

PETITS PROBLÈMES DE PHYSIQUE

Du quotidien au laboratoire

François Graner

Chercheur au CNRS

Robin Kaiser

Directeur de recherche au CNRS

Antonin Marchand

Professeur agrégé à l'École normale supérieure

Thomas Salez

Professeur agrégé à l'École normale supérieure

DUNOD

Une première édition de cet ouvrage est parue chez Springer
dans la collection Scopos.
Collection dirigée par Jean-Michel Ghidaglia.

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.

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

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. 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).



© Dunod, Paris, 2011
ISBN 978-2-10-055893-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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

Introduction	IX
Chapitre 1. Énoncés courts des problèmes	1
Chapitre 2. Méthodologie	11
1 Comment aborder un problème nouveau?	11
Manipuler	11
Analyser	12
Calculer	12
Vérifier	13
2 Quelques méthodes générales	13
Ordres de grandeur	13
Analyse dimensionnelle	14
Utilisation des analogies	14
Constantes du mouvement	15
Bilans d'énergie	15
Autres bilans	15
Force ou énergie?	16
Utilisation des symétries	17
Changement de référentiel	17
Systèmes ouverts	18
Points de vue lagrangien et eulérien	18
Méthodes d'approximation	19
Développements limités	20
Non-linéarités	20
Résolution graphique	21
Résolution géométrique	21
Portraits de phase	22
Potentiels thermodynamiques	22
Étude de stabilité	23
Décomposition de Fourier	23
Raisonnements statistiques	24
Utilisation des notations complexes	24
Incertitudes	25
Chapitre 3. Énoncés détaillés et solutions des problèmes	27
<i>Acoustique et thermodynamique</i>	
1 La clarinette	27
2 Le pouls	35

Petits problèmes de physique : du quotidien au laboratoire

3	Tuyère supersonique	40
4	Rayonnement thermique	46
<i>Forces radiatives</i>		
5	Queue des comètes	54
6	Polarisabilité	60
7	Atomes et photons	66
8	Ralentissement d'un jet atomique	75
9	Refroidissement d'atomes	83
10	Pince optique	92
<i>Interfaces et capillarité</i>		
11	Bulle de champagne	100
12	De l'huile et du vinaigre	108
13	Ballons de baudruche	116
14	Gouttes chargées	124
<i>Piégeage de particules chargées</i>		
15	Spectro de masse	133
16	Électrons, pièges à ions	144
<i>Mécanique</i>		
17	À vélo	152
18	Valise à roulettes	160
19	Tartine beurrée et pistaches	167
20	Pièce qui roule...	173
21	Empilement de dominos	179
<i>Optique</i>		
22	L'œil et ses défauts	185
23	Miroirs de luxe	193
24	Détection d'ondes gravitationnelles	200
25	Laser femtoseconde	209
<i>Ondes</i>		
26	Sillages en vogue	217
27	Trafic	224
<i>Interactions matière-rayonnement</i>		
28	Effet Zeeman	229
29	Écho de spins	235
30	Imagerie par résonance magnétique (IRM)	244
Données numériques et formulaire		251
A	Données numériques utiles	251
B	Unités	253
C	Systèmes de coordonnées	254
D	Formules	259

Table des matières

D.1	Mathématiques	259
D.2	Thermodynamique	261
D.3	Optique	262
D.4	Mécanique	263
D.5	Électromagnétisme	264
Bibliographie		267
Index		271

INTRODUCTION

Ce recueil rassemble des problèmes de physique originaux abordant une large gamme de phénomènes physiques que l'on rencontre aussi bien au quotidien qu'en laboratoire. Il s'adresse à des étudiants préparant les concours d'entrée aux grandes écoles scientifiques, à ceux préparant l'agrégation ou le capes de physique, aux étudiants en deuxième cycle universitaire ou en master enseignement, ainsi qu'aux enseignants eux-mêmes.

L'objectif est d'apprendre à aborder de façon autonome des phénomènes en apparence compliqués à l'aide d'outils et de raisonnements simples. Souligner les phénomènes physiques importants, cibler les connaissances essentielles, évaluer les efforts nécessaires pour comprendre suffisamment un problème sont des étapes indispensables à sa résolution. Ensuite, une solution n'est ni unique ni complète : l'important est de pouvoir quantifier les limites d'un modèle. Il est donc conseillé d'exercer son intuition, de tâtonner, de faire des figures, d'estimer des ordres de grandeur, de discuter du rôle des paramètres. Pour aider les lecteurs à construire leur propre raisonnement, les problèmes sont divisés en trois parties.

Tout d'abord, un **énoncé court** décrit brièvement le problème. Il s'agit à ce stade plus d'une incitation à développer une idée que d'une résolution complète, qui serait très difficile. Cependant, cette étape est essentielle pour le lecteur soucieux de développer sa capacité à analyser et modéliser un problème. Il est donc vivement conseillé d'y consacrer du temps et de ne pas passer trop rapidement à l'étape suivante. Les enseignants pourront les utiliser tels quels en ne donnant des indications qu'au fur et à mesure. Ces énoncés ont d'ailleurs été pour la plupart proposés sous une forme similaire par François Graner et Robin Kaiser, aux oraux des Écoles Normales Supérieures, où il s'agissait d'évaluer l'autonomie des candidats/-es, par le nombre d'indications fournies.

Ensuite, l'**énoncé détaillé** développe, sous la forme d'un problème plus standard, les questions soulevées par l'énoncé court. Le chemin de raisonnement proposé nécessite uniquement des connaissances de physique classique du premier cycle universitaire. Il impose volontairement très peu de notations et laisse une certaine liberté au lecteur pour construire son propre modèle.

Enfin, une **résolution** possible est proposée. Elle s'appuie sur des applications numériques, des estimations d'ordres de grandeurs, des approximations commentées et des discussions qualitatives. On y trouvera de plus des encadrés historiques, des

Petits problèmes de physique : du quotidien au laboratoire

rappels de cours, des références bibliographiques qu'il est conseillé d'étudier, ainsi que des ouvertures pour aller plus loin dans l'étude du phénomène.

Par ailleurs, une partie **méthodologique** est proposée en début d'ouvrage. Elle regroupe différents conseils sur la manière d'aborder un problème nouveau, et développe un ensemble, non exhaustif, de méthodes générales abordées dans chaque problème.

Les lecteurs trouveront en fin d'ouvrage plusieurs outils. Tout d'abord, toutes les **données numériques** utiles aux problèmes sont regroupées dans un **formulaire** qui contient également quelques formules de cours. Par ailleurs, une **bibliographie** complète mentionne des références précises aux articles de journaux d'enseignement, aux journaux scientifiques, aux revues de vulgarisation, aux livres de référence sur les sujets abordés, aux énoncés de concours, et aux sites internet traitant des problèmes étudiés. Ces documents sont disponibles en ligne ou dans les bibliothèques universitaires. Enfin, un **index** détaillé regroupe l'ensemble des notions abordées.

Toute suggestion d'amélioration est la bienvenue, et sera prise en compte lors d'une éventuelle réédition.

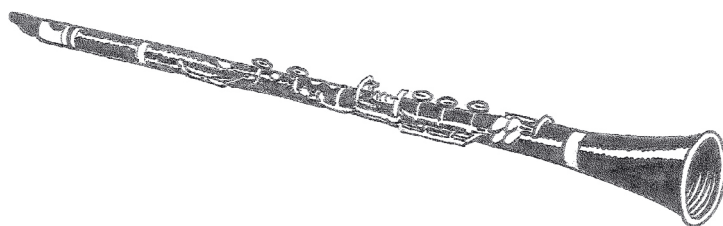
Enfin, les auteurs tiennent à remercier Eric Fourcoux pour ses nombreuses illustrations ainsi qu'Isabelle Bonnet, Florence Koch et Christelle Pilon pour leurs relectures détaillées.

ÉNONCÉS COURTS DES PROBLÈMES

1

1 LA CLARINETTE

Certains instruments à vent comme la clarinette ont des sections non uniformes, qui peuvent croître exponentiellement par exemple. Comment s'y propage le son ? Quelle est la relation de dispersion ? Quelles fréquences sont transmises ?



DÉTAILS PAGE [27](#).

2 LE POULS

Le pouls est une surpression qui se propage dans nos artères. Comment décrire ce phénomène ? Comment se propage la pression ? En déduire la vitesse du pouls ; vérifier que l'ordre de grandeur est correct.

DÉTAILS PAGE [35](#).

3 TUYÈRE SUPERSONIQUE

Dans une fusée, on brûle des gaz et on cherche ensuite à les éjecter avec la vitesse la plus grande possible. Pour cela on joue sur la forme de la tuyère (le « pot d'échappement ») de la fusée. Montrer que la meilleure forme est nécessairement une tuyère avec un col, qui converge d'abord puis diverge ensuite.

DÉTAILS PAGE [40](#).

4 RAYONNEMENT THERMIQUE

Le rayonnement thermique est le rayonnement produit par un corps à l'équilibre thermique à une température donnée. On le caractérise par son énergie libre, que l'on supposera donnée par l'expression $F = -aVT^4$, où T est sa température, V le volume de la région où se propage le rayonnement, et a est un nombre constant.

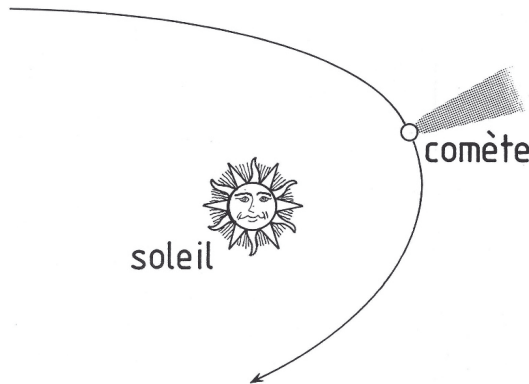
Étudier ce système d'un point de vue thermodynamique. Discuter en particulier l'équation d'état et la détente de ce rayonnement.

Peut-on estimer la température de la Terre à partir de la forme de cette énergie ?

DÉTAILS PAGE [46](#).

5 QUEUE DES COMÈTES

Estimer la taille maximale des poussières neutres dans les queues des comètes en tenant compte de la pression de radiation et de l'attraction gravitationnelle du Soleil.



DÉTAILS PAGE [54](#).

6 POLARISABILITÉ

Comment définir la polarisabilité d'un atome ? Comment la calculer ? Comment cette grandeur dépend-elle de la fréquence du champ électrique imposé ?

DÉTAILS PAGE [60](#).

7 ATOMES ET PHOTONS

Décrire et interpréter les forces exercées par un laser sur un atome. Peut-on négliger l'effet du champ magnétique ?

DÉTAILS PAGE [66](#).

8 RALENTISSEMENT D'UN JET ATOMIQUE

Comment ralentir un jet d'atomes de rubidium qui sort d'un four en éclairant le jet avec un laser se propageant en sens opposé ? Comment l'effet Doppler modifie-t-il la force de pression de radiation ?

DÉTAILS PAGE [75](#).

9 REFROIDISSEMENT D'ATOMES

Calculer l'évolution de la vitesse d'un atome placé au centre de deux ondes planes se propageant en sens opposés. Quelle fréquence faut-il choisir pour refroidir les atomes ?

DÉTAILS PAGE [83](#).

10 PINCE OPTIQUE

Avec un laser de puissance 10 W et de section $900 \mu\text{m}^2$, peut-on piéger une bille de verre de rayon $10 \mu\text{m}$?

DÉTAILS PAGE [92](#).

11 BULLE DE CHAMPAGNE

Dans le champagne, du gaz carbonique est dissout. Au contact des parois d'un verre, des bulles de gaz se forment puis se détachent. À un instant donné, quels sont les mécanismes qui déterminent la forme d'une bulle ? Pourquoi la bulle monte-t-elle ? Comment varie alors cette forme ? Le diamètre de cette bulle peut-il osciller ?

DÉTAILS PAGE [100](#).

12 DE L'HUILE ET DU VINAIGRE

Dans un récipient, on verse de l'huile sur du vinaigre. Que se passe-t-il lorsque l'on perturbe la forme de l'interface ? Et lorsque l'on intervient les deux liquides ? Quelle est alors la taille typique des perturbations observées ?

DÉTAILS PAGE [108](#).

13 BALLONS DE BAUDRUCHE

Que se passe-t-il lorsque l'on gonfle un ballon de baudruche ? Interpréter quantitativement. On connecte ensuite deux ballons identiques et on attend que l'équilibre s'établisse. Ont-ils alors nécessairement la même taille ? De quoi cela dépend-il ? Comparer avec le cas de deux bulles de savon.

DÉTAILS PAGE [116](#).

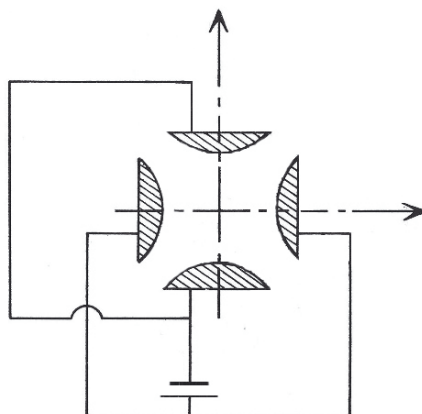
14 GOUTTES CHARGÉES

Une goutte sphérique chargée électriquement est-elle stable ? Peut-elle se fragmenter ? Si oui, comment ? Pour mesurer la charge élémentaire e , l'expérience de Millikan utilise un brouillard de gouttelettes d'huile chargées en suspension dans l'air. À quelle condition a-t-on une proportion importante de gouttelettes portant la charge minimale e ?

DÉTAILS PAGE [124](#).

15 SPECTRO DE MASSE

Le spectromètre de masse est basé sur le principe du piège de Paul. Ce piège peut par exemple être constitué de quatre électrodes cylindriques placées de la manière suivante :

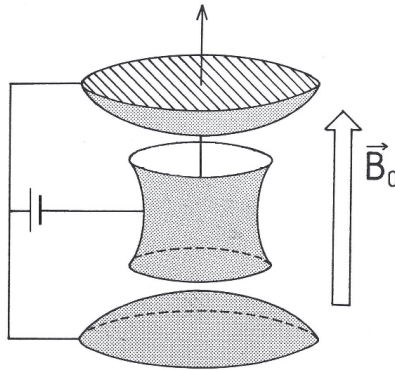


Les surfaces des électrodes sont décrites par des hyperboles identiques. On applique entre les deux paires d'électrodes opposées une différence de potentiel alternative. Décrire le mouvement d'un électron dans un tel piège.

DÉTAILS PAGE [133](#).

16 ÉLECTRONS, PIÈGES À IONS

Un piège de Penning est un piège de Paul tridimensionnel auquel on ajoute un champ magnétique statique. Il est composé de trois électrodes, l'une en forme d'anneau et deux autres en forme de coupelles :



Les surfaces des électrodes sont décrites par des hyperboloïdes de révolution. On applique une différence de potentiel statique entre l'anneau et les deux coupelles, et un champ magnétique selon l'axe de symétrie du système. Décrire le mouvement d'un électron dans un tel piège.

DÉTAILS PAGE [144](#).

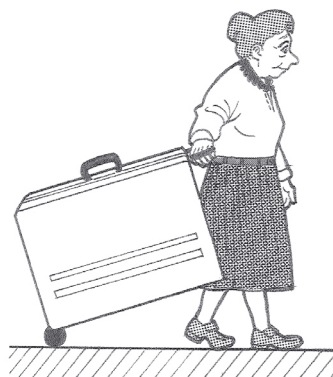
17 À VÉLO

Un cycliste part à vélo pour franchir un col situé 1000 mètres plus haut. Déterminer le temps de montée en fonction de la pente de la route. Y a-t-il une valeur de la pente qui minimise le temps de montée ? Ensuite il redescend : mêmes questions. Faire le bilan d'énergie.

DÉTAILS PAGE [152](#).

18 VALISE À ROULETTES

Il y a quelques années, certaines valises étaient plus longues que larges. Quand on les tirait sur un quai de gare ou dans un aéroport, elles avaient une fâcheuse tendance à osciller. Pourquoi ? Proposer une étude détaillée de ces oscillations.

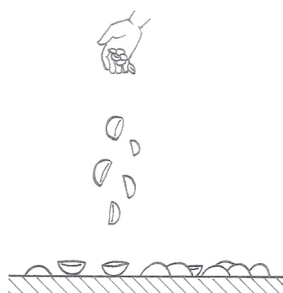


DÉTAILS PAGE [160](#).

19 TARTINE BEURRÉE ET PISTACHES

Après avoir mangé des pistaches, il reste des coquilles vides. Prendre une poignée de ces coquilles et les lâcher au-dessus de la table. Certaines retombent avec le côté plat contre la table, les autres ont le côté plat vers le haut. De quoi cela dépend-il ? Déterminer les paramètres physiques qui interviennent. Quelle proportion moyenne se retrouve le côté plat contre la table ?

Autre question similaire : on laisse tomber par terre une tartine beurrée. Quelle est la probabilité qu'elle retombe avec le côté beurré vers le sol ?



DÉTAILS PAGE [167](#).

20 PIÈCE QUI ROULE...

Certaines pièces de monnaie, par exemple les anciennes pièces d'un ou deux francs, ou certains euros usés, ne tiennent pas sur la tranche. Pourquoi ? À quelle vitesse faut-il les faire rouler pour qu'elles tiennent ?

DÉTAILS PAGE [173](#).