

# Table des matières

<b>LEÇON 1 : Contact entre deux solides. Frottement</b> .....	<b>17</b>
1 Modélisation microscopique et macroscopique des forces de contact.....	18
2 Mouvements de translation avec frottement sec.....	22
3 Mouvement de roulement avec frottement sec.....	26
<b>LEÇON 2 : La gravitation</b> .....	<b>31</b>
1 La loi de gravitation universelle .....	32
2 Équations locales du champ gravitationnel et énergie gravitationnelle .....	35
3 Applications simples de la théorie de la gravitation universelle.....	38
<b>LEÇON 3 : Caractère non galiléen du référentiel terrestre</b> .....	<b>41</b>
1 Le référentiel géocentrique et la théorie statique des marées.....	42
2 Théorie dynamique des marées.....	46
3 Expression de la seconde loi de Newton dans le référentiel terrestre .....	48
<b>LEÇON 4 : Précession dans les domaines macroscopique et microscopique</b> .....	<b>55</b>
1 Le mouvement de précession au niveau microscopique .....	56
2 Mouvement de précession macroscopique.....	61
3 L'approximation gyroscopique.....	64
<b>LEÇON 5 : Lois de conservation en dynamique</b> .....	<b>67</b>
1 Conservation de l'impulsion d'un système isolé.....	68
2 Conservation du moment cinétique d'un système .....	71
3 Conservation de l'énergie mécanique d'un système .....	73
<b>LEÇON 6 : Cinématique relativiste</b> .....	<b>77</b>
1 Introduction historique .....	78
2 La transformation spéciale de Lorentz-Poincaré .....	78
3 Simultanéité, temps propre et longueur propre.....	81

<b>LEÇON 7 : Dynamique relativiste.....</b>	<b>89</b>
1 Lois fondamentales de la dynamique relativiste.....	90
2 L'expérience de Bertozzi de 1964 .....	92
3 Le synchrotron à proton.....	95
4 Unités de la dynamique relativiste et champ d'application.....	95
5 Réaction nucléaire en dynamique relativiste.....	96
<b>LEÇON 8 : Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux .....</b>	<b>99</b>
1 Description d'un fluide visqueux newtonien .....	100
2 Équations de la dynamique, fluide visqueux newtonien ou équation de Navier-Stocke.....	101
3 Interprétation physique de l'équation de Navier stockes et nombre de Reynolds .....	103
4 Exemple d'écoulement visqueux laminaire .....	105
<b>LEÇON 9 : Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide .....</b>	<b>109</b>
1 Modélisation d'un écoulement parfait .....	110
2 Dynamique de l'écoulement du fluide parfait .....	111
3 Théorème de Bernoulli .....	113
4 Applications simples du théorème de Bernoulli .....	114
<b>LEÇON 10 : Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides .....</b>	<b>117</b>
1 Généralités sur la tension superficielle de surface .....	118
2 Loi de Laplace et applications .....	121
3 Le problème du mouillage dans un contact à trois phases.....	122
4 Mesure expérimentale de la tension superficielle.....	123
<b>LEÇON 11 : Gaz réels, gaz parfait.....</b>	<b>125</b>
1 Le modèle du gaz parfait en théorie cinétique des gaz.....	126
2 Le modèle de van der Waals du gaz réel.....	129
3 Détentes des gaz réels .....	134
4 Procédés de liquéfaction des gaz réels .....	135

<b>LEÇON 12 : Le premier principe de la thermodynamique .....</b>	<b>137</b>
1 Rappels de mécanique classique.....	138
2 Énergie interne et énergie totale d'un système de N particules en interaction .....	140
3 Transformations d'un système thermodynamique.....	142
4 Travail et transfert thermique au niveau de la frontière d'un système .....	144
5 Le premier principe de la thermodynamique .....	151
<b>LEÇON 13 : Évolution, conditions d'équilibre d'un système thermodynamique fermé..</b>	<b>155</b>
1 Potentiel thermodynamique d'un système thermostaté .....	156
2 Système thermodynamique bistable .....	158
3 Travail récupérable de manière non cyclique d'un système thermostaté ou exergie .....	160
4 Potentiels thermodynamiques et entropie de production .....	163
<b>LEÇON 14 : Machines thermiques réelles .....</b>	<b>165</b>
1 Machine motrice à combustion externe : Cycle de Rankine .....	166
2 PAC ou production ditherme de chaleur.....	169
3 Machines frigorifiques ou étude de la production de « froid » .....	172
<b>LEÇON 15 : Transitions de phase .....</b>	<b>179</b>
1 Classification des transitions de phase .....	180
2 Transitions de phase du premier ordre : propriétés thermoélastiques .....	181
3 Propriétés thermo énergétiques de la vaporisation .....	183
4 Le diagramme (P, h) pour l'équilibre liquide-vapeur.....	186
<b>LEÇON 16 : Le facteur de Boltzmann .....</b>	<b>191</b>
1 Le facteur de Boltzmann .....	192
2 Équipartition de l'énergie et modèle d'Einstein .....	194
3 Force de van der Waals et statistique de Boltzmann.....	198
4 Magnétisme et statistique de Boltzmann .....	200
<b>LEÇON 17 : Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir .....</b>	<b>207</b>
1 Le modèle du corps noir.....	208

2	Le modèle classique des résonateurs de Lord Rayleigh .....	208
3	Planck et la naissance de la théorie des quanta.....	210
4	Étude des courbes de luminance spectrale .....	211
5	Émittance du corps noir et loi de Stefan.....	213
<b>LEÇON 18 : Phénomènes de transport.....</b>		<b>217</b>
1	Notions sur la thermodynamique hors équilibre .....	218
2	Étude théorique de la diffusion de particules.....	219
3	Lois phénoménologiques de la diffusion thermique et équation de la chaleur.....	225
4	Aspects microscopiques des phénomènes de transport .....	231
5	Problèmes non stationnaires .....	234
<b>LEÇON 19 : Bilans thermiques, flux conductifs, convectifs et radiatifs .....</b>		<b>239</b>
1	Un exemple de flux diffusif : la diffusion d'une onde thermique dans le sol.....	240
2	Un exemple de flux conducto-convectif : thermorégulation d'un mammifère .....	242
3	Un exemple de flux convectif : étude d'un échangeur thermique.....	245
4	Un exemple de flux radiatif : modélisation simple de l'effet de serre .....	246
<b>LEÇON 20 : Conversion d'énergie électromécanique .....</b>		<b>249</b>
1	Rappels sur les conventions d'énergie.....	250
2	Le relais, un premier convertisseur électromécanique.....	251
3	Machines tournantes .....	253
<b>LEÇON 21 : Induction électromagnétique.....</b>		<b>259</b>
1	Propriétés du champ magnétique.....	260
2	Les lois de l'induction électromagnétique .....	261
3	Deux cas simples de phénomènes d'induction .....	263
4	Application des phénomènes d'induction .....	266
<b>LEÇON 22 : Rétroaction et oscillations .....</b>		<b>269</b>
1	Le phénomène de rétroaction .....	270

2	L'oscillateur de Wien.....	271
3	Stabilisation de l'oscillation.....	274
<b>LEÇON 23 : Aspect analogique et numérique du traitement du signal. Étude spectrale</b>		<b>277</b>
1	Généralités sur la théorie du signal.....	278
2	Décomposition d'un signal en série de Fourier.....	280
3	Notions sur la transformée de Fourier pour des fonctions non périodiques.....	283
4	Filtrage d'un signal analogique.....	286
5	Filtrage d'un signal composite.....	287
6	Détection synchrone d'un signal analogique.....	294
7	Généralités sur les signaux numériques et l'échantillonnage ou sampling.....	295
8	Filtrage numérique.....	297
<b>LEÇON 24 : Ondes progressives, ondes stationnaires.....</b>		<b>301</b>
1	Les différents types de signaux en physique.....	302
2	Propagation unidirectionnelle d'une onde élastique.....	303
3	Corde vibrante avec deux conditions aux limites et ondes stationnaires.....	307
4	Cordes vibrantes et musique.....	314
<b>LEÇON 25 : Ondes acoustiques.....</b>		<b>317</b>
1	Propagation d'une vibration sonore dans le modèle de solide d'Einstein.....	318
2	Réflexion et transmission d'une onde sonore dans un milieu solide.....	320
3	Étude des ondes sonores dans les fluides.....	323
4	Le Sofar.....	331
<b>LEÇON 26 : Propagation avec dispersion.....</b>		<b>333</b>
1	L'état de plasma.....	334
2	Équation de propagation dans un plasma froid peu dense.....	335
3	Le phénomène de dispersion dans le formalisme de Fourier.....	338
<b>LEÇON 27 : Propagation guidée des ondes.....</b>		<b>341</b>
1	Généralités sur la propagation guidée.....	342

2	Modes transverses électriques d'un guide d'onde à section rectangulaire.....	342
3	Aspect énergétique du guide d'onde rectangulaire.....	345
4	Propagation dans un coaxial .....	346
5	Fibres optiques.....	347
<b>LEÇON 28 : Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques.....</b>		<b>351</b>
1	Interaction entre un milieu diélectrique et le rayonnement .....	352
2	Propagation dans un milieu diélectrique .....	352
3	Le modèle de Drude- Lorentz.....	353
4	Étude énergétique de la propagation .....	356
<b>LEÇON 29 : Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs .....</b>		<b>357</b>
1	Le modèle classique de Drude de la conduction dans les métaux.....	358
2	Équation de propagation dans un milieu conducteur métallique.....	361
3	Structure du champ électromagnétique et aspect énergétique.....	363
<b>LEÇON 30 : Rayonnement dipolaire électrique.....</b>		<b>365</b>
1	Expérience de Hertz .....	366
2	Le modèle du dipôle électrique rayonnant.....	366
3	Champ électromagnétique rayonné par un dipôle oscillant.....	367
4	Étude énergétique du dipôle de Hertz .....	369
5	Étude de la diffusion Rayleigh.....	370
6	Rayonnement d'une antenne demi-onde .....	372
7	Notions sur la section efficace de diffusion .....	374
<b>LEÇON 31 : Présentation de l'optique géométrique à partir du principe de Fermat .....</b>		<b>377</b>
1	Le principe de Fermat .....	378
2	Les lois de Snell-Descartes du point de vue de Fermat.....	378
3	Trajet d'un rayon lumineux dans un milieu inhomogène .....	380
4	Application aux fibres optiques.....	382

Table des matières	11
<b>LEÇON 32 : Microscopies optiques</b>	<b>385</b>
1 Modélisation élémentaire du microscope	386
2 Puissance et latitude de mise au point d'un microscope	388
3 Pouvoir séparateur du microscope optique	390
4 Autres exemples de microscopies optiques	391
<b>LEÇON 33 : Interférences à deux ondes en optique</b>	<b>393</b>
1 Modélisation d'une onde lumineuse pour les interférences	394
2 Le dispositif des fentes de Young	396
3 Notions sommaires sur la cohérence	398
<b>LEÇON 34 : Interférométrie par division d'amplitude</b>	<b>403</b>
1 Interférences par division d'amplitude	404
2 Interférences par division d'amplitude obtenues par une lame	404
3 L'interféromètre de Michelson	407
<b>LEÇON 35 : Diffraction de Fraunhofer</b>	<b>411</b>
1 La diffraction de Fraunhofer	412
2 Figures de diffraction classiques	415
3 Pouvoir séparateur d'un instrument d'optique et apodisation	417
4 Notions élémentaires sur l'optique de Fourier et la strioscopie	419
<b>LEÇON 36 : Diffraction par des structures périodiques</b>	<b>423</b>
1 Principaux résultats de la diffraction de Fraunhofer	424
2 Diffraction par une structure périodique	425
3 Étude détaillée d'un réseau	426
4 Diffraction des rayons X par des structures cristallines	430
<b>LEÇON 37 : Absorption et émission de la lumière</b>	<b>435</b>
1 Approche historique	436
2 Modèle d'Albert Einstein de l'émission et de l'absorption	437
3 Application au rayonnement du corps noir selon Einstein (1917)	441
4 Fonctionnement schématique d'un LASER	442

<b>LEÇON 38 : Aspect corpusculaire du rayonnement. Le photon .....</b>	<b>445</b>
1 Élaboration historique du concept de photon .....	446
2 L'effet photoélectrique ou la preuve de l'énergie du photon.....	447
3 La diffusion Compton ou la preuve de l'impulsion du photon.....	449
4 La pression de radiation et le refroidissement des atomes .....	450
5 Le spin du photon.....	452
<b>LEÇON 39 : Aspect ondulatoire de la matière. Notion de fonction d'onde .....</b>	<b>455</b>
1 Du quantum d'énergie échangée au « Lichtquant », du « Lichtquant » au photon : la lente construction de la physique quantique.....	456
2 La dualité onde-corpuscule de Louis de Broglie (1923) et les principes de Niels Bohr .....	458
3 Notion de fonction d'onde.....	461
<b>LEÇON 40 : Confinement d'une particule et quantification de l'énergie .....</b>	<b>465</b>
1 Confinement d'une particule dans un puits de potentiel infini .....	466
2 Le puits de potentiel fini .....	470
<b>LEÇON 41 : Effet tunnel.....</b>	<b>473</b>
1 Problématique de l'effet tunnel.....	474
2 Calcul exact de la transparence d'une barrière rectangulaire .....	476
3 Applications de l'effet tunnel.....	479
4 Simulations numériques Python .....	482
<b>LEÇON 42 : Fusion, fission .....</b>	<b>487</b>
1 Les modèles simples ou « classiques » du noyau.....	488
2 Réactions nucléaires provoquées .....	491
3 Réactions de fission.....	491
4 Réactions de fusion .....	495
<b>LEÇON 43 : Évolution temporelle d'un système quantique à deux niveaux.....</b>	<b>499</b>
1 Définitions de base sur les systèmes quantiques à deux niveaux.....	500
2 Étude qualitative de l'évolution temporelle d'un système quantique à deux niveaux.....	500
3 Inversion de la molécule d'ammoniac et principe du MASER.....	502



**LEÇON 44 : Capacités thermiques ; description, interprétations microscopiques..... 507**

- 1 Capacité molaire et capacité massique d'un corps pur .....508
- 2 Théorème d'équipartition de l'énergie.....509
- 3 Capacité molaire et capacité massique du gaz parfait .....510
- 4 Capacité molaire et capacité massique de la matière condensée .....515
- 5 Discussion et correction du modèle d'Einstein .....518

**LEÇON 45 : Paramagnétisme, ferromagnétisme, approximation du champ moyen ..... 523**

- 1 Aspect microscopique du magnétisme .....524
- 2 Précession d'un moment magnétique dans un champ magnétique uniforme et constant...525
- 3 Paramagnétisme classique de Langevin.....526
- 4 Modélisation du ferromagnétisme dans l'hypothèse du champ moyen .....530
- 5 Domaines et parois magnétiques .....531

**LEÇON 46 : Propriétés macroscopiques des ferromagnétiques..... 533**

- 1 Courbe de première aimantation et cycle d'hystérésis .....534
- 2 Notion de circuits magnétiques et le concept de réluctance.....536
- 3 Applications des circuits magnétiques .....538
- 4 Pertes dans les milieux ferromagnétiques.....540

**LEÇON 47 : Mécanismes de la conduction électrique dans les solides ..... 543**

- 1 Le modèle classique de Drude de la conduction dans les métaux.....544
- 2 Notions sur la théorie des bandes .....548
- 3 Notions élémentaires sur la supraconductivité .....551
- 4 Conductivité en présence d'un champ magnétique .....551

**LEÇON 48 : Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique ..... 555**

- 1 Qu'est-ce que le phénomène de résonance ? .....556
- 2 Exemple de résonateur mécanique .....556
- 3 Un exemple de résonateur paramétrique : Le botafumeiro .....561
- 4 Résonateur multimode : la corde de Melde .....565

**LEÇON 49 : Oscillateurs ; portrait de phase et non-linéarités..... 571**

- 1 Portrait de phase du mouvement libre d'un point matériel sous l'action d'une force élastique de rappel .....572
- 2 Mouvement harmonique amorti par frottement fluide .....575
- 3 Étude du frottement sec de contact avec le portrait de phase .....577
- 4 Le pendule simple comme exemple d'oscillateur non linéaire .....579

**LEÇON 50 : Mouvement de particules chargées dans des champs uniformes ..... 589**

- 1 Particule chargée dans un champ électrique uniforme et constant .....590
- 2 Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme et constant ....594
- 3 Mouvement d'une particule chargée en champs croisés .....597
- 4 Accélérateur circulaire de particule .....600
- 5 Spectrographe de masse .....601
- 6 L'effet Zeeman classique .....602

**LEÇON 51 : Piégeage de particules chargées..... 605**

- 1 Le théorème d'Earnshaw ou la problématique du piégeage .....606
- 2 Les techniques de piégeage .....606
- 3 Le potentiel quadropolaire .....608
- 4 Principe du piège de Penning .....609
- 5 Le piège de Paul .....611
- 6 Interprétation énergétique du piégeage dans le cas du magnétron .....613

**ANNEXE 1 : Notions d'analyse utiles en physique ..... 619**

- 1 Notions élémentaires sur les fonctions d'une variable .....619
- 2 Les nombres complexes .....620
- 3 Équations différentielles linéaires à coefficients constants .....622
- 4 Notions élémentaires sur les fonctions de plusieurs variables .....635

**ANNEXE 2 : Séries et intégrales de Fourier ..... 639**

- 1 Cas des fonctions T périodiques .....639
- 2 Séries de Fourier et spectres classiques de fonctions  $2\pi$ -périodiques .....641

Table des matières	15
<b>ANNEXE 2 : Séries et intégrales de Fourier</b> .....	<b>639</b>
3 Notions sur la transformée de Fourier des fonctions non périodiques .....	641
<b>ANNEXE 3 : Notions sur les vecteurs et la géométrie affine utiles en physique</b> .....	<b>645</b>
1 Le concept de vecteur en mécanique .....	645
2 Bases de projection utiles en physique .....	648
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>653</b>
<b>INDEX NOMS PROPRES</b> .....	<b>655</b>