

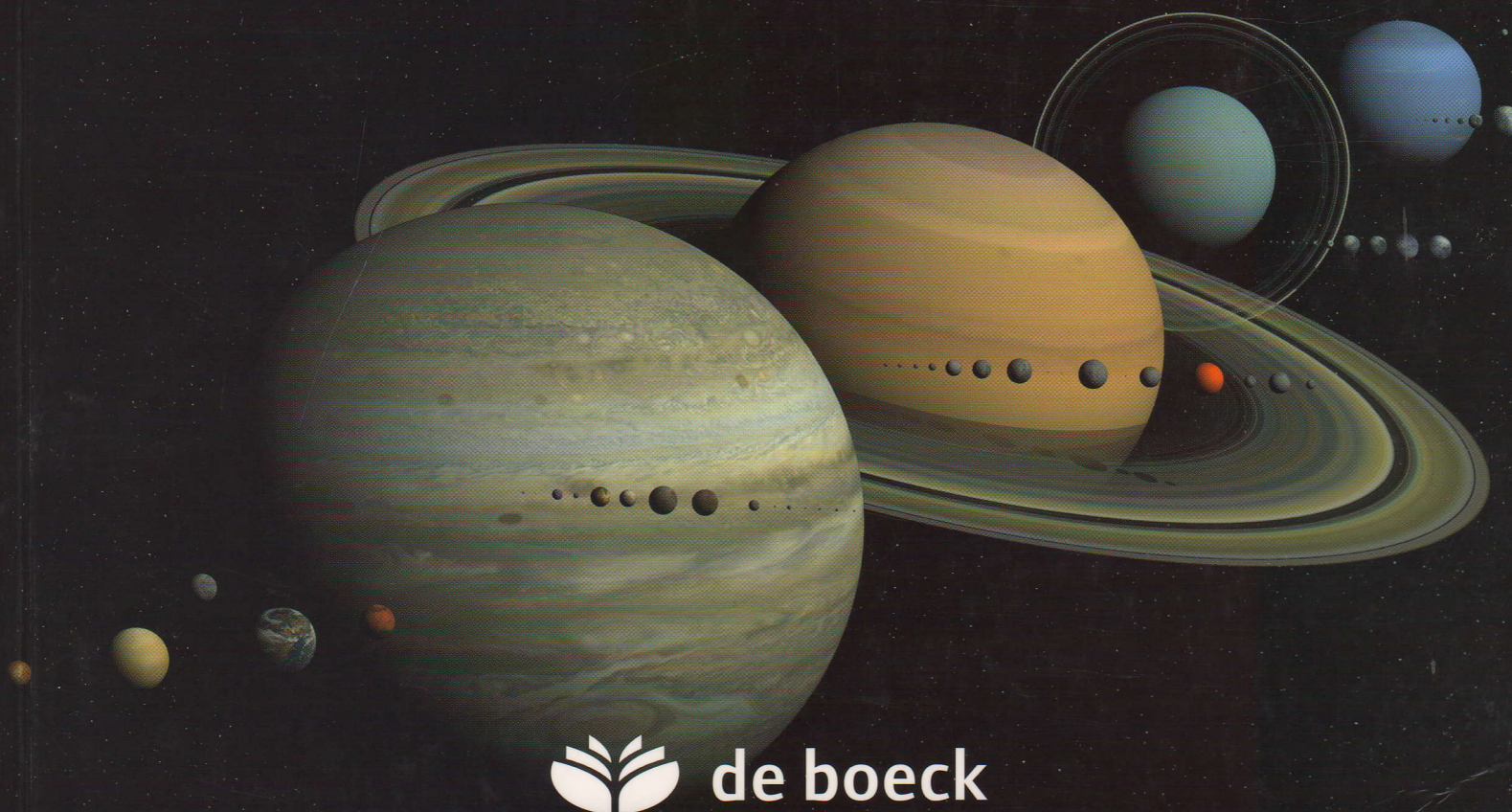
PHYSIQUE

Une introduction

• Sous la direction de José-Philippe PÉREZ •

Olivier PUJOL, Christophe LAGOUTE,
Pascal PUECH et Éric ANTERRIEU

**Avec travaux dirigés résolus et
illustrations informatiques**



de boeck

Table des Matières

AVANT-PROPOS.....	1
-------------------	---

CONSTANTES PHYSIQUES, NOTATIONS ET SYMBOLES.....	3
---	---

Leçon 1

CONSTANTES FONDAMENTALES DE LA PHYSIQUE, UNITÉS ET DIMENSIONS	15
---	----

L1 UNITÉS, DIMENSIONS ET ANALYSE DIMENSIONNELLE.....	16
---	----

L1.1 Unités des grandeurs physiques	17
---	----

L1.2 Dimension des grandeurs physiques	18
--	----

a) Premier type d'absurdité	18
-----------------------------------	----

b) Deuxième type d'absurdité.....	20
-----------------------------------	----

c) Troisième type d'absurdité.....	21
------------------------------------	----

L1.3 Équations aux dimensions	21
-------------------------------------	----

L1.4 Analyse dimensionnelle	21
-----------------------------------	----

L2 CONSTANTES FONDAMENTALES DE LA PHYSIQUE.....	23
--	----

L2.1 Constantes fondamentales classiques	23
--	----

L2.2 Constante de Planck.....	25
-------------------------------	----

a) Définition	25
---------------------	----

b) Constantes physiques dérivées.....	26
---------------------------------------	----

L2.3 Traitement classique ou traitement quantique	26
--	----

a) Mouvement d'un proton rapide dans un synchrotron	26
--	----

b) Mouvement de l'électron dans l'atome d'hydrogène.....	27
---	----

L2.4 Cube de la physique	27
--------------------------------	----

L2.5 Grandeurs de Planck	28
--------------------------------	----

L2.6 Ordres de grandeurs	29
--------------------------------	----

a) Échelle microscopique.....	29
-------------------------------	----

b) Échelle macroscopique	29
--------------------------------	----

c) Échelle astronomique	29
-------------------------------	----

I.3 LES QUATRE INTERACTIONS FONDAMENTALES.....	30
---	----

I.3.1 Comparaison des interactions fondamentales	30
---	----

I.3.2 Synthèse des interactions fondamentales....	32
---	----

I.4 SIMILITUDE EN PHYSIQUE	33
----------------------------------	----

I.4.1 Méthode des similitudes	33
-------------------------------------	----

I.4.2 Exemples en mécanique.....	34
----------------------------------	----

a) Point matériel soumis à une force conservative	34
--	----

b) Champ de gravitation produit par une planète	34
--	----

c) Similitude en dynamique terrestre	34
--	----

I.4.3 Lois d'échelle	35
----------------------------	----

Leçon 2

CIRCUIT RC ET PROBLÈMES ÉQUIVALENTS	41
--	----

II.1 CHARGE ET DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR DANS UN RÉSTOR. 42	
---	--

II.1.1 Charge du condensateur	42
-------------------------------------	----

a) Équation différentielle d'évolution	42
--	----

b) Solutions	43
--------------------	----

II.1.2 Décharge du condensateur	44
---------------------------------------	----

II.1.3 Évolution du courant	45
-----------------------------------	----

a) Charge	45
-----------------	----

b) Décharge	46
-------------------	----

II.1.4 Problème électrique équivalent	46
---	----

II.1.5 Applications	47	III.3 OSCILATEURS ÉLECTRIQUES	
a) Réalisation de tensions en dents de scie ...	47	AMORTIS	76
b) Détecteur de crête	47	III.3.1 Circuit <i>RLC</i>	76
c) Lissage d'une tension redressée	48	III.3.2 Analogie mécanique des circuits	76
d) Oscillateur de relaxation	49	III.4 ESPACE DES ÉTATS	77
II.2 CHUTE DES CORPS AVEC		III.4.1 Portrait de phase d'un oscillateur	
FROTTEMENTS VISQUEUX	50	harmonique	77
II.2.1 Chute libre dans le vide	50	III.4.2 Portrait de phase d'un oscillateur amorti ..	78
II.2.2 Chute libre dans un milieu visqueux	50	III.5 APPLICATIONS	78
II.2.3 Applications	53	III.5.1 Mesure du champ de pesanteur terrestre ..	79
a) Mesure de la viscosité d'un fluide	53	III.5.2 Fréquence d'oscillation des molécules	
b) Gouttelettes nuageuses	53	diatomiques	79
c) Expérience de Millikan	54	III.5.3 Réalisation d'un oscillateur électrique <i>LC</i> ..	79
II.3 RADIOACTIVITÉ	54	III.5.4 Mesure du temps	79
II.3.1 Découverte de la radioactivité	54	III.5.5 Microscopie à force atomique	80
II.3.2 Nature du phénomène	55	a) Description	80
a) Radioactivité α	55	b) Pendule élastique équivalent	80
b) Radioactivité β^-	56	Leçon 4	
c) Radioactivité γ	56	OSCILLATIONS FORCÉES	
II.3.3 Caractère aléatoire de la radioactivité	56	ET RÉSONANCE	85
II.3.4 Relation entre λ et la demi-vie $T_{1/2}$	57	IV.1 RÉALISATION D'OSCILLATIONS	
II.3.5 Activité	57	FORCÉES	86
II.3.6 Justification probabiliste		IV.1.1 Pendule élastique	86
de la loi radioactive	58	IV.1.2 Source de tension sinusoïdale aux bornes	
II.3.7 Radioactivité artificielle β^+	58	d'un dipôle <i>RLC</i> série	87
II.3.8 Applications	59	IV.1.3 Réponse linéaire et résonance	87
a) Datation au carbone 14	59	IV.2 OSCILLATIONS FORCÉES.	
b) Traceurs	59	RÉSONANCE	88
c) Conservation des aliments	60	IV.2.1 Régime transitoire et régime forcé	88
d) Radioactivité et santé	60	IV.2.2 Élongation de l'oscillateur	88
Leçon 3		IV.2.3 Vitesse de l'oscillateur	89
OSCILATEURS HARMONIQUES		IV.2.4 Admittance généralisée. Résonance	90
ET OSCILATEURS AMORTIS	65	a) Admittance généralisée	90
III.1 OSCILATEURS HARMONIQUES	66	b) Résonance	90
III.1.1 Définition	66	IV.3 AMPLITUDE DE L'EXCITATION	
III.1.2 Équation différentielle d'un oscillateur		CONSTANTE	91
harmonique	66	IV.3.1 Impédance mécanique et impédance	
III.1.3 Exemples	67	électrique	91
a) Pendule élastique	67	a) Impédance mécanique	91
b) Oscillateur harmonique en électricité	69	b) Impédance électrique du dipôle <i>RLC</i>	92
III.2 OSCILATEURS AMORTIS PAR		IV.3.2 Vitesse ou intensité au voisinage de la	
FROTTEMENT VISQUEUX	70	résonance	93
III.2.1 Équation différentielle du mouvement	70	IV.3.3 Élongation au voisinage de la résonance ..	93
III.2.2 Nature du mouvement	71	IV.4 APPLICATIONS	95
a) Mouvement pseudo-périodique ($Q > 1/2$) ..	72	IV.4.1 Diffusion	95
b) Mouvement apériodique ($Q < 1/2$)	74	a) Modèle de l'électron élastiquement lié	95
c) Mouvement critique ($Q = 1/2$)	75	b) Différents types de diffusion	96

IV.4.2 Capteur d'amplitude	97
a) <i>Étude générale</i>	97
b) <i>Capteur d'excitation</i>	98
c) <i>Accéléromètres. Amortissement de vibrations</i>	98
IV.4.3 Sensibilité à la résonance	98

Leçon 5

FONCTIONS DE TRANSFERT DES SYSTÈMES LINÉAIRES EN ÉLECTRICITÉ DES CIRCUITS 105

V.1 LINÉARITÉ DANS LES CIRCUITS	106
V.1.1 Systèmes linéaires	106
a) <i>Définition</i>	106
b) <i>Caractère fondamental des signaux sinusoïdaux</i>	106
V.1.2 Dipôles électriques linéaires	107
V.1.3 Circuits électriques linéaires	108
V.2 LOIS DES CIRCUITS	108
V.2.1 Régimes de fonctionnement d'un circuit ..	108
a) <i>Régime libre et régime forcé</i>	108
b) <i>Régime stationnaire, régime variable et régime quasi-stationnaire</i>	108
c) <i>Régime transitoire et régime établi</i>	109
d) <i>Régime sinusoïdal forcé établi en ARQS</i> ..	110
V.2.2 Impédance et admittance d'un dipôle	110
a) <i>Définitions</i>	110
b) <i>Impédance d'un résistor</i>	111
c) <i>Impédance d'un condensateur</i>	111
d) <i>Impédance d'une bobine</i>	112
V.2.3 Lois de Kirchhoff en régime stationnaire ..	112
a) <i>Nœud et maille</i>	112
b) <i>Loi des nœuds</i>	113
c) <i>Loi des mailles</i>	113
d) <i>Pont diviseur de tension</i>	114
V.2.4 Lois de Kirchhoff en régime sinusoïdal ...	114
a) <i>Loi des nœuds</i>	114
b) <i>Loi des mailles</i>	115
c) <i>Exemples</i>	116
V.3 TRANSFERT D'UN SYSTÈME LINÉAIRE	116
V.3.1 Fonction de transfert	116
V.3.2 Diagrammes de Bode	117
a) <i>Gain en tension et déphasage</i>	118
b) <i>Détermination expérimentale</i>	118
V.3.3 Exemple du circuit RC	119
a) <i>Diagramme de Bode</i>	119
b) <i>Représentation asymptotique</i>	120
c) <i>Bande passante à -3 dB</i>	120

V.4 APPLICATION AU FILTRAGE	121
V.4.1 Filtre passif passe-bas du premier ordre ..	121
V.4.2 Filtre passif passe-haut du premier ordre ..	122
V.4.3 Filtre passif passe-bande du deuxième ordre	123
V.4.4 Équation différentielle d'évolution	125
V.5 ASSOCIATION EN CASCADE DE CIRCUITS ÉLECTRIQUES	125
V.5.1 Matrice de transfert	125
V.5.2 Matrices de transfert élémentaires	126
a) <i>Matrice de transfert de Q_1</i>	126
b) <i>Matrice de transfert de Q_t</i>	127
V.5.3 Matrice de transfert d'une association de quadripôles en cascade	127
V.5.4 Application à l'association de deux cellules identiques RC	128

Leçon 6

MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN POINT MATÉRIEL 133

VI.1 MOUVEMENT CIRCULAIRE D'UN PENDULE SIMPLE	134
VI.1.1 Expression de la vitesse et de l'accélération	134
a) <i>Vitesse</i>	134
b) <i>Accélération</i>	135
VI.1.2 Équations du mouvement	135
VI.1.3 Mouvement circulaire uniforme et mouvement sinusoïdal	137
VI.2 DÉRIVÉE D'UN VECTEUR UNITAIRE DANS UN PLAN	138
VI.2.1 Dérivée d'un vecteur unitaire par rapport à l'angle polaire	138
VI.2.2 Vitesse et accélération dans la base cartésienne	138
VI.2.3 Base directe de Frenet	138
VI.2.4 Plan complexe	139
VI.2.5 Mouvement circulaire d'un point et rotation d'un repère	139
VI.3 EXEMPLES DE MOUVEMENT CIRCULAIRE UNIFORME	141
VI.3.1 Mouvement circulaire uniforme d'un point de la Terre	141
VI.3.2 Satellites de la Terre	141
a) <i>Mouvement plan d'un satellite</i>	142
b) <i>Vitesse de satellisation</i>	142
c) <i>Différents types de satellites artificiels</i>	144
d) <i>Orbite géostationnaire</i>	144
e) <i>Autres types d'orbites circulaires</i>	145
f) <i>Satellites pour l'étude de l'Univers</i>	146

VI.3.3 Particule chargée dans un champ magnétique	146
a) Nature du mouvement	146
b) Application à la spectrométrie magnétique	147
Leçon 7	
ÉNERGIE D'UN POINT MATÉRIEL ET EXTENSIONS	153
VII.1 ÉNERGIE CINÉTIQUE D'UN POINT MATÉRIEL	154
VII.2 PUISSANCE ET TRAVAIL D'UNE FORCE	155
VII.2.1 Puissance	155
a) Définition	155
b) Forces dont la puissance est nulle	156
c) Exemples de calcul de puissance	156
VII.2.2 Travail	157
a) Expression élémentaire	157
b) Travail au cours d'un déplacement fini	158
VII.3 THÉORÈME DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE	159
VII.3.1 Énoncé	159
VII.3.2 Application au pendule simple	159
VII.4 ÉNERGIE POTENTIELLE	160
VII.4.1 Définition	160
a) Énergie potentielle associée à une force conservative	160
b) Constante d'énergie potentielle	161
c) Différentielle et gradient de l'énergie potentielle	161
d) Définition opérationnelle de l'énergie potentielle	162
VII.4.2 Exemples d'énergie potentielle	162
a) Énergie potentielle de pesanteur	162
b) Énergie potentielle élastique due à un ressort	163
c) Énergie potentielle newtonienne ou coulombienne	163
d) Énergie potentielle d'une charge dans un champ électrique	164
VII.5 ÉNERGIE MÉCANIQUE D'UN POINT MATÉRIEL	164
VII.5.1 Point matériel soumis uniquement à des forces conservatives	164
VII.5.2 Théorème de l'énergie mécanique	165
VII.5.3 Application à un oscillateur élastique amorti	165
a) Oscillateur en régime libre	165
b) Oscillateur en régime forcé	167
VII.5.4 Application à la discussion qualitative d'un mouvement	169
a) Analyse générale	169
b) Exemple du pendule simple	170
VII.6 EXTENSION DU CONCEPT D'ÉNERGIE EN PHYSIQUE	171
VII.6.1 Énergie mécanique d'un système matériel	171
a) Définition	171
b) Théorème de l'énergie mécanique	172
VII.6.2 Énergie en relativité	172
a) Loi fondamentale de la dynamique einsteinienne	172
b) Énergie de masse	173
c) Relation entre l'énergie d'une particule libre et sa quantité de mouvement	173
d) Théorème de l'énergie en mécanique einsteinienne	174
e) Transformation de masse en énergie cinétique	174
VII.6.3 Énergie dans un circuit électrique	175
VII.6.4 Énergie en thermodynamique	175
a) Énergie totale et énergie interne d'un système	176
b) Température	176
c) Premier principe de la Thermodynamique	176
VII.6.5 Les échanges d'énergie en physique quantique	176
VII.7 ÉNERGIE DANS LA SOCIÉTÉ	177
VII.7.1 Consommation d'énergie par un être vivant	177
VII.7.2 Production et consommation d'énergie	178
a) Énergie massique	178
b) Conséquences	179
c) Énergies renouvelables d'origine solaire	180
Leçon 8	
CHAMPS ET POTENTIELS DE GRAVITATION ET ÉLECTROSTATIQUES	187
VIII.1 INTERACTIONS NEWTONNIENNE ET COULOMBIENNE	188
VIII.1.1 L'interaction newtonnienne	188
VIII.1.2 L'interaction coulombienne	189
VIII.1.3 Ressemblances	190
a) Action sur les particules élémentaires	190
b) Loi de décroissance avec la distance	190
c) Opposition des actions réciproques	191
VIII.1.4 Différences	191
a) Égalité de la masse inerte et de la masse grave	191
b) Caractère attractif ou répulsif	191

c) Comparaison des forces électrique et de gravitation.....	191
VIII.1.5 Notion de champ.....	192
VIII.2 CHAMP ET POTENTIEL DE GRAVITATION.....	193
VIII.2.1 Champ de gravitation.....	193
a) Expression.....	193
b) Champ de gravitation produit par un point matériel.....	193
c) Lignes de champ gravitationnel.....	194
VIII.2.2 Potentiel de gravitation.....	194
a) Énergie potentielle de gravitation.....	194
b) Potentiel de gravitation.....	195
c) Potentiel de gravitation produit par un point matériel.....	195
VIII.2.3 Relations entre champ et potentiel de gravitation.....	195
a) Relation intégrale.....	195
b) Relation locale.....	196
c) Surfaces équipotentiellles.....	196
d) Champ et potentiel terrestres à faible altitude.....	197
VIII.2.4 Exemples.....	197
a) Station spatiale internationale.....	197
b) Rentrée atmosphérique.....	198
c) Point équi gravitationnel Terre-Lune.....	199
d) Vitesse d'évasion ou de libération.....	199
e) Trou noir.....	199
f) Marées terrestres.....	200
VIII.3 CHAMP ET POTENTIEL ÉLECTROSTATIQUES.....	201
VIII.3.1 Champ électrostatique.....	201
VIII.3.2 Potentiel électrostatique.....	202
a) Énergie potentielle électrostatique.....	202
b) Potentiel électrostatique.....	202
VIII.3.3 Relations entre le champ et le potentiel électrostatiques.....	203
a) Relation intégrale.....	203
b) Relation locale.....	203
c) Surfaces équipotentiellles.....	203
VIII.3.4 Propriétés accélératrices du champ électrostatique.....	204
VIII.3.5 Exemples.....	204
a) Champ dans un condensateur plan.....	204
b) Électron dans un canon de microscope électronique.....	205
c) Énergies dans un atome d'hydrogène.....	206
d) Énergie électrostatique de la molécule de dioxyde de carbone.....	206

e) Protons dans un collisionneur.....	207
---------------------------------------	-----

Leçon 9

ONDES : FONDEMENTS ET EFFET DOPPLER-FIZEAU.....

213

IX.1 EXEMPLES D'ONDES.....

214

IX.1.1 Transport de l'information.....

214

IX.1.2 Ondes transversales le long d'une corde.....

214

a) Onde progressive.....

214

b) Onde régressive.....

216

IX.1.3 Ondes sonores.....

216

a) Milieu de propagation.....

216

b) Célérité du son.....

217

IX.2 ÉQUATION DE PROPAGATION DES ONDES.....

217

IX.2.1 Dérivées partielles.....

217

IX.2.2 Équation de D'Alembert.....

218

a) Cas de l'onde progressive.....

218

b) Onde régressive.....

219

IX.3 ONDE PLANE ET ONDE SPHÉRIQUE.....

220

IX.3.1 Surface d'onde.....

220

IX.3.2 Onde plane.....

220

IX.3.3 Onde sphérique.....

220

IX.4 ONDE PLANE PROGRESSIVE MONOCHROMATIQUE.....

221

IX.4.1 Définition.....

221

IX.4.2 Double périodicité.....

222

IX.4.3 Expression complexe.....

222

IX.4.4 Fréquence des sons dans la nature.....

223

IX.5 ONDES STATIONNAIRES OU VIBRATIONS.....

224

IX.5.1 Définition.....

224

IX.5.2 Nature de la solution dans le cas unidimensionnel.....

224

IX.5.3 Réalisation d'ondes stationnaires.....

225

IX.5.4 Sélection de modes normaux de vibration.....

225

IX.5.5 Application aux instruments de musique.....

226

IX.6 EFFET DOPPLER-FIZEAU.....

227

IX.6.1 Source immobile et récepteur mobile.....

227

IX.6.2 Source mobile et récepteur immobile.....

228

IX.6.3 Application au radar.....

229

a) Radar routier.....

229

b) Radar météorologique.....

230

IX.6.4 Application à la dilatation spectrale cosmologique.....

230

a) Loi de Hubble.....

230

b) Interprétation.....

230

Leçon 10**ONDES : DÉVELOPPEMENTS 237****X.1 ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES 238**X.1.1 Les ondes électromagnétiques
se propagent dans rien 238

X.1.2 Approximation scalaire 239

X.1.3 Spectre électromagnétique 239

a) Ondes radioélectriques 240

b) Micro-ondes ou hyperfréquence 241

c) Domaine infrarouge 241

d) Domaine visible 241

e) Domaine ultraviolet 242

f) Rayonnement X 242

g) Rayonnement γ 243**X.2 ONDES EN PHYSIQUE QUANTIQUE 243**

X.2.1 Hypothèse de Louis De Broglie 243

a) Énoncé 243

b) Relation de De Broglie 244

c) Ordres de grandeur 244

X.2.2 Confirmations expérimentales 244

X.2.3 Équation de Schrödinger 245

a) Équation de Schrödinger des états
stationnaires 245b) Particule dans un puits d'énergie
potentielle infiniment profond 245**X.3 ONDES MÉCANIQUES 246**

X.3.1 Ondes à la surface de l'eau 246

a) Houle 247

b) Ondes capillaires 248

X.3.2 Ondes sismiques 248

a) Ondes de volume 248

b) Ondes de surface 249

c) Échelle de Richter 249

d) Tsunamis 250

X.4 ONDES DE CHOC 250

X.4.1 Ondes de choc en mécanique 250

X.4.2 Effet Cerenkov 251

X.5 ONDES GRAVITATIONNELLES 252**Correction des exercices des travaux dirigés**

Correction des exercices de la leçon 1 259

Correction des exercices de la leçon 2 264

Correction des exercices de la leçon 3 269

Correction des exercices de la leçon 4 273

Correction des exercices de la leçon 5 278

Correction des exercices de la leçon 6 284

Correction des exercices de la leçon 7 288

Correction des exercices de la leçon 8 294

Correction des exercices de la leçon 9 298

Correction des exercices de la leçon 10 302

Outils mathématiques**OM 1 : CALCUL VECTORIEL 307****I.1 ESPACE VECTORIEL 308**

I.1.1 Définition 308

I.1.2 Espace vectoriel euclidien 308

I.1.3 Base d'un espace vectoriel 308

I.2 ESPACE AFFINE 309

I.2.1 Définition 309

I.2.2 Espace métrique 309

I.2.3 Base directe et base indirecte 309

I.3 OPÉRATIONS SUR LES VECTEURS 310

I.3.1 Produit scalaire 310

a) Expression analytique 310

b) Représentation géométrique 310

I.3.2 Produit vectoriel	311	IV.4 DÉRIVÉE LOGARITHMIQUE	327
a) Définition	311	IV.5 DÉRIVÉE D'UN VECTEUR PAR	
b) Propriétés du produit vectoriel	311	RAPPORT À UN PARAMÈTRE	328
c) Signification géométrique	312	IV.6 DÉRIVÉE D'UN PRODUIT SCALAIRE	
d) Règles de calcul	312	DE DEUX VECTEURS	328
I.3.3 Produit mixte de trois vecteurs dans un		IV.7 DÉRIVÉE D'UN PRODUIT	
espace à trois dimensions	312	VECTORIEL	328
I.3.4 Technique de projection	312	IV.8 APPLICATION AUX	
I.4 AUTRES SYSTÈMES		DÉVELOPPEMENTS LIMITÉS	329
DE COORDONNÉES	313	IV.8.1 Définition	329
I.4.1 Coordonnées cylindriques	314	IV.8.2 Développement de la fonction	
I.4.2 Coordonnées sphériques	314	exponentielle	329
OM 2 : TRIGONOMÉTRIE	315	IV.8.3 Développement de la fonction cosinus ...	329
II.1 FORMULES DE BASE	316	IV.8.4 Développement de la fonction sinus	330
II.1.1 Duplication	316	IV.8.5 Développement de la fonction $(1+x)^\alpha$...	330
II.1.2 Transformation d'un produit en somme ..	316	OM 5 : FONCTIONS	
II.1.3 Transformation d'une somme en produit ..	316	HYPERBOLIQUES	331
II.2 APPLICATION AUX DIAMÈTRES		V.1 DÉFINITION	332
APPARENTS	317	V.2 PROPRIÉTÉS	332
OM 3 : CONIQUES	319	V.3 DÉVELOPPEMENTS LIMITÉS	333
III.1 DÉFINITION	320	V.3.1 Fonction cosinus hyperbolique	333
III.2 ÉQUATION POLAIRE	320	V.3.2 Fonction sinus hyperbolique	333
III.3 ÉQUATION CARTÉSIENNE	321	OM 6 : NOMBRES COMPLEXES	335
III.3.1 Parabole	321	VI.1 DÉFINITION	336
III.3.2 Ellipse et hyperbole	321	VI.2 FORME CARTÉSIENNE	336
a) Ellipse	322	VI.3 REPRÉSENTATION GÉOMÉTRIQUE	
b) Hyperbole	322	D'UN NOMBRE COMPLEXE	336
III.4 PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES		VI.4 FORME POLAIRE D'UN NOMBRE	
DES CONIQUES	323	COMPLEXE	337
III.4.1 Parabole	323	VI.5 FORMULES D'EULER	337
III.4.2 Ellipse et hyperbole	323	VI.6 MULTIPLICATION PAR LE NOMBRE	
a) Ellipse	324	COMPLEXE $\exp(j\alpha)$	338
b) Hyperbole	324	OM 7 : MATRICES	339
OM 4 : DÉRIVÉES ET DÉVELOPPE-		VII.1 DÉFINITION	340
MENTS LIMITÉS	325	VII.2 ALGÈBRE DES MATRICES	340
IV.1 DÉRIVÉE D'UNE FONCTION	326	VII.2.1 Matrices particulières	340
IV.1.1 Définition	326	VII.2.2 Matrices égales	340
IV.1.2 Interprétation géométrique	326	VII.2.3 Somme de deux matrices $q \times n$	340
IV.2 DÉRIVÉES PARTIELLES	326	VII.2.4 Multiplication d'une matrice	
IV.3 DÉRIVÉE D'UNE FONCTION		par un nombre	340
COMPOSÉE	327	VII.2.5 Multiplication de deux matrices	341
IV.3.1 Fonction d'une seule variable	327	a) Définition	341
IV.3.2 Fonction de plusieurs variables	327	b) Propriétés du produit matriciel	341

VII.3 DÉTERMINANTS DE MATRICES	
CARRÉES 2×2	341
VII.3.1 Définition.....	341
VII.3.2 Déterminant de la somme de deux matrices.....	342
VII.3.3 Déterminant du produit d'une matrice 2×2 par un nombre.....	342
VII.3.4 Déterminants du produit de deux matrices carrées 2×2	342
OM 8 : ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES	343
VIII.1 ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES	
LINÉAIRES.....	344
VIII.1.1 Équation différentielle linéaire du premier ordre.....	344
VIII.1.2 Équation différentielle linéaire du deuxième ordre.....	345
VIII.2 ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES	
NON LINÉAIRES.....	347
OM 9 : DIFFÉRENTIELLES.....	349
IX.1 DIFFÉRENTIELLE D'UNE FONCTION	350
IX.1.1 Définition.....	350
IX.1.2 Exemples.....	350
IX.1.3 Différentielle logarithmique.....	350
IX.1.4 Gradient d'une fonction.....	351
IX.2 SYSTÈMES DE COORDONNÉES.....	351
IX.2.1 Coordonnées cartésiennes.....	352
a) <i>Éléments de longueur, de surface et de volume.....</i>	352
b) <i>Gradient en coordonnées cartésiennes....</i>	352
IX.2.2 Coordonnées cylindriques.....	352
a) <i>Éléments de longueur, de surface et de volume.....</i>	352
b) <i>Gradient en coordonnées cylindriques....</i>	353
IX.2.3 Coordonnées sphériques.....	353
a) <i>Éléments de longueur, de surface et de volume.....</i>	353
b) <i>Gradient en coordonnées sphériques.....</i>	354
IX.3 FORMES DIFFÉRENTIELLES.....	354
IX.3.1 Définition.....	354
IX.3.2 Exemple.....	355
OM 10 : PROBABILITÉS.....	357
X.1 LANGAGE DES PROBABILITÉS.....	358
X.1.1 Événements.....	358
X.1.2 Espace des événements.....	358
X.1.3 Événements disjoints ou incompatibles...	358
X.1.4 Événement certain.....	358
X.2 PROBABILITÉS.....	359
X.2.1 Axiomes des probabilités de Kolmogorov.	359
X.2.2 Conséquences.....	359
a) <i>Somme des probabilités de deux événements contraires.....</i>	359
b) <i>Valeur des probabilités.....</i>	359
c) <i>Événements équiprobables.....</i>	359
X.2.3 Probabilité conditionnelle.....	360
X.2.4 Événements indépendants.....	360
X.3 VARIABLES ALÉATOIRES.....	361
X.3.1 Définition.....	361
X.3.2 Densité de probabilité.....	361
X.3.3 Fonction cumulative ou fonction de répartition.....	362
X.3.4 Valeur moyenne et moments d'une variable aléatoire.....	362
a) <i>Variable aléatoire discrète.....</i>	362
b) <i>Variable aléatoire continue.....</i>	362
X.4 LOIS DE PROBABILITÉ.....	363
X.4.1 Loi binomiale.....	364
a) <i>Définition.....</i>	364
b) <i>Moyenne et variance.....</i>	364
X.4.2 Loi de Poisson ou loi des événements rares.....	365
a) <i>Définition.....</i>	365
b) <i>Moyenne et variance.....</i>	365
X.4.3 Loi normale et loi de Gauss.....	366

Illustrations informatiques

II 1 : SIMILITUDE ET LOI D'ÉCHELLE	369
I.1 ÉQUATIONS DU MOUVEMENT D'UNE PLANÈTE	370
I.1.1 Loi fondamentale de la dynamique	370
I.1.2 Détermination du vecteur vitesse dans la base polaire	370
I.1.3 Détermination du vecteur accélération dans la base polaire	370
I.1.4 Équations du mouvement	371
I.2 RÉOLUTION ET CALCUL DE LA PÉRIODE	371
I.3 SI LA TERRE TOURNAIT AUTOUR D'AUTRES ÉTOILES.....	372
I.4 PÉRIODE DE RÉVOLUTION DES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE	374
I.5 COUPLE EXOÉTOILE - EXOPLANÈTE .	376
II 2 : RÉACTIONS NUCLÉAIRES EN CHAÎNE	379
II.1 POSITION DU PROBLÈME	380
II.2 FILIATION RADIOACTIVE À TROIS ÉLÉMENTS	381
II.3 NOYAU À DÉSINTÉGRATION RAPIDE	382
II.4 FILIATION RADIOACTIVE À QUATRE ÉLÉMENTS.....	383
II 3 : PORTRAIT DE PHASE	385
III.1 ÉQUATION DIFFÉRENTIELLE DU MOUVEMENT	386
III.2 FROTTEMENT SOLIDE.....	386
III.3 FROTTEMENT VISQUEUX TYPE STOKES	387
III.4 FROTTEMENT VISQUEUX TYPE VENTURI.....	389
II 4 : OSCILLATIONS FORCÉES ET RÉSONANCE	391
IV.1 MÉTHODOLOGIE	392
IV.1.1 Équations différentielles du mouvement..	392
IV.1.2 Variation de la fréquence de l'excitateur .	392
IV.1.3 Mise en oeuvre.....	392
IV.2 MAXIMUM D'ÉLONGATION	393
II 5 : FILTRES EN CASCADE	395
V.1 MATRICE DE TRANSFERT	396
V.2 FONCTION DE TRANSFERT	396
V.3 TRACÉ DES DIAGRAMMES DE BODE .	397
II 6 : PÉRIODE D'UN PENDULE SIMPLE.....	399
VI.1 ÉQUATIONS DU MOUVEMENT	400
VI.2 RÉOLUTION NUMÉRIQUE ET CALCUL DE LA PÉRIODE	400
VI.2.1 Méthode.....	400
VI.2.2 Représentation graphique et analyse....	401
II 7 : INTERACTION FORTE ENTRE NUCLÉONS.....	403
VII.1 ÉNERGIE POTENTIELLE EFFECTIVE	404
VII.2 GRAPHES DE E ET dE/dR	405
VII.3 VALEURS DE R QUI ANNULENT E ET dE/dR	406
VII.3.1 Valeurs de R qui annulent E	406
VII.3.2 Valeurs de R qui annulent dE/dR	408
II 8 : INFLUENCE DE L'ATMOSPHÈRE SUR LE MOUVEMENT DES SATELLITES TERRESTRES.....	411
VIII.1 ANALYSE QUANTITATIVE DU PROBLÈME	412
VIII.1.1 Force de frottement de Stokes avec α constant	412
VIII.1.2 Force de frottement de Venturi avec β constant	413
VIII.1.3 Force de frottement de Venturi avec β variable	413
VIII.2 ÉVOLUTION DE L'ALTITUDE DU SATELLITE	414
II 9 : CHAMPS ET ÉQUIPOTENTIELLES	415
IX.1 LIGNES DE CHAMP ET ÉQUIPOTENTIELLES	416
IX.1.1 Équipotentiels	416
IX.1.2 Champ de vecteurs	416

IX.2 CHAMP DE GRAVITATION DE DEUX MASSES PONCTUELLES.....	416	X.1 L'ÉQUATION AUX DÉRIVÉES PARTIELLES	420
IX.3 CHAMP ÉLECTRIQUE D'UN DOUBLET DE CHARGES OPPOSÉES	417	X.2 CONDITIONS INITIALES	421
II 10 : VIBRATIONS D'UNE CORDE DE GUITARE.....	419	X.3 CONDITIONS AUX LIMITES.....	421
		X.4 RÉOLUTION	421
Ouvertures vers la physique moderne			
OPM 1 : QU'EST-CE QUE LA RELATIVITÉ ?	425	I.3.5 Contraction des longueurs	433
I.1 LA RELATIVITÉ GALILÉENNE ?.....	426	I.3.6 Effet Doppler-Fizeau	434
I.1.1 L'espace est relatif et le temps est absolu .	427	I.4 LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE DE 1916... 434	
a) Coordonnées spatio-temporelles d'un événement.....	427	I.4.1 Caractère singulier de la gravitation	435
b) Transformation de Galilée sur les coordonnées d'un événement.....	427	a) Micropesanteur dans un avion	435
c) Composition des vitesses et des accélérations 427		b) Microgravité dans une cabine spatiale.....	435
I.1.2 Invariance des lois de la mécanique	428	I.4.2 Qu'appelle-t-on courbure de l'espace-temps ?	436
a) Le mouvement (de \mathcal{R}' par rapport à \mathcal{R}) n'est rien.....	428	I.4.3 Dans quel référentiel doit-on écrire les lois de la physique ?	436
b) Relativité galiléenne et loi fondamentale de la dynamique.....	428	I.4.4 Tests de validité de la relativité générale.. 436	
c) Non-invariance de deux des quatre lois de l'électromagnétisme.....	428	a) Avance du périhélie de Mercure.....	436
I.1.3 Forces d'inertie d'entraînement et de Coriolis.....	429	b) Déviation des rayons lumineux par un champ de gravitation.....	437
I.2 LE RELATIVISME PHILOSOPHIQUE....	429	c) Influence du potentiel de gravitation sur les horloges.....	437
I.2.1 Qu'est-ce que le relativisme philosophique ?	429	OPM 2 : QU'EST-CE QUE LA COSMOLOGIE ?	439
I.2.2 Peut-on dire n'importe quoi en physique au nom du relativisme ?	430	II.1 CONSTRUCTION HISTORIQUE DES REPRÉSENTATIONS DU MONDE.....	440
I.3 LA RELATIVITÉ RESTREINTE DE 1905 430		II.1.1 Dimension de la Terre	440
I.3.1 Le principe de relativité de Poincaré-Einstein.....	431	II.1.2 Mesure des distances Terre-Lune et Terre-Soleil.....	441
I.3.2 Le temps est relatif, comme l'espace	431	II.1.3 Géocentrisme et héliocentrisme	442
I.3.3 Un concept universel, l'intervalle entre deux événements.....	431	II.2 L'UNIVERS À DIFFÉRENTES ÉCHELLES	443
I.3.4 Dilatation des durées d'un phénomène	432	II.2.1 Système solaire et systèmes planétaires... 443	
a) Que signifie la dilatation des durées ?....	432	a) Le système solaire	443
b) Paradoxe des jumeaux de Langevin.....	432	b) Systèmes planétaires.....	443
c) Correction RR dans la localisation spatiale des objets.....	433	II.2.2 Étoiles	443
		II.2.3 Galaxies et groupes de galaxies	444
		a) La Voie Lactée	444

b) <i>Les galaxies</i>	445
c) <i>Le groupe local</i>	445
II.2.4 Amas et superamas de galaxies	445
II.2.5 Le principe cosmologique	446
a) <i>L'Univers à grande échelle</i>	446
b) <i>Énoncé</i>	446
II.3 LES OBSERVATIONS COSMOLOGIQUES.....	446
II.3.1 Étudier l'Univers	446
II.3.2 L'expansion de l'Univers	446
a) <i>Loi de Hubble</i>	446
b) <i>Expansion accélérée</i>	447
c) <i>Constante cosmologique</i>	447
II.3.3 Le fond diffus cosmologique	447
II.3.4 L'abondance cosmologique des éléments chimiques.....	448
II.3.5 La matière visible et la matière noire.....	449
a) <i>La matière visible</i>	449
b) <i>La matière noire</i>	449
c) <i>La théorie MOND</i>	450
II.4 LES MODÈLES DU BIG BANG.....	450
II.4.1 Expansion, facteur d'échelle et courbure.....	451
II.4.2 Équations de Friedmann-Lemaître	451
II.4.3 Modèle stationnaire d'Einstein	451
II.4.4 Modèle en mouvement et sans matière de De Sitter	451
II.4.5 Caractéristiques vraisemblables de l'Univers	452
OPM 3 : QU'EST-CE QUE LE CHAOS ? 453	
III.1 INTRODUCTION HISTORIQUE ET EXPÉRIMENTALE	454
III.1.1 Poincaré et le problème des trois corps ..	454
III.1.2 Lorenz et la prévision météorologique ...	455
a) <i>Mise en évidence du chaos</i>	455
b) <i>Modèle de Lorenz</i>	455
c) <i>Prévision du temps en météorologie</i>	456
d) <i>Analogie mécanique : la roue hydraulique</i>	457
e) <i>Comportements similaires en géophysique</i>	457
III.1.3 Autres exemples	458
III.2 DÉTERMINISME, HASARD ET CHAOS DÉTERMINISTE.....	458
III.2.1 Déterminisme laplacien	458
III.2.2 Hasard	458

III.2.3 Chaos déterministe	459
a) <i>Manifestations du chaos</i>	459
b) <i>Définition générale du chaos</i>	460
III.2.4 Développements récents du concept de chaos	460
III.3 APPARITION ET CONTRÔLE DU CHAOS	460
III.3.1 Cascade sous harmonique ou transition de Feigenbaum.....	461
III.3.2 Intermittence ou transition de Pomeau-Manneville	462
III.3.3 Quasi-périodicité ou transition de Ruelle-Takens.....	463
III.3.4 Contrôler le chaos	463
OPM 4 : QU'EST-CE QUE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?	465
IV.1 SUCCÈS ET LIMITES DE LA PHYSIQUE CLASSIQUE.....	466
IV.1.1 Les succès de la physique classique	466
IV.1.2 L'ambition d'universalité en physique ...	467
IV.1.3 Fondements épistémologiques de la physique classique	467
IV.1.4 Déterminisme et prédictibilité en physique classique	468
IV.1.5 Limites de la physique classique	468
IV.2 SUCCÈS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE	468
IV.2.1 Aspects historiques	468
IV.2.2 La physique quantique au quotidien	469
IV.2.3 Aspect ondulatoire et imprédictibilité ...	470
IV.2.4 Originalité fondamentale de la physique quantique.....	470
a) <i>Principe de superposition</i>	470
b) <i>Équation de Schrödinger</i>	471
c) <i>Interprétation physique</i>	471
d) <i>Effet tunnel</i>	471
e) <i>Déterminisme et imprédictibilité en physique quantique</i>	472
f) <i>Paradoxe du chat de Schrödinger. Décohérence</i>	472
IV.2.5 Fondements épistémologiques de la physique quantique.....	472
IV.2.6 Tout est quantique !.....	473
IV.2.7 Le réalisme et la physique quantique	473
IV.2.8 L'enseignement de la physique quantique	473

OPM 5 : QU'EST-CE QUE LA NANOTECHNOLOGIE ? 477

V.1 NANOSYSTÈMES 478

V.1.1 Nanosurfaces ou nanofeuilles 478

V.1.2 Nanofils et nanotubes 479

V.1.3 Nanoparticules 480

V.1.4 Nanocomposites 481

V.2 OBSERVATION ET MANIPULATION DES NANOSYSTÈMES 482

V.2.1 Observations à grande distance 482

a) Observation avec un microscope électronique 482

b) Observation avec des ondes électromagnétiques 482

V.2.2 Observations à courte distance 483

a) Microscope à effet tunnel 483

b) Microscope à force atomique 484

V.2.3 Fabrication et manipulation 484

V.3 NANOTECHNOLOGIES ET SOCIÉTÉ .. 485

V.3.1 Informatique et liberté 485

V.3.2 Biologie et santé 485

V.3.3 Environnement et développement durable 485

INDEX 487

BIBLIOGRAPHIE 493

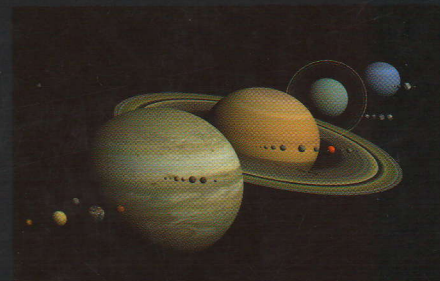
PHYSIQUE

Une introduction

• Sous la direction de José-Philippe PÉREZ •

Olivier PUJOL, Christophe LAGOUTE,
Pascal PUECH et Éric ANTERRIEU

Avec travaux dirigés résolus et
illustrations informatiques



Cet ouvrage est une introduction à l'enseignement de la physique, destinée aux étudiants qui abordent des études scientifiques après le baccalauréat.

Il rassemble, en dix leçons, les bases de la physique déjà vues, et les développe, à l'aide de dix outils mathématiques élémentaires, de dix illustrations informatiques et de cinq ouvertures vers la physique moderne.

Le livre s'adresse principalement à tous les étudiants scientifiques entrant dans un établissement d'enseignement supérieur (universités, CPGE, INSA, IUT, etc.).

Les auteurs l'ont voulu attractif et moderne ; pour cela, ils se sont appuyés, d'une part sur leur formation de professeurs agrégés de physique, d'autre part sur leurs activités de recherche dans le centre universitaire de Toulouse.

En outre, ils l'ont voulu efficace ; pour cette raison, l'ouvrage comporte beaucoup d'exemples concrets, souligne l'intérêt des analyses qualitatives préalables, insiste sur les ordres de grandeur et prolonge chaque leçon par dix travaux dirigés, constitués chacun de dix questions de cours et de dix exercices résolus.

Enfin, en raison de son contenu, cette introduction pourrait être utile plus largement à tous ceux, étudiants ou non, physiciens ou non, professionnels de l'enseignement des sciences ou non, qui sont intéressés par la science (physique et sciences spécialisées) et son enseignement.

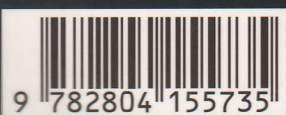
José-Philippe PÉREZ est professeur émérite de physique de l'Université de Toulouse.

Olivier PUJOL est maître de conférence à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'Aérodynamique de l'Observatoire Midi-Pyrénées (agrégé et docteur en physique de l'atmosphère).

Christophe LAGOUTE est professeur de physique, attaché de laboratoire au lycée Bellevue de Toulouse, et chercheur associé au Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées (agrégé de physique et docteur en astrophysique).

Pascal PUECH est maître de conférence à l'Université de Toulouse et chercheur au CEMES-CNRS de Toulouse (agrégé de physique et docteur en physique du solide).

Eric ANTERRIEU est ingénieur CNRS en informatique au Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées (ingénieur INSA et docteur en analyse et traitement d'image).



PHYINTRO

ISBN 978-2-8041-5573-5