

# Table des Matières

Préface xiii

## **PARTIE I Les Fondements 1**

### **CHAPITRE 1 Lois du Mouvement de Newton 3**

---

- 1.1 Mécanique Classique 3
- 1.2 L'espace et le temps 4
- 1.3 Masse et force 11
- 1.4 Première et deuxième lois de Newton, référentiels inertiels 14
- 1.5 Troisième loi et conservation de la quantité de mouvement 19
- 1.6 Deuxième loi de Newton en coordonnées cartésiennes 26
- 1.7 Coordonnées polaires à deux dimensions 29
- Principales définitions et équations du chapitre 1 38
- Problèmes du chapitre 1 38

### **CHAPITRE 2 Projectiles et Particules Chargées 47**

---

- 2.1 Résistance de l'air 47
- 2.2 Résistance linéaire de l'air 51
- 2.3 Trajectoire et portée dans un milieu linéaire 59
- 2.4 Résistance quadratique de l'air 63
- 2.5 Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme 72
- 2.6 Exponentielles complexes 75
- 2.7 Solution pour le mouvement d'une particule chargée dans un champ B 77
- Principales définitions et équations du Chapitre 2 79

Problèmes du chapitre 2 79

- 3.1 Conservation de la quantité de mouvement 91
- 3.2 Fusées 93
- 3.3 Centre de masse (CM) 95
- 3.4 Moment cinétique d'une particule 98
- 3.5 Moment cinétique de plusieurs particules 103
- Principales définitions et équations du chapitre 3 109
- Problèmes du chapitre 3 110

---

**CHAPITRE 4** Énergie 117

---

- 4.1 Énergie cinétique et travail 117
- 4.2 Énergie potentielle et forces conservatives 121
- 4.3 Force comme gradient de l'énergie potentielle 129
- 4.4 La deuxième condition pour que  $F$  soit conservative 132
- 4.5 Énergie potentielle variable dans le temps 135
- 4.6 Énergie des mouvements unidimensionnels rectilignes 137
- 4.7 Systèmes unidimensionnels curvilignes 144
- 4.8 Forces centrales 149
- 4.9 Énergie d'interaction de deux particules 154
- 4.10 Énergie d'un système de plusieurs particules 161
- Principales définitions et équations du chapitre 4 166
- Problèmes du chapitre 4 167

---

**CHAPITRE 5** Oscillations 181

---

- 5.1 Loi de Hooke 181
- 5.2 Oscillations harmoniques 184
- 5.3 Oscillateurs à deux dimensions 190
- 5.4 Oscillations amorties 194
- 5.5 Oscillations forcées 200
- 5.6 Résonance 209
- 5.7 Série de Fourier\* 216
- 5.8 Oscillateur excité par une force périodique quelconque (solution en série de Fourier)\* 221
- 5.9 Moyenne quadratique (RMS) du déplacement, théorème de Parseval\* 227
- Principales définitions et équations du Chapitre 5 230
- Problèmes du chapitre 5 232

---

\* Les sections marquées d'un astérisque peuvent être omises en première lecture.

**CHAPITRE 6** Calcul des variations 241

---

- 6.1 Deux exemples 242
- 6.2 Équation d'Euler-Lagrange 245
- 6.3 Applications de l'équation d'Euler-Lagrange 248
- 6.4 Systèmes à plusieurs fonctions 253
- Principales définitions et équations du Chapitre 6 258
- Problèmes du chapitre 6 258

**CHAPITRE 7** Équations de Lagrange 265

---

- 7.1 Équations de Lagrange pour un mouvement sans contraintes 266
- 7.2 Systèmes contraints, un exemple 274
- 7.3 Systèmes contraints dans le cas général 276
- 7.4 Démonstration des équations de Lagrange pour des systèmes contraints 280
- 7.5 Exemples d'utilisation des équations de Lagrange 284
- 7.6 Quantités de mouvement généralisées et coordonnées cycliques 297
- 7.7 Conclusion 298
- 7.8 Lois de conservation\* 299
- 7.9 Équations de Lagrange pour les forces électromagnétiques\* 304
- 7.10 Multiplicateurs de Lagrange et forces de contrainte\* 307
- Principales définitions et équations du chapitre 7 313
- Problèmes du Chapitre 7 314

**CHAPITRE 8** Problème à deux corps en interaction centrale 327

---

- 8.1 Le problème 327
- 8.2 Coordonnées du CM et coordonnées relatives, masse réduite 329
- 8.3 Équations du mouvement 331
- 8.4 Le problème unidimensionnel équivalent 334
- 8.5 Équation de l'orbite 341
- 8.6 Orbites de Kepler 343
- 8.7 Orbites non liées de Kepler 349
- 8.8 Changement d'orbite 351
- Principales définitions et équations du Chapitre 8 355
- Problèmes du Chapitre 8 356

- 9.1 Référentiels accélérés non tournants 364
- 9.2 Les marées 367
- 9.3 Vecteur-rotation 373
- 9.4 Dérivées par rapport au temps dans un référentiel tournant 377
- 9.5 La deuxième loi de Newton dans un référentiel tournant 379
- 9.6 Force centrifuge 382
- 9.7 Force de Coriolis 386
- 9.8 Chute libre et force de Coriolis 390
- 9.9 Pendule de Foucault 393
- 9.10 Force de Coriolis et accélération de Coriolis 397
- Principales définitions et équations du chapitre 9 398
- Problèmes du chapitre 9 400

**CHAPITRE 10 Mouvement de rotation des corps rigides 407**

---

- 10.1 Propriétés du centre de masse 407
- 10.2 Rotation autour d'un axe fixe 413
- 10.3 Rotation autour d'un axe quelconque, tenseur d'inertie 419
- 10.4 Axes principaux d'inertie 428
- 10.5 Détermination des axes principaux, équations aux valeurs propres 431
- 10.6 Précession d'une toupie soumise à un moment de force faible 435
- 10.7 Équations d'Euler 438
- 10.8 Équations d'Euler dans le cas d'un moment de force nul 440
- 10.9 Angles d'Euler\* 445
- 10.10 Rotation d'une toupie\* 448
- Principales définitions et équations du chapitre 10 452
- Problèmes du chapitre 10 453

**CHAPITRE 11 Oscillateurs couplés et modes propres 463**

---

- 11.1 Deux masses et trois ressorts 464
- 11.2 Ressorts identiques et masses égales 468
- 11.3 Cas de deux oscillateurs faiblement couplés 473
- 11.4 Formalisme lagrangien : le pendule double 478
- 11.5 Cas général 484
- 11.6 Trois pendules couplés 489
- 11.7 Coordonnées normales\* 493
- Principales définitions et équations du Chapitre 11 496
- Problèmes du chapitre 11 497

**CHAPITRE 12** Mécanique non linéaire et chaos 507

- 12.1 Linéarité et non-linéarité 508
- 12.2 Le pendule amorti et forcé (PAF) 513
- 12.3 Quelques caractéristiques prévisibles du PAF 515
- 12.4 Le PAF : un exemple du chaos 518
- 12.5 Chaos et sensibilité aux conditions initiales 528
- 12.6 Diagrammes de bifurcation 537
- 12.7 Orbites dans l'espace d'état 541
- 12.8 Sections de Poincaré 550
- 12.9 Application logistique 555
- Principales définitions et équations du chapitre 12 571
- Problèmes du chapitre 12 572

**CHAPITRE 13** Mécanique hamiltonienne 581

- 13.1 Les variables de base 582
- 13.2 Équations de Hamilton pour les systèmes unidimensionnels 584
- 13.3 Équations de Hamilton pour les systèmes multidimensionnels 589
- 13.4 Coordonnées cycliques 596
- 13.5 Équations de Lagrange et équations de Hamilton 598
- 13.6 Orbites dans l'espace des phases 600
- 13.7 Théorème de Liouville\* 606
- Principales définitions et équations du chapitre 13 614
- Problèmes du chapitre 13 614

**CHAPITRE 14** Théorie des collisions 623

- 14.1 Angle de diffusion et paramètre d'impact 624
- 14.2 Section efficace de collision 627
- 14.3 Généralisation de la notion de section efficace 631
- 14.4 Section efficace différentielle 636
- 14.5 Calcul de la section efficace différentielle 640
- 14.6 Diffusion de Rutherford 643
- 14.7 Sections efficaces dans divers référentiels\* 648
- 14.8 Relation entre les angles de diffusion dans le CM et dans le laboratoire\* 652

Principales définitions et équations du chapitre 14 656

Problèmes du chapitre 14 657

- 15.1 Relativité 666
- 15.2 Relativité galiléenne 667
- 15.3 Postulats de la relativité restreinte 672
- 15.4 Relativité du temps, dilatation des durées 675
- 15.5 Contraction des longueurs 681
- 15.6 Transformation de Lorentz 684
- 15.7 Vitesse relativiste, loi de composition des vitesses 689
- 15.8 Espace-temps à quatre dimensions, quadrivecteurs 692
- 15.9 Produit scalaire invariant 698
- 15.10 Cône de lumière 700
- 15.11 Règle du quotient et effet Doppler 706
- 15.12 Masse, quadri-vitesse et quadri-impulsion 709
- 15.13 L'énergie comme quatrième composante de l'impulsion 715
- 15.14 Collisions 722
- 15.15 Force en relativité 728
- 15.16 Particules de masse nulle, le photon 731
- 15.17 Tenseurs\* 736
- 15.18 Électrodynamique et relativité 739
  - Principales définitions et équations du chapitre 15 745
  - Problèmes du chapitre 15 747

**CHAPITRE 16** Mécanique des milieux continus 765

---

- 16.1 Mouvement transversal d'une corde tendue 767
- 16.2 Équation des ondes 770
- 16.3 Conditions aux limites, ondes sur une corde finie\* 774
- 16.4 Équation des ondes à trois dimensions 780
- 16.5 Forces volumiques et forces de contact 784
- 16.6 Contrainte et déformation, modules d'élasticité 788
- 16.7 Tenseur des contraintes 791
- 16.8 Tenseur des déformations d'un solide 797
- 16.9 Relation entre la contrainte et la déformation, loi de Hooke 803
- 16.10 Équation du mouvement pour un solide élastique 806
- 16.11 Ondes longitudinales et ondes transversales dans un solide 810
- 16.12 Fluides : description du mouvement\* 812
- 16.13 Ondes dans un fluide\* 816
  - Principales définitions et équations du chapitre 16 820
  - Problèmes du chapitre 16 822

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| <b>ANNEXES</b> | Diagonalisation des matrices réelles et symétriques | 829 |
| A.1            | Diagonalisation d'une seule matrice                 | 829 |
| A.2            | Diagonalisation simultanée de deux matrices         | 833 |
|                | Bibliographie                                       | 837 |
|                | Réponses des problèmes de numéros impairs           | 839 |
|                | Index   | 867 |

Matériel protégé par le droit d'auteur