

Table des matières

| | |
|--|----|
| Avant-propos..... | 7 |
| Chapitre 1 – Formulation lagrangienne..... | 13 |
| COURS 13 | |
| 1.1. Introduction | 13 |
| 1.2. Coordonnées généralisées..... | 15 |
| 1.3. Forces généralisées..... | 22 |
| 1.3.1. Déplacements virtuels..... | 23 |
| 1.3.2. Forces généralisées | 25 |
| Résumé – Équations de Lagrange : mode d’emploi | 28 |
| EXERCICES PROPOSÉS DANS LE COURS | 28 |
| E1.1. Permutation des dérivées | 28 |
| E1.2. Force de réaction de la perle | 28 |
| E1.3. Forces d’inertie généralisées..... | 29 |
| COMPLÉMENTS | 30 |
| C1.1. Rappels de cinématique | 30 |
| C1.1.1. Composition des vitesses..... | 30 |
| C1.1.2. Composition des accélérations | 30 |
| C1.1.3. Énergie cinétique d’un corps solide | 31 |
| C1.1.4. Roulement sans glissement..... | 33 |
| C1.2. Liaisons..... | 34 |
| C1.2.1. Multiplicateurs de Lagrange | 34 |
| C1.2.2. Degrés de liberté d’un système..... | 37 |
| C1.3. Commentaires..... | 39 |
| EXERCICES ET PROBLÈMES..... | 39 |
| E1.4. La fronde..... | 39 |
| E1.5. La corde glissant sur la table..... | 40 |
| E1.6. Cylindre roulant sur un plateau mobile | 40 |
| E1.7. Masse glissant sur un coin glissant..... | 41 |
| E1.8. Le cric | 41 |
| E1.9. Principe de d’Alembert et poussée d’Archimède..... | 42 |
| E1.10. Une porte de garage astucieuse..... | 43 |
| P1.11. Une expérience pour mesurer la vitesse de rotation de la Terre..... | 44 |
| P1.12. L’indicateur de virage | 44 |
| P1.13. Le pendule de Huygens..... | 46 |
| P1.14. Essieu libre sur un plan incliné (liaisons non holonômes)..... | 47 |

| | |
|---|----|
| INDICATIONS ET RÉPONSES..... | 48 |
| E1.4. La fronde..... | 48 |
| E1.5. La corde glissant sur la table..... | 48 |
| E1.6. Cylindre roulant sur un plateau mobile..... | 49 |
| E1.7. Masse glissant sur un coin..... | 49 |
| E1.8. Le cric..... | 49 |
| E1.9. Poussée d'Archimède..... | 49 |
| E1.10. Porte de garage astucieuse..... | 49 |
| P1.11. Expérience de Compton..... | 49 |
| P1.12. Indicateur de virage..... | 50 |
| P1.13. Pendule de Huygens..... | 50 |
| P1.14. Essieu libre sur un plan incliné..... | 50 |
| Chapitre 2 – Systèmes lagrangiens..... | 53 |
| COURS..... | 53 |
| 2.1. Introduction..... | 53 |
| 2.2. Fonction de Lagrange..... | 54 |
| 2.3. Intégrales premières..... | 57 |
| 2.3.1. Coordonnée cyclique..... | 57 |
| 2.3.2. Translation continue du temps..... | 58 |
| 2.3.3. Translation continue d'espace..... | 60 |
| 2.3.4. Invariance par rotation continue d'espace..... | 61 |
| 2.3.5. Conclusion sur les intégrales premières..... | 62 |
| 2.4. Systèmes à deux corps..... | 62 |
| 2.4.1. Formulation..... | 62 |
| 2.4.2. Invariance par translation du temps..... | 63 |
| 2.4.3. Invariance par translation d'espace..... | 63 |
| 2.4.4. Invariance par rotation..... | 65 |
| 2.4.5. Description complète du mouvement par quadrature..... | 67 |
| 2.5. Équilibre et petites oscillations..... | 69 |
| 2.5.1. Rappels pour les systèmes à une dimension..... | 70 |
| 2.5.2. Cas de deux coordonnées..... | 72 |
| Résumé – Fonction de Lagrange..... | 76 |
| EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS..... | 76 |
| E2.1. Changement de lagrangien..... | 76 |
| E2.2. Intégrale première provenant de la translation dans le temps..... | 77 |
| E2.3. Théorème d'Euler..... | 77 |
| E2.4. Le cerceau à vitesse angulaire constante..... | 78 |
| COMPLEMENTS..... | 79 |
| C2.1. Particule dans un champ électromagnétique..... | 79 |
| C2.1.1. Potentiel généralisé et force de Lorentz..... | 79 |
| C2.1.2. Arbitraire du lagrangien et invariance de jauge..... | 80 |
| C2.2. Passage au continu..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| C2.2.1. Corde vibrante..... | 80 |
| C2.2.2. Chaîne de pendules..... | 82 |
| C2.3. Traitement général des petites oscillations..... | 83 |
| C2.4. Le théorème de Noether..... | 88 |
| C2.5. Lien entre impulsion individuelle et moment angulaire total associé aux rotations..... | 86 |
| C2.6. Fonction de dissipation..... | 88 |
| C2.7. Le problème de Kepler..... | 89 |
| EXERCICES ET PROBLEMES..... | 92 |
| E2.5. Disque sur un coin en mouvement..... | 92 |
| E2.6. Constance du moment cinétique..... | 92 |
| E2.7. Mouvement cyclotron..... | 93 |
| E2.8. Intégrale de Painlevé (1)..... | 93 |
| E2.9. Intégrale de Painlevé (2)..... | 94 |
| E2.10. Lagrangien dans un référentiel tournant..... | 94 |
| E2.11. Application du théorème de Noether..... | 95 |
| E2.12. Ondes transversales élastiques dans un solide (ondes P)..... | 95 |
| E2.13. Petites oscillations avec amortissement..... | 96 |
| P2.14. Dérive d'une particule dans un champ électromagnétique constant..... | 97 |
| P2.15. Vibration d'une molécule linéaire triatomique. Le mode "mou"..... | 98 |
| P2.16. Le pendule de L. Foucault..... | 98 |
| P2.17. Précession des équinoxes..... | 100 |
| P2.18. Système de trois particules..... | 102 |
| P2.19. Vibration de flexion d'une lame..... | 103 |
| P2.20. Ondes solitaires..... | 105 |
| P2.21. Modes de vibration d'une chaîne d'atomes..... | 106 |
| INDICATIONS ET REPONSES..... | 107 |
| E2.5. Disque sur un coin en mouvement..... | 107 |
| E2.6. Constance du moment cinétique..... | 107 |
| E2.7. Mouvement cyclotron..... | 107 |
| E2.8. Intégrale de Painlevé (1)..... | 107 |
| E2.9. Intégrale de Painlevé (2)..... | 108 |
| E2.10. Lagrangien dans un référentiel tournant..... | 108 |
| E2.11. Application du théorème de Noether..... | 108 |
| E2.12. Ondes transversales élastiques dans un solide (ondes P)..... | 109 |
| E2.13. Petites oscillations avec amortissement..... | 109 |
| P2.14. Dérive d'une particule dans un champ électromagnétique constant..... | 109 |
| P2.15. Vibration d'une molécule linéaire triatomique. Le mode "mou"..... | 110 |
| P2.16. Le pendule de L. Foucault..... | 111 |
| P2.17. Précession des équinoxes..... | 111 |
| P2.18. Système de trois particules..... | 112 |
| P2.19. Vibration de flexion d'une lame..... | 113 |
| P2.20. Ondes solitaires..... | 113 |
| P2.21. Modes de vibration d'une chaîne d'atomes..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Chapitre 3 – Le principe de Hamilton | 117 |
| COURS | 117 |
| 3.1. La fonctionnelle action..... | 118 |
| 3.1.1. Notion de fonctionnelle..... | 118 |
| 3.1.2. Fonctionnelle action..... | 119 |
| 3.2. Méthode des variations avec des contraintes | 125 |
| 3.2.1. Contraintes de type holonôme | 125 |
| 3.2.2. Contraintes de forme intégrale | 128 |
| 3.3. Mécanique relativiste pour une particule | 131 |
| Résumé – Principe de Hamilton | 134 |
| EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS | 135 |
| E3.1. Force de Lorentz..... | 135 |
| E3.2. Fonctionnelle avec dérivée seconde | 136 |
| COMPLEMENTS | 136 |
| C3.1. Action pour un nombre infini de degrés de liberté : équations de Lagrange pour les champs..... | 136 |
| C3.2. L'action pour le champ scalaire : le potentiel de Yukawa..... | 140 |
| C3.3. Action et mécanique quantique..... | 141 |
| EXERCICES ET PROBLEMES..... | 143 |
| E3.3. La chute libre..... | 143 |
| E3.4. Action minimum ou maximum ?..... | 144 |
| E3.5. Principe de moindre action ?..... | 144 |
| E3.6. N'existe-t-il qu'une seule solution qui rende stationnaire l'action ?..... | 145 |
| E3.7. Principe de Fermat | 146 |
| E3.8. Principe de Maupertuis | 146 |
| E3.9. Champ de force uniforme | 147 |
| E3.10. Mouvement libre sur un ellipsoïde | 148 |
| E3.11. Aire minimum à volume fixé..... | 148 |
| E3.12. Particule relativiste dans un champ de force central..... | 149 |
| E3.13. Chaîne de pendules..... | 150 |
| E3.14. Équation d'onde pour la lame flexible libre..... | 151 |
| E3.15. Champ de Schrödinger..... | 151 |
| P3.16. Forme des films de savon..... | 151 |
| E3.17. La stratégie du skieur | 152 |
| P3.18. Loi de Laplace sur la tension superficielle..... | 153 |
| P3.19. Précession de l'orbite de Mercure | 154 |
| INDICATIONS ET REPONSES..... | 155 |
| E3.3. La chute libre..... | 155 |
| E3.4. Minimum ou maximum ?..... | 155 |
| E3.5. Principe de moindre action ?..... | 156 |
| E3.6. N'existe-t-il qu'une seule solution qui rende stationnaire l'action ?..... | 156 |
| E3.7. Principe de Fermat | 157 |

| | |
|---|-----|
| E3.8. Principe de Maupertuis | 157 |
| E3.9. Champ de force uniforme | 158 |
| E3.10. Mouvement libre sur un ellipsoïde | 158 |
| E3.11. Aire minimum à volume fixé | 158 |
| E3.12. Particule relativiste dans un champ de force central | 158 |
| E3.13. Chaîne de pendules | 159 |
| E3.14. Équation d'onde pour la lame flexible libre | 160 |
| E3.15. Champ de Schrödinger | 160 |
| P3.16. Forme des films de savon | 160 |
| P3.17. La stratégie du skieur | 160 |
| P3.18. Loi de Laplace sur la tension superficielle | 160 |
| P3.19. Précession de l'orbite de Mercure | 161 |
| Chapitre 4 – Formalisme hamiltonien | 163 |
| COURS | 163 |
| 4.1. Introduction | 163 |
| 4.2. La transformation de Legendre d'une fonction | 165 |
| 4.3. Les équations de Hamilton | 167 |
| 4.3.1. La fonction de Hamilton | 167 |
| 4.3.2. Les équations de Hamilton | 168 |
| 4.4. Théorème de Liouville | 171 |
| 4.4.1. Flot hamiltonien | 171 |
| 4.4.2. Théorème de Liouville | 174 |
| 4.4.3. Théorème du retour de Poincaré | 177 |
| 4.5. Systèmes autonomes à un degré de liberté | 179 |
| Résumé – Équations de Hamilton | 187 |
| EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS | 189 |
| E4.1. Transformation de Legendre inverse | 189 |
| E4.2. Conservation de l'aire | 189 |
| E4.3. Le premier invariant intégral | 190 |
| E4.4. Comportement autour d'un point elliptique | 190 |
| COMPLEMENTS | 191 |
| C4.1. Principe de moindre action et formalisme hamiltonien | 191 |
| C4.2. Résonance paramétrique | 192 |
| C4.3. Espace de phase et mécanique quantique | 196 |
| EXERCICES ET PROBLEMES | 198 |
| E4.5. Plus rapide et plus écologique que le Concorde | 198 |
| E4.6. Les charges électriques peuvent être piégées par des conducteurs | 199 |
| E4.7. Double puits parabolique | 200 |
| E4.8. Hamiltonien d'une particule chargée | 201 |
| E4.9. Quid des systèmes non autonomes | 201 |
| E4.10. Temps et énergie : variables conjuguées ? | 201 |
| E4.11. Stabilité des trajectoires circulaires dans un potentiel central | 202 |

| | |
|---|-----|
| E4.12. Trajectoires dans un champ de force central..... | 203 |
| E4.13. Symétrie de la trajectoire | 203 |
| E4.14. Hamiltonien dans un référentiel tournant..... | 204 |
| E4.15. Flots hamiltoniens identiques | 204 |
| E4.16. Équation de Maxwell-Vlasov | 204 |
| P4.17. Perle sur le cerceau..... | 205 |
| P4.18. Le pendule inversé | 206 |
| P4.19. Lumineuses équations de Hamilton..... | 207 |
| P4.20. Le vecteur de Runge-Lenz..... | 208 |
| P4.21. L'application du billard..... | 209 |
| INDICATIONS ET REPONSES..... | 210 |
| E4.5. Plus rapide et plus écologique que le Concorde..... | 210 |
| E4.6. Les charges électriques piégées par des conducteurs | 211 |
| E4.7. Double puits parabolique | 211 |
| E4.8. Hamiltonien d'une particule chargée..... | 212 |
| E4.9. Quid des systèmes non autonomes | 212 |
| E4.10. Temps et énergie : variables conjuguées ? | 212 |
| E4.11. Trajectoires circulaires dans un potentiel central..... | 212 |
| E4.12. Trajectoires dans un champ de force central..... | 213 |
| E4.13. Symétrie de la trajectoire | 214 |
| E4.14. Hamiltonien dans un référentiel tournant..... | 214 |
| E4.15. Flots hamiltoniens identiques | 214 |
| E4.16. Équation de Maxwell-Vlasov | 214 |
| P4.17. Perle sur le cerceau..... | 214 |
| P4.18. Le pendule inversé | 216 |
| P4.19. Lumineuses équations de Hamilton..... | 217 |
| P4.20. Le vecteur de Runge-Lenz..... | 217 |
| P4.21. L'application du billard..... | 217 |
| Chapitre 5 – Formalisme de Hamilton-Jacobi | 219 |
| COURS..... | 219 |
| 5.1. La fonction action : deuxième acte..... | 219 |
| 5.2. L'équation de Hamilton-Jacobi | 222 |
| 5.3. Le théorème de Jacobi..... | 224 |
| 5.4. La fonction action réduite | 226 |
| 5.5. Cas de séparation des variables | 228 |
| Résumé – Équations de Hamilton-Jacobi..... | 233 |
| EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS | 233 |
| E5.1. Action pour l'oscillateur harmonique à une dimension..... | 233 |
| E5.2. Action versus action réduite | 234 |
| COMPLEMENTS | 235 |
| C5.1. Principe de Maupertuis | 235 |
| C5.2. Analogie optique-mécanique | 239 |

| | |
|--|-----|
| C5.3. Ondes / approximation eikonale | 241 |
| C5.4. Schrödinger versus Hamilton-Jacobi | 243 |
| EXERCICES ET PROBLEMES | 244 |
| E5.3. Vitesse de phase et vitesse de groupe | 244 |
| E5.4. Hamiltonien séparable, action séparable | 245 |
| E5.5. Principe de Maupertuis avec champ électromagnétique | 246 |
| E5.6. Mouvement sur une surface et géodésique | 247 |
| P5.7. Surface d'onde pour la chute libre | 248 |
| P5.8. Effet Stark | 248 |
| P5.9. Fronts d'onde bizarres | 248 |
| P5.10. Lentille électrostatique | 249 |
| P5.11. Orbites des satellites de la Terre | 250 |
| INDICATIONS ET REPONSES | 253 |
| E5.3. Vitesse de phase et vitesse de groupe | 253 |
| E5.4. Hamiltonien séparable, action séparable | 253 |
| E5.5. Principe de Maupertuis avec champ électromagnétique | 254 |
| E5.6. Mouvement sur une surface et géodésique | 254 |
| P5.7. Surface d'onde et chute libre | 254 |
| P5.8. Effet Stark | 255 |
| P5.9. Fronts d'onde bizarres | 255 |
| P5.10. Lentille électrostatique | 256 |
| P5.11. Orbites des satellites de la Terre | 256 |
| Chapitre 6 – Systèmes intégrables | 257 |
| COURS | 257 |
| 6.1. Systèmes réguliers ou chaotiques ? | 257 |
| 6.2. Notion et exemple de systèmes intégrables | 259 |
| 6.3. Un système intégrable très simple | 261 |
| 6.4. Systèmes intégrables à plus d'un degré de liberté | 267 |
| 6.4.1. Crochets de Poisson : le minimum à savoir | 267 |
| 6.4.2. Systèmes intégrables | 269 |
| 6.5. Variables angles-actions | 273 |
| 6.5.1. Indépendance du contour | 274 |
| 6.5.2. Définition des variables angles-actions | 275 |
| 6.5.3. Quasi-périodicité ou périodicité | 278 |
| Résumé – Systèmes intégrables | 279 |
| EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS | 280 |
| E6.1. Transformations ponctuelles | 280 |
| E6.2. Conservation des aires dans une transformation canonique | 281 |
| E6.3. Expression de la période pour un mouvement à une dimension | 281 |
| E6.4. Quid des systèmes non autonomes | 282 |
| E6.5. Calcul du crochet de Poisson $\{q,p\}$ | 282 |

| | |
|---|-----|
| E6.6. Invariance du crochet de Poisson dans une transformation canonique | 282 |
| E6.7. Invariance de la circulation par déformation continue | 283 |
| COMPLEMENTS | 284 |
| C6.1. Générateurs des transformations canoniques | 284 |
| C6.2. Un peu plus sur les crochets de Poisson | 288 |
| C6.3. Cas d'un système complètement séparable | 290 |
| C6.4. Et la mécanique quantique dans tout cela ? | 291 |
| EXERCICES ET PROBLEMES | 293 |
| E6.8. Fonctions génératrices | 293 |
| E6.9. Choix de l'impulsion | 294 |
| E6.10. Comment vérifier si une transformation de contact indépendante du temps est canonique ? | 294 |
| E6.11. Une transformation canonique dépendant du temps | 295 |
| E6.12. Rotation dans trois dimensions et crochet de Poisson | 295 |
| E6.13. Particule à une dimension dans une boîte | 295 |
| E6.14. La chute libre à une dimension | 296 |
| E6.15. Balle rebondissant sur le sol | 296 |
| P6.16. La particule dans un champ magnétique constant | 296 |
| P6.17. Toujours la chute libre à une dimension | 297 |
| P6.18. Balle rebondissant sur un plateau en mouvement | 297 |
| P6.19. Dilatation d'échelle en fonction du temps | 298 |
| P6.20. Actions pour le problème de Kepler | 298 |
| P6.21. Énergie en fonction des actions | 299 |
| P6.22. De l'oscillateur harmonique au problème coulombien | 300 |
| INDICATIONS ET REPONSES | 301 |
| E6.8. Fonctions génératrices | 301 |
| E6.9. Choix de l'impulsion | 301 |
| E6.10. Comment vérifier si une transformation de contact indépendante du temps est canonique ? | 301 |
| E6.11. Une transformation canonique dépendant du temps | 301 |
| E6.12. Rotation dans trois dimensions et crochet de Poisson | 302 |
| E6.13. Particule à une dimension dans une boîte | 302 |
| E6.14. La chute libre à une dimension | 302 |
| E6.15. Balle rebondissant sur le sol | 302 |
| P6.16. La particule dans un champ magnétique constant | 303 |
| P6.17. Toujours la chute libre à une dimension | 303 |
| P6.18. Balle rebondissant sur un plateau en mouvement | 303 |
| P6.19. Dilatation d'échelle en fonction du temps | 304 |
| P6.20. Actions pour le problème de Kepler | 304 |
| P6.21. Énergie en fonction des actions | 304 |
| P6.22. De l'oscillateur harmonique au problème coulombien | 304 |

| | |
|--|-----|
| Chapitre 7 – Systèmes quasi intégrables | 307 |
| COURS | 307 |
| 7.1. Introduction | 307 |
| 7.2. Traitement canonique des perturbations | 308 |
| 7.2.1. Exposé du principe | 308 |
| 7.2.2. Perturbation canonique à un degré de liberté | 311 |
| 7.2.3. Cas à plusieurs degrés de liberté : le problème des petits diviseurs | 318 |
| 7.3. Les invariants adiabatiques | 322 |
| Résumé – Systèmes quasi intégrables | 329 |
| EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS | 329 |
| E7.1. Limites du développement perturbatif | 329 |
| E7.2. Et au-delà du premier ordre ? | 330 |
| E7.3. Développement perturbatif non canonique versus canonique | 331 |
| E7.4. La moyenne des actions perturbées est nulle | 331 |
| COMPLEMENTS | 332 |
| C7.1. Et la mécanique quantique ? | 332 |
| C7.2. Perturbations périodiques rapides | 333 |
| EXERCICES ET PROBLEMES | 335 |
| E7.5. Première correction canonique au pendule | 335 |
| E7.6. Invariant adiabatique dans un ascenseur | 336 |
| E7.7. L'oscillateur harmonique à pulsation variable | 337 |
| E7.8. Particule soumise à une force périodique | 337 |
| E7.9. Particule soumise à une force uniforme périodique | 338 |
| P7.10. Perle sur une tige rigide : la phase de Hannay | 338 |
| P7.11. Invariant adiabatique et détente adiabatique | 340 |
| P7.12. Charge dans un champ magnétique lentement variable | 341 |
| INDICATIONS ET REPONSES | 342 |
| E7.5. Première correction canonique au pendule | 342 |
| E7.6. Invariant adiabatique dans un ascenseur | 343 |
| E7.7. L'oscillateur harmonique à pulsation variable | 344 |
| E7.8. Particule soumise à une force périodique | 344 |
| E7.9. Particule soumise à une force uniforme périodique | 344 |
| P7.10. Perle sur une tige rigide : la phase de Hannay | 345 |
| P7.11. Invariant adiabatique et détente adiabatique | 345 |
| P7.12. La particule dans un champ magnétique lentement variable | 346 |
| Chapitre 8 – De l'ordre au chaos | 347 |
| COURS | 347 |
| 8.1. Introduction | 347 |
| 8.2. Le rotateur percuté | 351 |
| 8.2.1. Description du modèle | 351 |
| 8.2.2. Expérimentation numérique | 354 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.3. | Le théorème KAM | 363 |
| 8.3.1. | Énoncé et définitions..... | 364 |
| 8.3.2. | Le théorème des points fixes | 368 |
| 8.3.3. | Comportement au voisinage d'une trajectoire périodique..... | 371 |
| 8.3.4. | Les séparatrices et la nursery du chaos | 377 |
| | Résumé – Le chaos : où, comment, pourquoi ? | 382 |
| | EXERCICES PROPOSES DANS LE COURS | 382 |
| E8.1. | Application standard et points fixes d'ordre 5 | 382 |
| E8.2. | Condition de dégénérescence..... | 383 |
| E8.3. | Disparition des tores résonnants | 384 |
| E8.4. | Fractions continues ou comment jouer avec les irrationnels..... | 385 |
| E8.5. | Propriétés de l'espace de phase de l'application standard..... | 387 |
| E8.6. | Étude des points fixes d'ordre 2 de l'application standard..... | 387 |
| | COMPLEMENTS | 390 |
| C8.1. | Imprévisibilité et déterminisme | 390 |
| C8.2. | Le théorème KAM et la mécanique céleste..... | 394 |
| C8.3. | Section de Poincaré..... | 397 |
| C8.4. | Chaos et mécanique quantique | 401 |
| | EXERCICES ET PROBLEMES..... | 403 |
| E8.7. | Le théorème de Poincaré-Birkhoff pour l'application standard | 403 |
| E8.8. | Bifurcation de la trajectoire périodique 1:1 de l'application standard | 404 |
| E8.9. | Chaos-ergodicité : une nuance | 404 |
| E8.10. | Les modes d'accélération : une curiosité de l'application standard..... | 406 |
| E8.11. | Comment réaliser un rotateur percuté ?..... | 406 |
| P8.12. | L'application de Anosov (ou chat de Arnold)..... | 407 |
| P8.13. | L'accélérateur de Fermi | 409 |
| P8.14. | Pendule amorti et application non standard | 410 |
| P8.15. | Stabilité des orbites périodiques dans les billards..... | 411 |
| P8.16. | Les points de Lagrange : grecs et troyens de Jupiter | 414 |
| | INDICATIONS ET REPONSES..... | 417 |
| E8.7. | Théorème de Poincaré-Birkhoff..... | 417 |
| E8.8. | Bifurcation de la trajectoire périodique 1:1..... | 417 |
| E8.9. | Chaos et ergodicité : une nuance | 418 |
| E8.10. | Les modes d'accélération..... | 418 |
| E8.11. | Comment réaliser un rotateur percuté ?..... | 418 |
| P8.12. | L'application de Anosov | 419 |
| P8.13. | L'accélérateur de Fermi | 420 |
| P8.14. | Pendule amorti..... | 420 |
| P8.15. | Stabilité des orbites périodiques dans les billards..... | 421 |
| P8.16. | Les points de Lagrange | 422 |

| | |
|---|-----|
| TABLE DES MATIERES | 467 |
| Annexe 1 – Rappels d'électromagnétisme..... | 423 |
| Annexe 2 – Indications sur la résolution des équations différentielles..... | 427 |
| Annexe 3 – Coordonnées elliptiques et paraboliques..... | 431 |
| Annexe 4 – Brève histoire de la mécanique..... | 435 |
| Bibliographie..... | 445 |
| Index..... | 449 |
| Table des matières..... | 457 |