

EXERCICES POUR LE COURS DE PHYSIQUE DE

FEYNMAN

Richard Feynman | Robert Leighton | Matthew Sands et al.
édités par Michael A. Gottlieb et Rudolf Pfeiffer



900 EXERCICES CORRIGÉS

Traduit par Jean-Louis Basdevant

DUNOD

First published in the United States by Basic Books a member of the Perseus Books Group.

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée aux États-Unis
par Basic Books, un membre du groupe Perseus Books, sous le titre :
Exercices For the Feynman
Lectures on Physics

© 2014 by California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb,
and Rudolf Pfeiffer.

Version française de Jean-Louis Basdevant.

Maquette de couverture : Raphaël Tardif

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, 2015 pour la version française,
2020 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081097-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), 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 ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Préface

VI

Exercices pour le volume I (*Mécanique 1 et Mécanique 2*)

Introduction	3
1. Atomes en mouvement	4
2. Conservation de l'énergie, statique	6
3. Loi de Kepler et gravitation	18
4. Cinématique	21
5. Lois de Newton	26
6. Conservation de l'impulsion	32
7. Vecteurs	36
8. Collisions à deux corps non-relativistes en trois dimensions	40
9. Forces	47
10. Potentiels et champs	53
11. Unités et dimensions	58
12. Cinématique et dynamique relativistes, équivalence de la masse et de l'énergie au repos	61
13. Énergie et impulsion relativistes	62
14. Rotations à deux dimensions, le centre de masse	65
15. Moment cinétique, le moment d'inertie	70
16. Rotations à trois dimensions	77
17. L'oscillateur harmonique, équations différentielles linéaires	88
18. Algèbre	97
19. Oscillations forcées avec amortissement	100
20. Optique géométrique	111
21. Rayonnement électromagnétique : interférences	116
22. Rayonnement électromagnétique : diffraction	120
23. Rayonnement électromagnétique : réfraction, dispersion, absorption	124
24. Rayonnement électromagnétique : amortissement par rayonnement, diffusion	125
25. Rayonnement électromagnétique : polarisation	126
26. Rayonnement électromagnétique : effets relativistes	128
27. Comportement quantique : ondes, particules et photons	131
28. Théorie cinétique des gaz	136
29. Principes de la mécanique statistique	139
30. Applications de la théorie cinétique : équipartition	142
31. Applications de la théorie cinétique : phénomènes de transport	144
32. Thermodynamique	147
33. Illustrations de la thermodynamique	152
34. L'équation d'onde, le son	155
35. Système d'ondes linéaires : battements, modes	157
36. Analyse de Fourier des ondes	162

Exercices pour le volume II

(Électromagnétisme 1 et Électromagnétisme 2)

Introduction	167
37. Électromagnétisme	168
38. Calcul différentiel de champs de vecteurs	169
39. Calcul intégral vectoriel	172
40. Électrostatique	173
41. Applications de la loi de Gauss	175
42. Le champ électrique dans diverses circonstances	178
43. Le champ électrique dans diverses circonstances (suite)	182
44. Énergie électrostatique	182
45. Diélectriques	184
46. À l'intérieur des diélectriques	186
47. Analogues électrostatiques	187
48. Magnétostatique	189
49. Le champ magnétique dans diverses situations	191
50. Le potentiel vecteur	193
51. Les lois de l'induction	194
52. Solution des équations de Maxwell dans le vide	199
53. Solution des équations de Maxwell avec des courants et des charges	200
54. Circuits en courant alternatif	203
55. Cavités résonantes	210
56. Guides d'ondes	211
57. L'électrodynamique en notations relativistes	214
58. Transformations de Lorentz des champs	215
59. Énergie et impulsion du champ	217
60. Masse électromagnétique	220
61. Le mouvement des charges dans des champs électriques et magnétiques	221
62. Indice de réfraction des milieux denses	222
63. La réflexion sur des surfaces	223
64. Le magnétisme de la matière	224
65. Paramagnétisme et résonance magnétique	224
66. Ferromagnétisme	225
67. Élasticité	226
68. L'écoulement de l'eau sèche	228
69. L'écoulement de l'eau mouillée	229

Exercices pour le volume III

(Mécanique quantique)

Introduction	233
70. Amplitudes de probabilité	234
71. Particules identiques	238
72. Le spin un	242
73. Le spin 1/2	244
74. La dépendance en temps des amplitudes	248
75. L'Hamiltonien matriciel	249

76. Le maser à ammoniac	251
77. Autres systèmes à deux états	251
78. Davantage de systèmes à deux états	252
79. Le clivage hyperfin de l'atome d'hydrogène	254
80. Propagation dans un réseau cristallin	254
81. Les semi-conducteurs	256
82. L'approximation des particules indépendantes	258
83. La dépendance des amplitudes dans la position	260
84. Le moment cinétique	262
85. L'atome d'hydrogène et la classification périodique	264

Annexes

Annexe A. Unités et dimensions	269
Annexe B. Constantes physiques et valeurs approchées	271
1. Constantes astrophysiques et géophysiques	271
2. Constantes atomiques et nucléaires	272
3. Constantes macroscopiques	273
4. Constantes numériques	273
Annexe C. Réponses	275

PRÉFACE

Cet ensemble complet d'exercices pour le *Cours de Physique de Feynman* a été construit à partir de trois sources : les *Exercises in Introductory Physics* de Leighton et Vogt's (Addison-Wesley, 1969), et les Volumes II et III des *Exercises for The Feynman Lectures on Physics* de Caltech (Addison-Wesley 1964–65). Les exercices d'origine ont subi un lifting : ils sont réécrits en L^AT_EX avec de belles figures propres, clarifiés, corrigés et actualisés avec des unités modernes. Les exercices des volumes II et III ont été complétés par plusieurs nouveaux problèmes, et des solutions, qui manquaient complètement dans les éditions précédentes, sont maintenant données. C'est la première fois que des exercices pour les trois volumes du *Cours de Physique de Feynman* sont publiés en un seul volume, et la première fois que de tels exercices paraissent avec un ensemble (presque) complet de réponses.

Tous ces exercices ont été donnés à un moment ou à un autre aux étudiants comme exercices à la maison ou comme problèmes d'examen dans le cours obligatoire d'introduction à la physique de deux ans de Caltech, que ce soit lorsque Richard Feynman l'enseignait (1961–64), ou pendant les deux décennies qui ont suivi lorsque le *Cours de Physique de Feynman* était le manuel de physique. Plusieurs personnes ont contribué à l'élaboration de ces exercices, elles sont remerciées dans les *Introductions* aux exercices de chaque volume. En outre, nous souhaitons remercier :

Le département de Physique, Maths et Astronomie du California Institute of Technology, pour nous avoir autorisés à faire ce livre et à l'inclure dans *The Feynman Lecture on Physics New Millennium Edition* ;

Rochus Vogt, pour avoir communiqué ses notes de cours accumulées pendant de nombreuses années d'enseignement des bases de la physique à Caltech ;

Eugene Cowan, pour nous avoir communiqué ses solutions aux exercices des volumes II & III ;

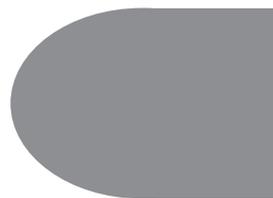
Aaron Zimmerman, pour avoir vérifié les nouveautés dans les cours et exercices de Caltech ;

Adam Cochran, pour avoir habilement négocié l'accord de publication avec Basic Books.

Michael A. Gottlieb & Rudolf Pfeiffer
Éditeurs, *The Feynman Lecture on Physics New Millennium Edition*
Décembre 2013

Exercices pour le volume I
(Mécanique 1
et Mécanique 2)

INTRODUCTION



Ces exercices ont été rassemblés par les auteurs pour être utilisés avec le Volume I* du *Cours de Physique de Feynman* dans le cours d'introduction à la physique de première année au California Institute of Technology, et ils sont donc classés dans le même ordre que les sujets enseignés dans le *Cours de Feynman*. À l'intérieur de chaque sujet ou de chaque chapitre, les exercices sont subdivisés en catégories suivant leur généralité et leur difficulté. Dans l'ordre où ces exercices apparaissent dans un chapitre donné, il y a : des démonstrations ou des généralisations, des exercices faciles, des exercices intermédiaires, et puis des exercices plus sophistiqués ou plus compliqués. La plupart du temps, les démonstrations et généralisations complètent les discussions faites dans le *Cours de Feynman*, et les résultats sont considérés comme devant être assimilés par les étudiants. Un étudiant moyen ne devrait pas avoir de difficulté à résoudre les exercices simples, et il devrait être capable de résoudre la plupart des exercices intermédiaires en un temps raisonnable – de dix à vingt minutes chacun. Les exercices plus sophistiqués demandent en général une réflexion physique plus approfondie, et seront utiles principalement aux meilleurs étudiants.

Les exercices individuels ont été conçus et évalués de façon critique par plusieurs personnes. Un bon nombre sont dus à R. B. Leighton et sont en rapport direct avec la série originale des cours de Feynman ; quelques-uns sont reproduits, avec autorisation, à partir d'un plus gros ensemble compilé par Foster Strong ; plusieurs ont été adaptés par R. E. Vogt à partir d'exercices d'examens présents dans le cours d'introduction. Les auteurs expriment ici leurs remerciements sincères à tous ceux qui ont contribué, qu'ils soient nommés ou anonymes.

Les auteurs considèrent que ce recueil est loin d'être complet. Nous espérons qu'avec le temps, eux-mêmes et d'autres à Caltech, affineront ce texte et le compléteront d'exercices nouveaux de façon qu'un ouvrage de travail personnel puisse peut-être en résulter, dont l'utilité pourrait dépasser la portée limitée actuelle.

Robert B. Leighton & Rochus E. Vogt

* Volume I de l'édition américaine : *Mécanique 1 et 2* pour l'édition française. Volume II : *Électromagnétisme 1 et 2* pour l'édition française. Volume III : *Mécanique quantique* pour l'édition française.

1. ATOMES EN MOUVEMENT

On se référera au *Cours de Physique de Feynman*, Mécanique 1, Chap. 1 à 3.

Utilisez les idées données dans ces chapitres ainsi que votre propre expérience et votre imagination, afin de résoudre les exercices suivants. La plupart du temps, on ne demandera *pas* de résultats numériques de haute précision.

Exercice 1.1 Si la chaleur provient seulement du mouvement moléculaire, quelle différence y a-t-il entre une balle de baseball chaude au repos et une autre froide mais en mouvement rapide ?

Exercice 1.2 Si les atomes de toute matière sont en mouvement perpétuel, comment peut-il exister des objets de forme permanente, comme les empreintes fossiles ?

Exercice 1.3 Expliquez quantitativement pourquoi et comment les frottements dans une machine en mouvement produisent de la chaleur. Expliquez également, si vous le pouvez, pourquoi la chaleur ne peut provoquer du mouvement utilisable par le processus inverse.

Exercice 1.4 Les chimistes ont découvert que les molécules de caoutchouc sont formées de longues chaînes entrecroisées d'atomes. Expliquez pourquoi une bande de caoutchouc s'échauffe lorsqu'on l'allonge.

Exercice 1.5 Que devrait-il arriver à un élastique qui soutient un certain poids lorsqu'on le chauffe ? (Pour trouver la réponse, faites l'expérience.)

Exercice 1.6 Pouvez-vous expliquer pourquoi on ne trouve pas de cristaux ayant la forme d'un pentagone régulier ? (Des formes triangulaires, carrées, hexagonales se trouvent fréquemment parmi les cristaux.)

Exercice 1.7 On vous donne un grand nombre de billes d'acier de même diamètre d et un récipient de volume donné V . Chacune des dimensions du récipient est beaucoup plus grande que le diamètre d'une bille. Quel est le nombre maximum de billes, N , que vous pouvez mettre dans le récipient ?

Exercice 1.8 Comment la pression P d'un gaz doit-elle varier avec n , le nombre d'atomes par unité de volume, et avec $\langle v \rangle$, la vitesse moyenne d'un atome ? La pression P doit-elle être proportionnelle à n et/ou à $\langle v \rangle$, ou bien doit-elle varier plus ou moins rapidement que de façon linéaire ?

Exercice 1.9 L'air habituel a une densité d'environ $0,001 \text{ g cm}^{-3}$, alors que l'air liquide a une densité d'environ $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.

- Estimer le nombre n_G de molécules d'air par cm^3 dans de l'air habituel et dans de l'air liquide, n_L .
- Estimer la masse m d'une molécule d'air.

- (c) Estimer la distance moyenne l qu'une molécule d'air doit parcourir entre deux collisions à une température et une pression standard CNTP (conditions standard : 20°C à 1 atm). Cette distance s'appelle le *libre parcours moyen*.
- (d) Estimer quelle pression P , dans une atmosphère normale, un système doit-il avoir pour que le libre parcours moyen soit d'environ un mètre.

Exercice 1.10 L'intensité d'un faisceau parallèle d'atomes de potassium est réduite de 3 % par une couche d'argon gazeux de 1 mm d'épaisseur à une pression de $6,0 \times 10^{-4}\text{ mmHg}$. Calculer la surface apparente A de chacun des atomes d'argon.

Exercice 1.11 Les études de diffraction des rayons X montrent que les cristaux de NaCl sont disposés en un réseau cubique, avec une distance de $2,820\text{ \AA}$ entre plus proches voisins. En allant chercher la densité et la masse moléculaire de NaCl, calculer le nombre d'Avogadro N_A . (C'est là une des méthodes expérimentales les plus précises pour déterminer N_A .)

Exercice 1.12 Boltwood et Rutherford avaient trouvé que le radium en équilibre avec ses produits de désintégration produit $13,6 \times 10^{10}$ atomes d'hélium par seconde et par gramme de radium. Ils avaient également mesuré que la désintégration de 192 mg de radium produit $0,0824\text{ mm}^3$ d'hélium par jour à température et pression normales (0°C à 1 atm). Calculer, à partir de ces nombres :

- (a) Le nombre d'atomes d'hélium N_H par cm^3 de gaz dans des conditions normales.
- (b) Le nombre d'Avogadro N_A .

Référence : Boltwood et Rutherford, *Phil. Mag.* **22**, 586 (1911).

Exercice 1.13 Rayleigh avait trouvé que 0,81 mg d'huile d'olive à la surface de l'eau produisaient une couche mono-moléculaire de 84 cm de diamètre. Quelle valeur du nombre d'Avogadro N_A en résulta-t-il, en supposant que la composition approximative de l'huile d'olive est $\text{H}(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$, en une chaîne linéaire, de densité $0,8\text{ g cm}^{-3}$?

Référence : Rayleigh, *Proc. Roy. Soc.* **47**, 364 (1890).

Exercice 1.14 En 1860, Maxwell montra que la viscosité d'un gaz est donnée par :

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v l,$$

où ρ est la densité, v la vitesse moléculaire moyenne, et l , le libre parcours moyen. Maxwell avait montré que cette dernière grandeur est $l = 1/(\sqrt{2} \pi N_g \sigma^2)$, où σ est le diamètre de la molécule. Loschmidt (1865) utilisa les valeurs mesurées de η , ρ (du gaz), ρ (du solide) avec la valeur calculée par Joule de v pour déterminer N_g , le nombre de molécules par cm^3 dans un gaz à température et pression standard. Il supposa que les molécules sont des sphères dures formant un empilement compact dans un solide. Sachant que $\eta = 2,0 \times 10^{-4}\text{ g cm}^{-1}\text{ s}^{-1}$ pour de l'air dans des conditions standard, $\rho(\text{liquide}) \approx 1,0\text{ g cm}^{-3}$, $\rho(\text{gaz}) \approx 1,0 \times 10^{-3}\text{ g cm}^{-3}$, et $v \approx 500\text{ m s}^{-1}$, calculer N_g .

Exercice 1.15 Un verre plein d'eau est laissé sur le rebord d'une fenêtre en Californie.

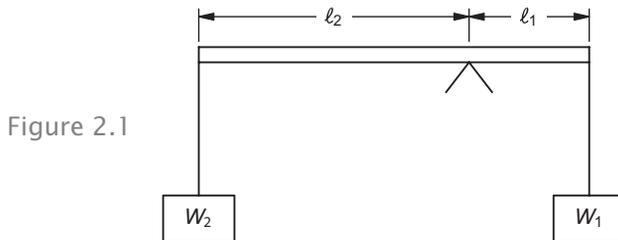
- En combien de temps T pensez-vous que cette eau se sera complètement évaporée ?
- Combien de molécules J par cm^2 et par s quittent le verre d'eau à ce rythme-là ?
- Discuter brièvement la relation quelle qu'elle soit, entre votre réponse à la question (a) ci-dessus et la pluviosité moyenne sur la Terre.

Exercice 1.16 Une goutte d'eau d'un orage tomba, un après-midi, sur une flaque de boue paléozoïque et laissa une empreinte. Longtemps après, cette empreinte fut détournée en tant que fossile par un étudiant en géologie assoiffé par la chaleur. En vidant sa gourde d'eau, l'étudiant se demanda combien de molécules d'eau, N , provenant de cette ancienne goutte d'eau il venait de boire. Estimez N en n'utilisant que des données que vous connaissez déjà. (Faites des hypothèses raisonnables sur l'information que vous ne possédez pas complètement.)

2. CONSERVATION DE L'ÉNERGIE, STATIQUE

On se référera au *Cours de Physique de Feynman*, Mécanique 1, Chap. 4.

Exercice 2.1 En utilisant le principe des travaux virtuels, établir la formule d'équilibre pour une balance asymétrique décrite en Fig. 2.1, $W_1 l_1 = W_2 l_2$. (On négligera le poids du bras.)



Exercice 2.2 Étendre la formule obtenue dans l'exercice 2.1 dans le cas d'un nombre quelconque de poids suspendus à des distances différentes du point pivot,

$$\sum_i W_i l_i = 0.$$

(Les distances d'un côté du point d'appui sont considérées comme positives, celles de l'autre côté comme négatives.)

Exercice 2.3 Sur un corps en équilibre statique s'exercent n forces. En utilisant le principe des travaux virtuels démontrer que :

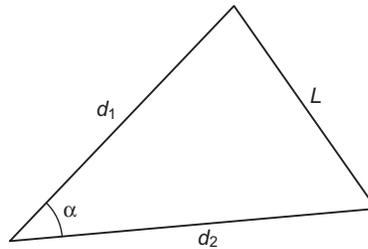
- Si $n = 1$, L'intensité de la force doit être nulle (cas trivial)
- Si $n = 2$, les deux forces sont de même intensité, de directions opposées et colinéaires.

- (c) Si $n = 3$, les forces doivent être coplanaires et passer par un seul et même point.
- (d) Pour n quelconque, la somme des produits des valeurs F_i des forces par le cosinus de l'angle Δ_i entre la force et une droite quelconque est nulle.

$$\sum_{i=1}^n F_i \cos \Delta_i = 0.$$

Exercice 2.4 Les problèmes d'équilibre statique en l'absence de frottement peuvent être ramenés, en faisant usage du *Principe des travaux virtuels*, à de simples problèmes de géométrie comme : où se déplace tel point si tel autre se déplace sur une petite distance ? Souvent, cette question trouve une réponse simple en faisant usage des propriétés suivantes d'un triangle (représenté sur la Fig. 2.2) :

Figure 2.2



- (a) Si les côtés d_1 et d_2 ne changent pas de longueur, mais que l'angle α change d'une petite quantité $\Delta\alpha$, le côté opposé L change de

$$\Delta L = \frac{d_1 d_2}{L} \sin \alpha \Delta\alpha.$$

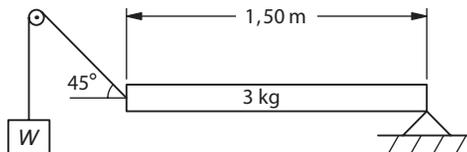
- (b) Si les trois côtés a, b, c d'un triangle rectangle changent de longueur par de petites quantités $\Delta a, \Delta b$, et Δc , alors

$$a \Delta a + b \Delta b = c \Delta c \quad (\text{où } c \text{ est l'hypoténuse}).$$

Démontrer ces relations.

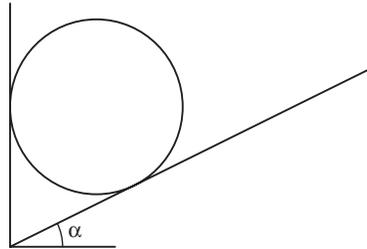
Exercice 2.5 L'extrémité d'une planche uniforme de 1,5 m de long pesant 3 kg est posée sur un pivot. La planche est tenue en équilibre en position horizontale grâce à un système fait d'un poids et d'une poulie comme sur la figure Fig. 2.3. En négligeant tout frottement, trouver la valeur du poids W nécessaire pour maintenir la planche en équilibre.

Figure 2.3



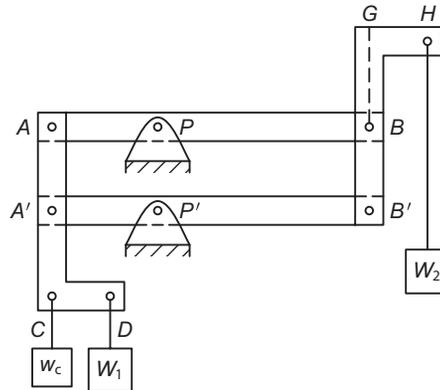
Exercice 2.6 Une balle de 3 cm de rayon et de poids 1 kg est au repos sur un plan tourné d'un angle α par rapport à l'horizontale, et est également en contact avec un mur vertical, comme sur la figure 2.4. Les deux surfaces ont des frottements négligeables. Calculer la force que la balle exerce sur le mur F_W et sur le plan F_P .

Figure 2.4



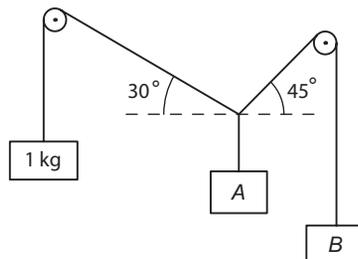
Exercice 2.7 Le cadre d'un parallélogramme déformable $AA'BB'$ peut être tourné (dans un plan vertical) autour des pivots P et P' , comme sur la figure 2.5. Les frottements sont négligeables en $A, A', B, B', P,$ et P' . Les bords $AA'CD$ et $B'BGH$ sont rigides et de même taille. $AP = A'P' = \frac{1}{2}PB = \frac{1}{2}P'B'$. À cause du contrepois w_c , le cadre est en équilibre en l'absence des poids W_1 et W_2 . Si l'on suspend un poids W_1 de 0,50 kg en D , quel poids W_2 , suspendu en H , assurera l'équilibre ?

Figure 2.5



Exercice 2.8 Le système de la figure 2.6 est en équilibre statique. En utilisant le principe des travaux virtuels, déterminer les poids A et B . On négligera le poids des fils de suspension et les frottements des poulies.

Figure 2.6



Exercice 2.9 Un poids de $W = 25 \text{ kg}$ est suspendu au milieu d'un fil métallique ACB comme sur la figure 2.7. $AC = CB = 1,5 \text{ m}$. $AB = 1,5\sqrt{2} \text{ m}$. Déterminer les tensions T_1 et T_2 dans le fil.

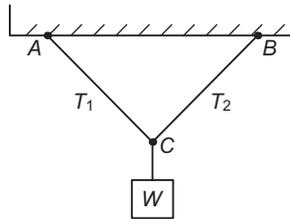


Figure 2.7

Exercice 2.10 Le treillis montré sur la figure 2.8 est fait de bras légers en aluminium qui peuvent pivoter à leurs extrémités. En C se trouve une roue qui roule sur un plaque lisse. Lorsqu'on chauffe le bras AB avec un fer à souder, on observe que ce bras s'allonge d'une quantité x , et que le poids W se déplace verticalement d'une quantité y .

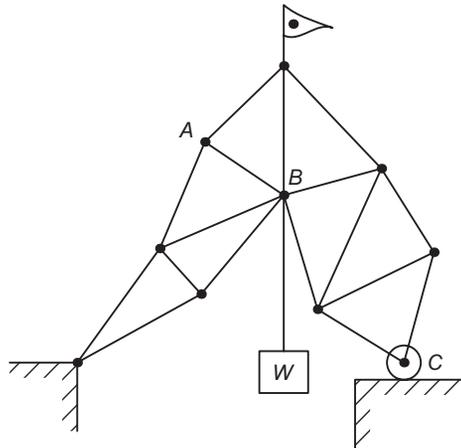


Figure 2.8

- Le mouvement de W se fait-il vers le haut ou vers le bas ?
- Quelle est la force F dans le bras AB (est-ce une tension ou une compression) ?

Exercice 2.11 Quelle force horizontale F (appliquée sur l'axe) doit-on exercer pour pousser une roue de poids W et de rayon R sur une hauteur h , comme sur la figure 2.9 ?

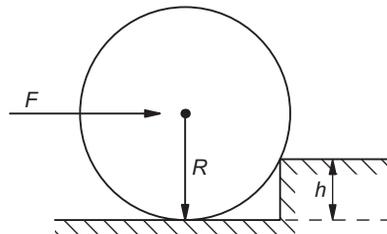


Figure 2.9

Exercice 2.12 Une plaque tournante horizontale de diamètre D est montée sur un support de roulement de frottement négligeable. Deux forces horizontales et de même grandeur F dans le plan de la plaque, mais de sens opposé s'exercent sur le bord de la plaque en des points diamétralement opposés, comme sur la figure 2.10.

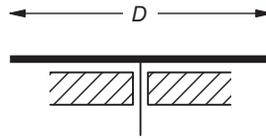
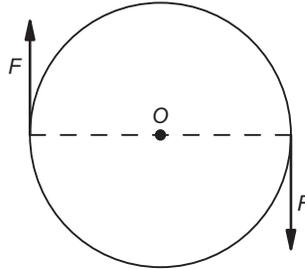


Figure 2.10



- (a) Quelle force F_B s'exerce sur le support ?
- (b) Quel est le couple (= le moment de ce couple) τ_O le long d'un axe vertical passant par son centre O ?
- (c) Quel serait le moment τ_P le long d'un axe vertical quelconque passant par un autre point P dans le même plan ?
- (d) La proposition suivante est-elle juste ou non ? Expliquer pourquoi. « Deux forces quelconques agissant sur un corps peuvent être combinées en une seule résultante qui aurait le même effet. » En élaborant la réponse, considérer le cas de deux forces de sens opposé mais d'intensité légèrement différente.

Exercice 2.13 Une plaque plate en acier flottant sur du mercure subit trois forces aux trois coins d'un carré de 0,1 m de côté, comme sur la figure 2.11. Trouver une quatrième force *unique* F qui peut tenir la plaque en équilibre. Donner la grandeur, la direction et le point d'application de F le long de AB .

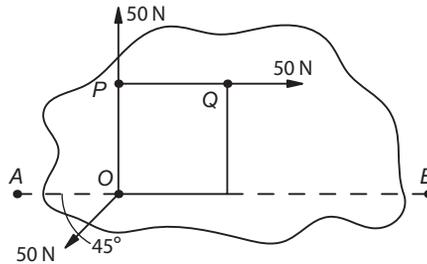


Figure 2.11

Exercice 2.14 En l'absence de frottements, quelle vitesse v auront les poids W_1 et W_2 de la figure 2.12 après avoir parcouru une distance D , s'ils sont initialement au repos ? ($W_1 > W_2$)

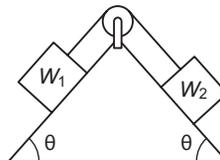
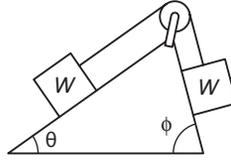


Figure 2.12

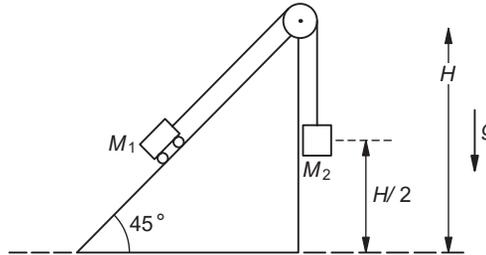
Exercice 2.15 Sur la figure 2.13, les poids sont égaux et les frottements sont négligeables. Si le système est initialement au repos, quelle vitesse v les poids auront-ils après avoir parcouru une distance D ?

Figure 2.13



Exercice 2.16 Une masse M_1 glisse sur un plan incliné à 45° à une hauteur H comme sur la figure 2.14. Elle est reliée par un fil de masse négligeable passant sur une poulie (de masse négligeable) à une masse égale M_2 pendue à la verticale. La longueur de la corde est telle que les deux masses peuvent être au repos si elles sont toutes deux à la hauteur $H/2$. Les dimensions des masses et de la poulie sont négligeables par rapport à H . Au temps $t = 0$ on lâche les masses.

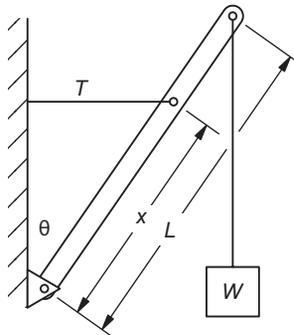
Figure 2.14



- Pour $t > 0$ calculer l'accélération verticale a de M_2 .
- Quelle masse se déplace vers le bas ?
- À quel instant t_1 la masse identifiée en b) touche-t-elle le sol ?
- Si la masse identifiée en b) s'arrête en touchant le sol, mais que l'autre poursuit son mouvement, atteindra-t-elle la poulie ?

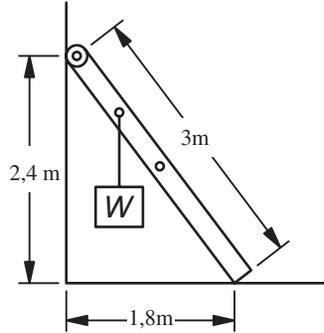
Exercice 2.17 Un derrick est constitué d'un mât uniforme de longueur L et de poids w , articulé à sa base, comme sur la figure 2.15. Il est maintenu à un angle θ avec la verticale par un câble horizontal attaché en un point à une distance x de l'axe du pivot, et un poids W est suspendu à son extrémité. Quelle est la tension T du câble horizontal ?

Figure 2.15



Exercice 2.18 Une échelle uniforme de 3 m de long munie de roulettes à son extrémité supérieure est penchée contre un mur lisse, comme sur la figure 2.16. L'échelle pèse 15 kg. Une masse $W = 30$ kg est suspendue à un barreau à 75 cm du sommet.

Figure 2.16

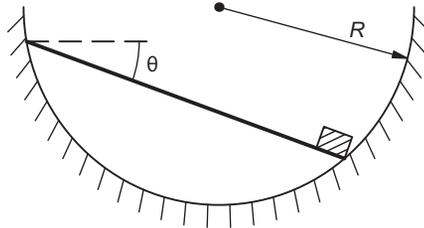


Trouver :

- (a) la force F_R qu'exercent les roulettes sur le mur.
- (b) Les forces horizontale F_h et verticale F_v qu'exerce l'échelle sur le sol.

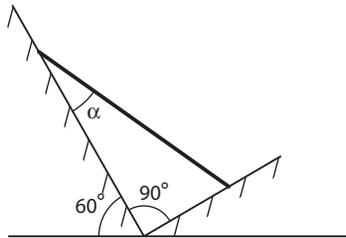
Exercice 2.19 Une planche de poids W et de longueur $\sqrt{3}R$ se trouve dans un cylindre lisse circulaire de rayon R , comme sur la figure 2.17. À une extrémité de la planche se trouve un poids $W/2$. Calculer l'angle θ de la planche à l'équilibre.

Figure 2.17



Exercice 2.20 Un barreau uniforme de longueur l et de poids W repose, en ses extrémités, sur deux plans inclinés comme sur la figure 2.18. À partir du principe des travaux virtuels, trouver l'angle α auquel le barreau se trouve en équilibre. (Négliger les frottements.)

Figure 2.18



Exercice 2.21 Une petite sphère solide de rayon 4,5 cm et de poids W , doit être suspendue par un fil aux extrémités d'un récipient lisse hémisphérique d'un rayon de 49 cm, comme sur la figure 2.19. On s'aperçoit que si le fil est plus court que 40 cm, il se rompt. À partir du principe des travaux virtuels, trouver la force de rupture F du fil.

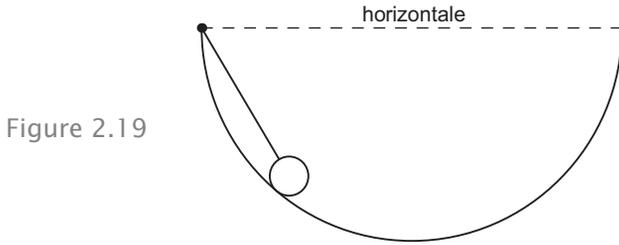


Figure 2.19

Exercice 2.22 Un élément décoratif présenté à une Foire internationale est constitué de quatre sphères métalliques identiques, chacune de $2\sqrt{6}$ tonnes. Les sphères doivent être disposées comme sur la figure 2.20, trois d'entre elles reposant sur une surface horizontale et au contact les unes des autres ; la quatrième doit reposer sur les trois autres. Les trois sphères inférieures sont fixées les unes aux autres par des points de soudure. En se donnant une marge de sécurité d'un facteur 3, quelle tension T les points de soudure doivent-ils pouvoir supporter ?

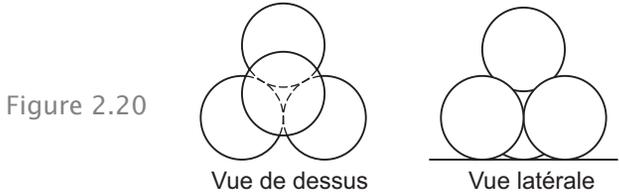


Figure 2.20

Exercice 2.23 Un cadre rigide en fil métallique est mis sous la forme d'un triangle rectangle, et disposé dans un plan vertical, comme sur la figure 2.21. Deux billes de masse $m_1 = 100$ g, $m_2 = 300$ g glissent sans frottement sur les fils et sont reliées par une corde. Lorsque le système est en équilibre statique, quelle est la tension T de la corde, et quel angle α fait-elle avec le premier fil ?

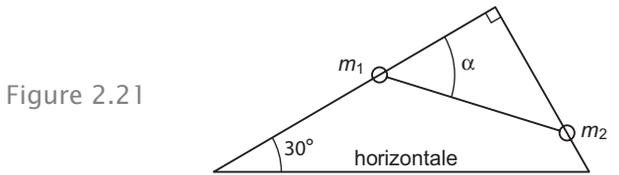


Figure 2.21

Exercice 2.24 Calculer la valeur de la tension T nécessaire pour maintenir en équilibre la cariole de la figure 2.22 s'il n'y a pas de frottements :

- (a) En utilisant le principe des travaux virtuels.
- (b) En travaillant avec les composantes des forces.

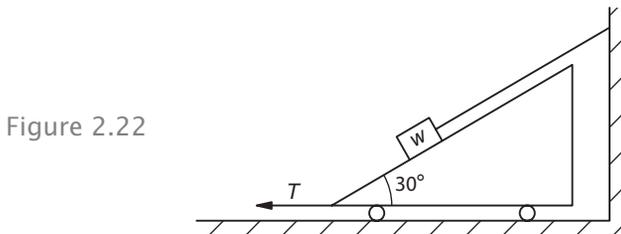
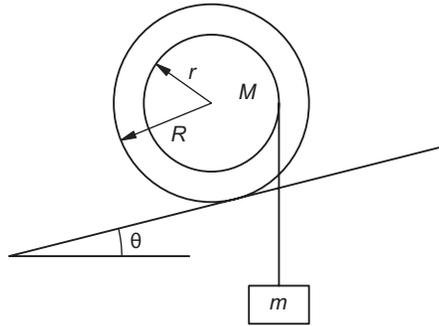


Figure 2.22

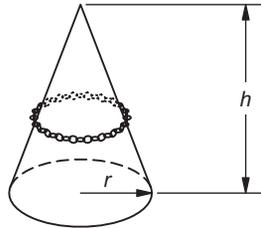
Exercice 2.25 Une bobine de masse $M = 3 \text{ kg}$ est constituée d'un cylindre central de rayon $r = 5 \text{ cm}$ et de deux roues de rayon $R = 6 \text{ cm}$. Elle est placée sur un plan incliné sur lequel elle peut rouler sans glisser. Une masse $m = 4,5 \text{ kg}$ est suspendue par un fil enroulé sur la bobine comme le montre la figure 2.23. On observe que le système est en équilibre statique. Quel est l'angle d'inclinaison θ ?

Figure 2.23



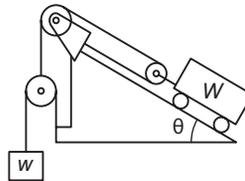
Exercice 2.26 Une boucle de chaîne, de poids total W , est en équilibre sur un cône droit, d'axe vertical, de base circulaire de rayon r , à la hauteur h , comme indiqué sur la figure 2.24. La chaîne est disposée sur un cercle horizontal. Calculer la tension T de la chaîne. On négligera les frottements.

Figure 2.24



Exercice 2.27 Un chariot sur un plan incliné est équilibré par un poids w , comme sur la figure 2.25. Tous les frottements sont négligeables. Quel est le poids W du chariot ?

Figure 2.25



Exercice 2.28 La charpente d'un pont est construite comme sur la figure 2.26. Toutes les articulations sont des pivots sans frottements et tous les bras sont rigides, de masse négligeable et d'égale longueur. Trouver les forces de réaction F_1 et F_2 et la force F_{DF} dans le bras DF .