions de Laplace sur une spire ou un aimant	582
III Effet moteur d'un champ magnétique tournant	585
IV Exercices	586
22 Lois de l'induction	591
I Aspect expérimental de l'induction	591
II Formalisation des lois de l'induction	591
III Exercices	594

23 Circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps	597
I Phénomène d'auto-induction	597
I.1 Flux propre et inductance propre	597
I.2 Auto-induction et loi de modération de Lenz	601
I.3 Aspect énergétique de l'auto-induction	602
II Bobines en interaction	604
II.1 Inductance mutuelle entre deux bobines	604
II.2 Circuits couplés par induction mutuelle	605
II.3 Exemples d'applications des circuits couplés	606
II.4 Bilan énergétique pour deux circuits couplés	607
II.5 Transformateur de tension	608
III Exercices	610
24 Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	613
I Conversion de puissance mécanique en puissance électrique	613
I.1 Dispositif des rails de Laplace	613
I.2 Freinage électromagnétique	617
I.3 Circuit en rotation dans un champ magnétique uniforme	619
II Conversion de puissance électrique en puissance mécanique	621
II.1 Moteur à courant continu à entrefer plan	621
II.2 Haut-parleur électrodynamique	623
III Exercices	625
Formulaire sur l'induction	629
Annexes	631
A Mesures et incertitudes	631
I Mesure physique et erreurs	631
I.1 Variabilité des mesures	631
I.2 Erreur systématique	632
I.3 Valeur vraie, erreur aléatoire	632
I.4 Fidélité et justesse	633
I.5 Évaluation de l'incertitude, incertitude type	633
II Évaluation de type A de l'incertitude	634
II.1 Généralités	634
II.2 Lois de distribution	636
II.3 Intervalle de confiance	637
III Évaluation de type B de l'incertitude	639
III.1 Informations constructeur	639
III.2 Encadrement expérimental	640
IV Incertitude type composée	640
IV.1 Propagation des erreurs	640
IV.2 Exemples	641
IV.3 Intervalle de confiance	642
V Régression linéaire, moindres carrés	642
V.1 Détermination graphique	643
V.2 Méthode des moindres carrés	643

B	Résolution des équations différentielles	645
I	Équations différentielles homogènes	645
I.1	Équation différentielle homogène du premier ordre	645
I.2	Équation différentielle homogène du deuxième ordre	646
II	Commentaires	648
II.1	Forme canonique	648
II.2	Linéarité	648
II.3	Stabilité	648
III	Filtre	649
III.1	Définitions	649
III.2	Conséquences	649
III.3	Fonction de transfert	649
C	Système international d'unités de mesure	651
I	Unités de base	651
II	Unités dérivées cohérentes	652
	Partie V Solutions des exercices	655
	Index	795