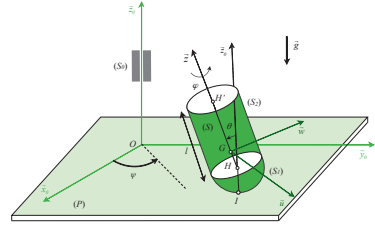




Rachid Mesrar, Brahim Amghar

.....

La collection « Enseignement Sup Physique » se présente comme une introduction sur des sujets incontournables en physique. Adaptée aux besoins des étudiants et des chercheurs, le traitement rigoureux, mais accessible, de chaque sujet est idéal pour ceux qui veulent une amorce dans un sujet donné pour les préparer à une étude ou à une recherche plus avancée.



Cet ouvrage s'organise en deux parties distinctes. La première, dédiée aux notes de cours, présente un principe incontournable de la mécanique analytique : le principe des puissances virtuelles. Ce principe, et les équations de Lagrange qui en découlent, forment les bases essentielles de la mécanique lagrangienne. Pour rendre ces concepts accessibles, le texte s'enrichit d'applications concrètes, d'exemples variés et de conseils méthodologiques, offrant ainsi une approche à la fois rigoureuse et pédagogique.

La seconde partie rassemble une sélection de problèmes résolus, dont une grande partie est originale. Structurés en trois recueils de cinq problèmes chacun, ces exercices permettent une progression adaptée : des sujets simples pour débiter, des cas plus ardu pour approfondir, et enfin des problèmes type examen pour consolider la maîtrise des équations de Lagrange. Un outil idéal pour apprendre et s'exercer en mécanique analytique.

Rachid Mesrar est professeur de l'enseignement supérieur (spécialité mécanique) à la faculté des sciences d'Agadir. Il est titulaire de deux doctorats : un doctorat de l'Université de Metz en sciences de l'ingénieur et un doctorat d'État ès science physique de l'Université Ibn Zohr d'Agadir. Il est aussi l'auteur de plusieurs ouvrages consacrés à la mécanique.

Brahim Amghar est maître de conférences (spécialité physique théorique) à la faculté des sciences d'El Jadida, Université Chouaib Doukkali. Il est titulaire d'un master en information et cryptographie quantique et d'un doctorat en physique mathématique de l'Université Mohammed V de Rabat. Par ailleurs, ses travaux de recherche portent sur les aspects géométriques et dynamiques des corrélations quantiques.

ISBN : 978-2-7598-3865-3



9

782759 838653

Rachid Mesrar
Brahim Amghar

Mécanique analytique de Lagrange

Cours et recueils d'examens corrigés

edp sciences

Dans la même collection

Hydrodynamique – Problèmes corrigés, Stéphane Leblanc, 978-2-7598-0525-9 (2010)

Comprendre la mécanique, Jean-Pierre Romagnan, 978-2-7598-0661-4 (2012)

Physique expérimentale – Optique, magnétisme, électrotechnique, mécanique, thermodynamique et physique non linéaire, Jolidon, 978-2-7598-2364-2 (2021)

Mécanique classique - Cours et exercices corrigés – T1 : Lois de Newton, énergie, statique, gravitation, Alain Colin de Verdière, Souren Pogossian, 978-2-7598-2665-0 (2022)

Mécanique classique - Cours et exercices corrigés – T2 : Repères non inertiels, fluides, thermodynamique, capillarité, introduction à la théorie du chaos, Alain Colin de Verdière, Souren Pogossian, 978-2-7598-2671-1 (2022)

Mécanique du solide indéformable – T1 : Les torseurs, Rachid Mesrar, Brahim Amghar, 978-2-7598-3637-6 (2025)

Mécanique du solide indéformable – T2 : La cinématique du solide, Rachid Mesrar, Brahim Amghar, 978-2-7598-3642-0 (2025)

Mécanique du solide indéformable – T3 : La géométrie des masses, Rachid Mesrar, Brahim Amghar, 978-2-7598-3645-1 (2025)

Mécanique du solide indéformable – T4 : La cinétique du solide, Rachid Mesrar, Brahim Amghar, 978-2-7598-3648-2 (2025)

Mécanique du solide indéformable – T5 : La dynamique du solide, Rachid Mesrar, Brahim Amghar, 978-2-7598-3651-2 (2025)

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur
<https://laboutique.edpsciences.fr>

Illustration de couverture : Culbuto, jouet dont la base est lestée de sorte que s'il est renversé il se redresse toujours et revient à la verticale en oscillant.

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3865-3 - ISBN (ebook) : 978-2-7598-3866-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2026

17 avenue du Hoggar – BP 112 – PA de Courtabœuf – 91944 Les Ulis Cedex A

« On a déjà plusieurs traités de mécanique, mais le plan de celui-ci est entièrement neuf. Je me suis proposé de réduire cette science, et l'art de résoudre les problèmes qui s'y rapportent, à des formules générales, dont le simple développement donne toutes les équations nécessaires pour la solution de chaque problème. J'espère que la manière dont j'ai tâché de remplir cet objet, ne laissera rien à désirer. »

Joseph Louis de Lagrange (1736-1813), Mécanique analytique, Paris, 1788.



Avant-propos

La mécanique analytique, initiée dès le xviii^e siècle par les pionniers Lagrange et Hamilton, est strictement équivalente à la mécanique classique de Newton. Cependant elle présente deux particularités : la première est d'être conçue à partir de grandeurs scalaires (les énergies) et la deuxième est que les équations du mouvement sont invariantes dans un changement de coordonnées. Elle est considérée comme une formulation duale de la mécanique classique et joue un rôle central en mécanique quantique et en théorie des champs. Bref il s'agit d'un formalisme bien adapté au calcul analytique et fondé sur deux principes cardinaux : le principe de moindre action et le principe des puissances virtuelles. Le premier on le doit aux pères fondateurs précités, alors que la paternité du second revient à d'Alembert. Il convient de préciser que les calculs d'usage en mécanique analytique sont algébriques, donc programmables. Ce qui explique son grand succès dans l'étude des systèmes complexes comportant un grand nombre de paramètres. C'est le cas, par exemple, des systèmes non linéaires et des régimes chaotiques hamiltoniens.

L'objectif principal du présent ouvrage est de fournir au lecteur les notions de base et les rudiments de la mécanique analytique. Tout d'abord il faut préciser que l'idée principale de la mécanique lagrangienne est d'éliminer les forces inconnues de liaison et de ne décrire le système que par des coordonnées indépendantes. Ces coordonnées portent le nom de « coordonnées généralisées ». Elles sont arbitraires et peuvent représenter indifféremment une longueur, un angle, etc. Néanmoins, ces coordonnées sont suffisantes pour décrire de manière univoque et intrinsèque l'évolution d'un système si l'on tient compte des contraintes.

En mécanique analytique, on s'intéresse souvent aux symétries des problèmes et aux quantités conservées qui leur sont associées. Les lois de conservation de l'énergie, de l'impulsion et du moment cinétique sont déduites de l'homogénéité du temps, de l'homogénéité et de l'isotropie de l'espace. Cette corrélation invariance/lois de conservation a été mise en évidence par une mathématicienne allemande du nom

d'Emmy Noether. Elle est la première à avoir mis en lumière la dialectique existante entre les symétries éventuelles et les lois de conservation d'une grandeur physique. Le fameux « théorème de Noether » que nous a légué cette jeune prodige est l'un des théorèmes les plus puissants de la physique moderne. Il joue un rôle central en théorie des champs quantiques et fut qualifié par Einstein de « monument de la pensée mathématique ».

Un second objectif de l'ouvrage est de mettre en exergue les subtilités de la mécanique analytique et d'aider le lecteur à maîtriser la technique d'obtention systématique des équations de Lagrange, afin d'exploiter pleinement le potentiel qu'offre cette belle théorie.

L'ouvrage se compose de deux parties : la première partie, consacrée aux notes de cours, aborde un principe incontournable en mécanique analytique : le principe des puissances virtuelles. Ce dernier et les équations de Lagrange qui en découlent, constituent le socle de la mécanique lagrangienne. Ces notes sont truffées d'applications pédagogiques, d'exemples génériques et de conseils méthodologiques, et ce, afin de les simplifier et de les rendre plus didactiques. Le chapitre 1 aborde la notion clé de paramétrage car en mécanique analytique, pour un même problème, on peut avoir plusieurs paramétrages et les équations du mouvement qui en découlent seront différentes selon le paramétrage choisi. Le chapitre 2 introduit une notion, qui n'existe pas en mécanique de Newton, et qui est plutôt « abstraite », c'est la notion de « vitesse virtuelle ». Cette notion constitue la pierre angulaire du principe des puissances virtuelles qui fait l'objet du chapitre 3. Alors que le principe fondamental de la dynamique fait appel à des grandeurs vectorielles (forces et accélération), le principe des puissances virtuelles s'énonce en termes de puissances qui sont des grandeurs scalaires. Le chapitre 4 est un corolaire du chapitre 3. Nous y exposons la méthodologie à suivre pour obtenir les équations de Lagrange à partir du principe des puissances virtuelles. À cette fin, on fait appel à la notion de « champ de vitesses virtuelles ». Le chapitre 5 met la lumière sur les intégrales premières du mouvement. On distingue deux types d'intégrales premières : les intégrales premières linéaires (intégrale première cinétique et intégrale première de Jacobi) et les intégrales premières quadratiques (intégrale première de l'énergie cinétique et intégrale première de Painlevé). Enfin pour boucler la boucle, le chapitre 6 traite des problèmes d'équilibre et de stabilité. Deux approches sont envisagées : l'approche directe symbolisée par le théorème de Lejeune-Dirichlet et l'approche indirecte incarnée par le théorème de Liapunov.

La deuxième partie de cet ouvrage est une anthologie de sujets d'examens corrigés. Ces sujets, dont une bonne partie est originale, sont répartis et structurés en trois recueils de cinq épreuves chacun : le premier recueil regroupe des sujets relativement simples. Le deuxième recueil regroupe des sujets plus ardu, nécessitant plus de réflexion. Quant au troisième, c'est un florilège de sujets types permettant à l'étudiant d'aller plus loin dans l'exploration de cette science et de maîtriser la technique de résolution par la méthode de Lagrange.

Cet ouvrage est destiné aux lecteurs connaissant déjà la mécanique des solides rigides. De nombreux livres, dont certains sont excellents, sont basés sur cette approche (voir références bibliographiques). En revanche, la littérature francophone sur les formulations de Lagrange et de Hamilton laisse à désirer ! Nous espérons que le présent ouvrage contribuera, tant soit peu, à combler cette lacune.

Le livre s'adresse aux étudiants de licence, de master ou des écoles d'ingénieurs qui s'intéressent à une étude approfondie de la mécanique analytique, ainsi qu'aux ingénieurs et à toute personne désireuse d'acquérir des bases solides dans cette discipline. Espérons que cet ouvrage apporte une aide précieuse et un outil indispensable de travail aux étudiants et aux candidats qui désirent entreprendre une préparation sérieuse aux concours de CAPES et d'agrégation de mécanique. Nous souhaitons à tout le monde, élèves, étudiants, professeurs et candidats aux concours, de tirer le meilleur profit de ce livre.

Les auteurs

Table des matières

Avant-propos	3
Partie A : notes de cours	11
1 Paramétrage et liaisons	13
1.1 Paramétrage d'un système matériel	15
1.1.1 Cas d'un point matériel	15
1.1.2 Cas d'un solide rigide	16
1.1.3 Cas d'un système matériel (Σ)	17
1.1.4 Définitions	17
1.2 Liaisons	18
1.2.1 Paramétrage strict-Paramétrage surabondant	19
1.2.2 Liaisons holonome, non holonome et semi-holonome	21
1.2.3 Liaison bilatérale-Liaison unilatérale	24
1.2.4 Liaison indépendante du temps-Liaison dépendante du temps	25
1.2.5 Liaison principale-Liaison complémentaire	25
1.2.6 Nombre de degrés de liberté	26
Planche de synthèse	34
Diagramme synoptique	36
2 Vitesses réelles et vitesses virtuelles	37
2.1 Champ de vitesses réelles	38
2.2 Champ de vitesses virtuelles	39
2.2.1 Définition	39
2.2.2 Expression du CVV	40
2.3 Champ de vitesses virtuelles compatible avec une liaison	44
2.3.1 Système matériel (Σ) soumis à une liaison holonome	45
2.3.2 Système matériel (Σ) soumis à une liaison non holonome	50

Planche de synthèse	59
Diagramme synoptique	61
3 Principes des puissances virtuelles	63
3.1 Puissance réelle	65
3.1.1 Schématisation des efforts	65
3.1.2 Puissance réelle	66
3.2 Puissance virtuelle	69
3.2.1 Définition	69
3.2.2 Propriété	69
3.2.3 Liaisons parfaites	70
3.3 Calcul pratique de la puissance virtuelle d'un système	70
3.3.1 Puissance virtuelle d'un point matériel	71
3.3.2 Puissance virtuelle d'un solide indéformable	71
3.3.3 Puissance virtuelle d'un système matériel	72
3.4 Fonction de force	73
3.4.1 Définition	73
3.4.2 Additivité	73
3.4.3 Fonction de force associée à la pesanteur	73
3.4.4 Fonction de force associée à un ressort élastique	74
3.5 Systèmes conservatifs	75
3.6 Principe des puissances virtuelles	78
3.6.1 Énoncé	78
3.6.2 Axiome d'objectivité	79
3.6.3 Intérêt de la méthode des puissances virtuelles	79
Planche de synthèse	89
Diagramme synoptique	91
4 Équations de Lagrange	93
4.1 Mouvements virtuels pour l'étude des systèmes de solides	95
4.1.1 Mouvement virtuel rigidifiant par morceaux	95
4.1.2 Mouvement virtuel compatible avec les liaisons	98
4.1.3 Liaisons parfaites	98
4.2 Équations de Lagrange	99
4.2.1 Puissance virtuelle des quantités d'accélération	100
4.2.2 Puissance virtuelle des efforts extérieurs et intérieurs	102

4.2.3	Équations de Lagrange	104
	Planche de synthèse	126
	Diagramme synoptique	128
5	Intégrales premières du mouvement	129
5.1	Intégrales premières linéaires	131
5.1.1	Intégrale première cinétique	131
5.1.2	Intégrale première de Jacobi	134
5.2	Énergie cinétique paramétrée	134
5.3	Théorème d'Euler relatif aux fonctions homogènes	138
5.3.1	Fonction homogène	138
5.3.2	Théorème d'Euler	138
5.4	Lemme de Painlevé	141
5.5	Intégrales premières quadratiques	142
5.5.1	Intégrales premières de Painlevé	142
5.5.2	Cas particuliers	143
5.5.3	Intégrale première de l'énergie cinétique	152
	Planche de synthèse	162
	Diagramme synoptique	163
6	Équilibre et stabilité	165
6.1	Équilibre	167
6.1.1	Hypothèses	167
6.1.2	Équilibre pour un seul paramètre	167
6.1.3	Équilibre paramétrique	167
6.1.4	Équilibre strict	168
6.2	Détermination des équilibres paramétriques	168
6.2.1	Cas général : utilisation explicite des équations de mouvement du système	168
6.2.2	Cas particulier : écriture directe des équations d'équilibre . .	170
6.3	Stabilité d'un équilibre paramétrique	177
6.3.1	Stabilité au sens de Liapunov	177
6.3.2	Théorème de Lejeune-Dirichlet	178
6.3.3	Étude pratique de l'équilibre et de la stabilité lorsqu'il y a une fonction de force	179

6.4	Linéarisation des équations de Lagrange autour d'une position d'équilibre	187
6.4.1	Hypothèses	187
6.4.2	Linéarisation	187
6.4.3	Stabilité de l'équilibre autour de q_e : théorème de Liapunov	188
	Planche de synthèse	197
	Diagramme synoptique	199
Partie B	recueils d'examens corrigés	201
	Recueil d'examens 1 : pour commencer	202
	Épreuve 1 : système composé d'une tige soudée à une demi-sphère	203
	Épreuve 2 : stabilité d'un cerceau autour d'une nutation uniforme	208
	Épreuve 3 : étude d'un système pendulaire complexe	215
	Épreuve 4 : mouvement d'une sphère pleine sur un plan fixe	225
	Épreuve 5 : disque roulant sans glissement sur un plan incliné	233
	Recueil d'examens 2 : pour s'exercer	242
	Épreuve 1 : système composé d'un disque, d'une tige et d'un anneau	243
	Épreuve 2 : système composé d'un disque et d'une tige	248
	Épreuve 3 : disque roulant sur une barre en rotation	257
	Épreuve 4 : mouvement d'une sphère sur une tige en rotation	266
	Épreuve 5 : mouvement d'un ellipsoïde sur un plan lisse	274
	Recueil d'examens 3 : pour approfondir	283
	Épreuve 1 : glissement sans frottement d'une plaque triangulaire	284
	Épreuve 2 : mouvement d'un culbuto	295
	Épreuve 3 : étude d'une barre assujettie à deux rotations planes	310
	Épreuve 4 : étude d'un essieu muni de deux roues identiques	323
	Épreuve 5 : mouvement d'un culbuto sur un plan tournant	335
	Bibliographie	353
	Index alphabétique	361

Partie A
Notes de cours

Paramétrage et liaisons

Objectifs pédagogiques

- Définir le paramétrage d'un système matériel
- Définir l'espace de configuration
- Définir les liaisons et leur nature
- Définir le nombre de degrés de liberté d'un système matériel
- Définir les paramètres primitifs
- Définir les coordonnées généralisées d'un système matériel

Notions abordées

- Paramétrage d'un système matériel
- Paramétrage strict
- Paramétrage surabondant
- Liaisons holonomes-Liaisons non holonomes
- Liaisons bilatérales-Liaisons unilatérales

- Liaisons principales-Liaisons complémentaires
- Paramètres primitifs
- Nombre de degrés de liberté
- Coordonnées généralisées
- Équation de configuration
- Espace de configuration

Pour débiter l'étude du mouvement des systèmes solides, il est important de savoir caractériser leurs positions dans un repère par un paramétrage. Celui-ci est lié à la modélisation géométrique du système. La mécanique lagrangienne se distingue par le fait que le paramétrage y joue un rôle important. En effet, pour un même problème, on peut choisir différents paramétrages et les équations de mouvement qui en découlent seront différentes selon le paramétrage choisi. Par ailleurs, les solides sont liés par des liaisons qui limitent leur mouvement, ce qui impacte le choix du paramétrage. Il est donc nécessaire de donner une description de ces liaisons.

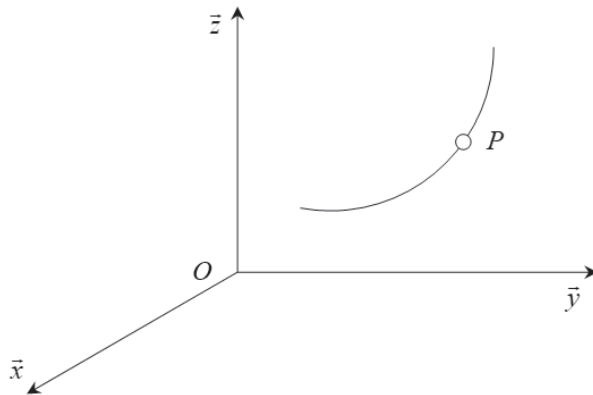
1.1 Paramétrage d'un système matériel

On considère un système matériel (Σ) en mouvement par rapport à un repère $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. On suppose que ce système est composé de p points matériels (P_i) et de s solides rigides (S_i) ; $(\Sigma) = (P_i) \cup (S_i)$.

Faire le paramétrage d'un tel système, c'est définir les paramètres qui déterminent sa position à chaque instant t .

1.1.1 Cas d'un point matériel

Considérons un point matériel (P) en mouvement par rapport à un repère $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.



Dans ce cas on a :

$$\overrightarrow{OP} = x\vec{x} + y\vec{y} + z\vec{z}; \quad \forall t$$

Il nous faut 3 paramètres (x, y, z) pour définir la position du point matériel (P) . On dit que le système défini par le point matériel (P) est à 3 degrés de liberté.

Exemples

- coordonnées cartésiennes : $\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OP}(x, y, z) \Rightarrow q = (x, y, z)$
- coordonnées cylindriques : $\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OP}(\rho, \varphi, z) \Rightarrow q = (\rho, \varphi, z)$
- coordonnées sphériques : $\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OP}(r, \theta, \varphi) \Rightarrow q = (r, \theta, \varphi)$

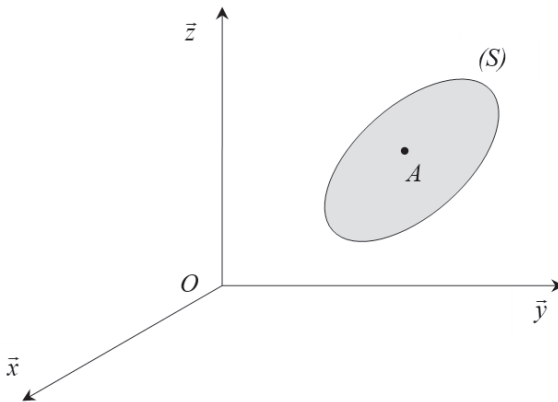
1.1.2 Cas d'un solide rigide

Soit (S) un solide rigide en mouvement par rapport à un repère $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

Dans ce cas, il nous faut 6 paramètres pour définir la position du solide à chaque instant :

- Les 3 coordonnées d'un point du solide.
- Les 3 angles d'Euler (ψ, θ, φ) définissant la rotation du solide.

On dit que le système défini par un solide rigide est à 6 degrés de liberté.



351
 équation du mouvement, 76, 77, 149
 équations de Lagrange avec multiplicateurs, 113, 114, 214, 241, 348
 équations de Lagrange simples, 93, 109, 127, 340
 équations paramétriques de la trajectoire, 335
 équilibre d'un système matériel, 197
 équilibre paramétrique, 177, 178
 équilibre strict, 168
 espace de configuration, 18
 essieu muni de deux roues identiques, 283
 exemple générique, 19, 49

F

figures de calcul, 204, 209, 227, 259
 fonction de force, 103, 145, 170, 179
 fonction homogène, 136, 140
 force de rappel, 87, 244, 247
 forces de pesanteur, 244, 247
 forces généralisées, 67, 102, 312, 346
 formule cinématique de Lagrange, 100

I

identité d'Euler, 140, 141, 153
 interprétation mathématique, 181
 interprétation physique, 260, 276, 310
 intégrale première de Jacobi, 134
 intégrale première de l'énergie cinétique, 210, 224, 273, 306, 336
 intégrale première de Painlevé, 118, 125, 142–144, 338
 intégrale première du mouvement, 133, 227, 340
 intégrale première quadratique, 312, 318
 intégrales premières linéaires, 131

L

lagrangien du système, 107, 174, 244, 297
 lemme de Painlevé, 141, 144
 liaison, 18, 19
 liaison bilatérale, 25, 157, 225
 liaison complémentaire, 35, 178, 210, 235, 337
 liaison extérieure, 20
 liaison géométrique, 20, 27, 170
 liaison holonome, 21, 26, 46, 278
 liaison intérieure, 21, 122
 liaison non holonome, 50, 114, 230, 247
 liaison pivot, 258, 266, 338
 liaison primitive, 210, 337
 liaison principale, 26, 33
 liaison prismatique parfaite, 189
 liaison rhéonome, 265
 liaison rotoïde, 82
 liaison semi-holonome, 23
 liaison unilatérale, 25
 linéarisation des équations de Lagrange, 166

M

matrice d'inertie, 118, 205, 299, 325
 matrice hessienne, 181, 198
 matrice à valeurs propres négatives, 181
 moment dynamique, 301, 351
 moments principaux centraux d'inertie, 249, 295
 mouvement d'un culbuto, 283
 mouvement d'un disque avec un trou circulaire, 115
 mouvement d'un ellipsoïde sur un plan lisse, 242
 mouvement d'une bille dans un cerceau, 157
 mouvement d'une sphère sur une tige, 242

mouvement virtuel, 98, 272

P

paramètres de configuration, 203, 285, 350

paramètres principaux, 26, 52, 104

paramétrage d'un système matériel, 13,
15

paramétrage indépendant du temps, 140

paramétrage strict, 19, 20

paramétrage surabondant, 20

pendule double, 181

pendule pesant, 76

plan incliné, 233, 235

plan vertical, 179, 258

plaque triangulaire, 283, 284

point géométrique de contact, 233, 258

point matériel, 132, 150, 157

positions d'équilibre, 170, 174, 197

principe des puissances virtuelles, 38, 79,
104, 285

puissance réelle, 66, 83, 339

puissance virtuelle, 206, 210, 220, 235, 244

puissance virtuelle des quantités d'accélé-
ration, 126

R

repère galiléen, 26, 107, 146, 167, 203, 243

repère orthonormé direct, 136, 154, 172,
203

rotation propre uniforme, 67, 215

rotation uniforme, 132, 260

rotation virtuelle, 80

roulement sans glissement d'un cerceau

sur un plan, 114

réaction normale, 281

révolution homogène, 274

S

schématisation des efforts, 65

solide indéformable, 203

solide rectiligne, 17

solide rigide, 16

sphère pleine homogène, 225

stabilité d'un équilibre paramétrique, 177

système matériel, 17, 34, 72, 188

système pendulaire complexe, 216

T

théorème d'Euler, 129, 138, 140

théorème de Lejeune-Dirichlet, 178, 197

théorèmes généraux, 95, 131, 297

tige solidaire, 132

tige soudée à une demi-sphère, 203

transformation incompatible, 123

transformation virtuelle, 83, 85

translation uniforme, 21, 276

V

vecteur accélération, 100

vecteur unitaire, 216, 250

vecteur vitesse de pivotement, 32

vecteur vitesse de roulement, 31

vitesse angulaire, 67, 338, 350

vitesse de glissement, 210, 219, 235, 259

vitesse réelle, 48–50

vitesse virtuelles, 205, 313