

BERTY – ESCAUT

MARCHAND – MARTIN – OUSTRY

# physique pratique

TOME 2

MÉCANIQUE  
THERMODYNAMIQUE



VUIBERT

7960735



E7960735

physique pratique

mécanique et thermodynamique

2070707

## A LA MÊME LIBRAIRIE

---

### *DES MÊMES AUTEURS*

**Physique pratique** : tome 1 : Électricité. — Vol.  $16 \times 24$  cm, de 368 pages.

**Physique pratique** : tome 3 : Optique. — Vol.  $16 \times 24$  cm, de 280 pages.

### *DANS LA MÊME SÉRIE*

**Chimie pratique**, par R. DAVID (avec la collaboration de J. BENOIT). — Vol.  $16 \times 24$  cm, de 336 pages.

---

**Problèmes de Physique** (CAPES de 1960 à 1974) corrigés et commentés, par J. BERTY, P. MARCHAND et A. OUSTRY. — Vol.  $16 \times 24$  cm, de 392 pages.

**Exercices et problèmes d'optique physique** (licence, maîtrise, agrégation) par J. FAGET et L. MARTIN. — Vol.  $16 \times 24$  cm, de 420 pages.

---

U4  
P578.3  
E.2  
V.2

# physique pratique

à l'usage des enseignants et des candidats  
aux concours de recrutement  
de l'Éducation nationale,

par

*J. BERTY, A. ESCAUT, P. MARCHAND,  
L. MARTIN et A. OUSTRY,*

de l'Université de Toulouse.

TOME II

## mécanique et thermodynamique



LIBRAIRIE VUIBERT  
BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 63

1976

## DIFFUSEURS VUIBERT

BELGIQUE : ÉDITIONS ET DIFFUSION,  
16, rue de Chambéry, 1040 BRUXELLES.

CANADA : PRESSES DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC,  
CP 250 - Station N, MONTRÉAL H2X 3M4.

MAROC : SMER-LIVRE-SERVICE,  
10, avenue Allal Ben Abdallah, RABAT.

SUISSE : SPES,  
39, route d'Oron, 1002 LAUSANNE.

ISBN: 2-7117-4201-6

*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 ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (a'linéa 1<sup>er</sup> 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.*

© Librairie Vuibert, 1973.

# table des matières

## GÉNÉRALITÉS

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| A. — Tables de constantes.                   |    |
| I. — Masses volumiques .....                 | 9  |
| II. — Points de fusion et d'ébullition ..... | 11 |
| III. — Coefficients de dilatation .....      | 12 |
| IV. — Chaleurs massiques .....               | 12 |
| V. — Chaleurs de fusion .....                | 13 |
| VI. — Chaleurs de vaporisation .....         | 14 |
| VII. — Tensions superficielles .....         | 14 |
| VIII. — Coefficients de viscosité .....      | 15 |
| B. — Incertitudes et graphiques .....        | 17 |

## MÉCANIQUE

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rappels de Mécanique .....                                                                    | 23  |
| Mesures de masses, de longueurs et de temps .....                                             | 27  |
| Moments d'inertie .....                                                                       | 35  |
| 1. — Champ de vitesses .....                                                                  | 39  |
| 2. — Champ de forces .....                                                                    | 45  |
| 3. — Pression atmosphérique .....                                                             | 51  |
| 4. — Poussée d'Archimède .....                                                                | 55  |
| 5. — Tension superficielle. Capillarité .....                                                 | 65  |
| 6. — Frottement solide .....                                                                  | 79  |
| 7. — Mouvement d'un solide lancé dans un champ de pesanteur .                                 | 85  |
| 8. — Vérification du principe fondamental de la Dynamique :<br>mouvement de translation ..... | 93  |
| 9. — Vérification du principe fondamental de la Dynamique :<br>mouvement de rotation .....    | 99  |
| 10. — Mouvement de rotation uniforme .....                                                    | 103 |
| 11. — Mouvement d'un solide roulant sans glisser sur un plan<br>incliné .....                 | 109 |
| 12. — Écoulement d'un fluide et résistance au mouvement des<br>solides .....                  | 115 |
| 13. — Corps pesant suspendu à un ressort .....                                                | 120 |
| 14. — Pendule pesant .....                                                                    | 135 |
| 15. — Pendule de torsion .....                                                                | 143 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 16. — Qualités d'une balance .....                            | 151 |
| 17. — Quantité de mouvement et moment cinétique .....         | 159 |
| 18. — Résonance.....                                          | 169 |
| 19. — Systèmes couplés à 2, 3, ..., N degrés de liberté ..... | 179 |
| 20. — Oscillations forcées des systèmes couplés .....         | 189 |
| 21. — Composition des vibrations .....                        | 193 |
| 22. — Propagation des ondes élastiques .....                  | 199 |
| 23. — Qualités physiologiques des sons .....                  | 209 |

## THERMODYNAMIQUE

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Rappels de Thermodynamique .....                              | 215 |
| Thermométrie.....                                             | 221 |
| 1. — Dilatation des solides, des liquides et des gaz .....    | 229 |
| 2. — Propagation de la chaleur .....                          | 243 |
| 3. — Mesures calorimétriques .....                            | 255 |
| 4. — Correspondance entre le joule et la calorie .....        | 265 |
| 5. — Propriétés thermoélastiques et thermodynamiques des gaz. | 271 |
| 6. — Changements d'états d'un corps pur .....                 | 287 |

|            |     |
|------------|-----|
| INDEX..... | 297 |
|------------|-----|

tables de constantes

TABLES DE CONSTANTES

# ***GÉNÉRALITÉS***



# tables de constantes

## I. — MASSES VOLUMIQUES

| <i>Éléments</i><br>(en g/cm <sup>3</sup> , à 20 °C)        |      |                                                                       |       |
|------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------|-------|
| aluminium .....                                            | 2,7  | magnésium .....                                                       | 1,74  |
| antimoine .....                                            | 6,6  | manganèse .....                                                       | 7,4   |
| argent .....                                               | 10,5 | nickel .....                                                          | 8,8   |
| bismuth .....                                              | 9,8  | or .....                                                              | 19,3  |
| cadmium .....                                              | 8,6  | platine .....                                                         | 21,4  |
| calcium .....                                              | 1,54 | potassium .....                                                       | 0,87  |
| carbone (diamant) ..                                       | 3,5  | plomb .....                                                           | 11,34 |
| césium .....                                               | 1,87 | silicium .....                                                        | 2,4   |
| cobalt .....                                               | 8,7  | sodium .....                                                          | 0,97  |
| cuiivre .....                                              | 8,89 | soufre monoclinique ..                                                | 2,0   |
| étain .....                                                | 7,3  | soufre rhomboédrique ..                                               | 2,2   |
| fer .....                                                  | 7,9  | tantale .....                                                         | 16,6  |
| germanium .....                                            | 5,46 | tungstène .....                                                       | 18,9  |
| graphite .....                                             | 2,27 | zinc .....                                                            | 7,1   |
| <i>Alliages usuels</i><br>(en g/cm <sup>3</sup> , à 20 °C) |      |                                                                       |       |
| acier<br>(99 % Fe, 1 % C) ..                               | 7,83 | laiton<br>(70 % Cu, 30 % Zn) ..                                       | 8,6   |
| bronze<br>(80 % Cu, 20 % Sn)                               | 8,74 | manganin<br>(84 % Cu, 12 % Mn,<br>4 % Ni) .....                       | 8,5   |
| constantan<br>(60 % Cu, 40 % Ni) ..                        | 8,88 | métal de Wood<br>(50 % Bi, 25 % Pb,<br>12,5 % Cd, 12,5 %<br>Sn) ..... | 9,7   |
| invar<br>(63,8 % Fe, 36 % Ni,<br>0,2 % C) .....            | 8,00 |                                                                       |       |

**Solides usuels**(en g/cm<sup>3</sup>, à 20 °C)

|                 |      |                       |           |
|-----------------|------|-----------------------|-----------|
| balsa .....     | 0,12 | mica .....            | 2,6 à 3,2 |
| ébène .....     | 1,2  | paraffine .....       | 0,9       |
| celluloïd ..... | 1,4  | quartz .....          | 2,67      |
| ébonite .....   | 1,15 | verre ordinaire ..... | 2,6       |
| liège .....     | 0,22 | flint .....           | 2,9 à 5,9 |

**Liquides**(en g/cm<sup>3</sup>)

|                       |               |                 |                           |
|-----------------------|---------------|-----------------|---------------------------|
| acétone .....         | 0,792 (20 °C) | eau pure .....  | 1,0 (4 °C) <sup>(1)</sup> |
| alcool éthylique .... | 0,791 (20 °C) | éther .....     | 0,736 (0 °C)              |
| benzène .....         | 0,899 (0 °C)  | glycérine ..... | 1,26 (0 °C)               |
| chloroforme .....     | 1,49 (20 °C)  | mercure .....   | 13,6 (0 °C)               |

**Gaz**

(en g/l, à 0 °C et à 760 mmHg)

|                      |         |                 |         |
|----------------------|---------|-----------------|---------|
| air .....            | 1,293   | isobutane ..... | 2,673   |
| azote .....          | 1,251   | méthane .....   | 0,716 8 |
| dioxyde de carbone . | 1,977   | oxygène .....   | 1,429 0 |
| hélium .....         | 0,178 5 | propane .....   | 2,009   |
| hydrogène .....      | 0,089 9 |                 |         |

<sup>(1)</sup> Cas de l'eau : masse volumique et température (°C) :

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| 0,998 15 à - 10 | 0,999 73 à + 10  |
| 0,999 45 à - 4  | 0,998 23 à + 20  |
| 0,999 87 à 0    | 0,992 24 à + 40  |
| 1,000 00 à + 4  | 0,958 38 à + 100 |

II. — POINTS DE FUSION ET D'ÉBULLITION <sup>(1)</sup>*Éléments*

|                 | $t_F(^{\circ}\text{C})$ | $t_E(^{\circ}\text{C})$ |                 | $t_F(^{\circ}\text{C})$ | $t_E(^{\circ}\text{C})$ |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| aluminium ..... | 659,7                   | 2 057                   | manganèse ..... | 1 260                   | 1 900                   |
| antimoine ..... | 630,5                   | 1 380                   | mercure .....   | — 38,87                 | 356,58                  |
| argent .....    | 960,8                   | 1 950                   | néon .....      | — 248,67                | — 245,9                 |
| argon .....     | — 189,2                 | — 185,7                 | nickel .....    | 1 455                   | 2 900                   |
| azote .....     | — 209,8                 | — 195,8                 | or .....        | 1 063                   | 2 600                   |
| bismuth .....   | 271,3                   | 1 560                   | oxygène .....   | — 218,4                 | — 182,86                |
| cadmium .....   | 320,9                   | 767                     | platine .....   | 1 773,5                 | 4 300                   |
| calcium .....   | 842                     | 1 240                   | plomb .....     | 327,43                  | 1 620                   |
| carbone .....   | > 3 550                 | 4 200                   | potassium ..... | 62,3                    | 760                     |
| cuiivre .....   | 1 083                   | 2 336                   | silicium .....  | 1 420                   | 2 355                   |
| étain .....     | 231,89                  | 2 270                   | sodium .....    | 97,5                    | 880                     |
| fer .....       | 1 535                   | 3 000                   | soufre          |                         |                         |
| gallium .....   | 29,78                   | 1 983                   | -rhomboédrique  | 112,8                   | 444,6                   |
| germanium ..... | 958,5                   | 2 700                   | -monoclinique   | 119,25                  | 444,6                   |
| hélium .....    | — 272                   | — 268,9                 | tantale .....   | 2 996                   | 4 100                   |
| hydrogène ..... | — 259,14                | — 252,8                 | tungstène ..... | 3 370                   | 5 900                   |
| magnésium ..... | 651                     | 1 107                   | xénon .....     | — 112                   | — 107,1                 |
|                 |                         |                         | zinc .....      | 419                     | 907                     |

*Substances organiques*

|                  | $t_F(^{\circ}\text{C})$ | $t_E(^{\circ}\text{C})$ |                    | $t_E(^{\circ}\text{C})$ | $t_F(^{\circ}\text{C})$ |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| acétone .....    | — 95                    | 57                      | chloroforme .....  | — 63,2                  | 61,2                    |
| acétylène .....  | — 81                    | — 72,2                  | éther .....        | — 117,6                 | 34,6                    |
| alcool éthylique | — 130                   | 78,3                    | glycérine .....    | 17                      | 291                     |
| benzène .....    | 5                       | 80                      | huile d'olive .... | 2 à 6                   | —                       |

<sup>(1)</sup> Couleurs et températures ( $^{\circ}\text{C}$ ) :

Rouge naissant : 500 à 550  
 Rouge sombre : 650 à 750  
 Rouge brillant : 850 à 950  
 Rouge jaunâtre : 1 050 à 1 150  
 Blanc naissant : 1 250 à 1 350  
 Blanc : 1 450 à 1 550

### III. — COEFFICIENTS DE DILATATION

| <b>Solides</b><br>(coefficient de dilatation linéaire : $\lambda$ ) |                  |                                              |
|---------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|
|                                                                     | Température (°C) | Coefficient $\lambda$<br>(°C <sup>-1</sup> ) |
| aluminium .....                                                     | 20               | $25,5 \cdot 10^{-6}$                         |
| antimoine .....                                                     | 20               | $12 \cdot 10^{-6}$                           |
| argent .....                                                        | 20               | $18,8 \cdot 10^{-6}$                         |
| carbone                                                             |                  |                                              |
| — diamant .....                                                     | 40               | $1,18 \cdot 10^{-6}$                         |
| — graphite .....                                                    | 40               | $7,86 \cdot 10^{-6}$                         |
| cuivre électrolytique .....                                         | 25 à 100         | $16,8 \cdot 10^{-6}$                         |
| fer .....                                                           | — 190 à + 17     | $9,07 \cdot 10^{-6}$                         |
| nickel .....                                                        | 40               | $12,79 \cdot 10^{-6}$                        |
| or .....                                                            | 16 à 100         | $14,3 \cdot 10^{-6}$                         |
| platine .....                                                       | 40               | $8,99 \cdot 10^{-6}$                         |
| plomb .....                                                         | 18 à 100         | $29,40 \cdot 10^{-6}$                        |
| sodium .....                                                        | — 188 à + 17     | $62,2 \cdot 10^{-6}$                         |
| zinc .....                                                          | 10 à 100         | $26,28 \cdot 10^{-6}$                        |

### IV. — CHALEURS MASSIQUES

| <b>Éléments</b><br>(en cal . g <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> , à 20 °C) |       |                           |       |
|----------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------|-------|
| aluminium .....                                                            | 0,214 | mercure                   |       |
| antimoine .....                                                            | 0,050 | — liquide .....           | 0,033 |
| argent .....                                                               | 0,056 | — solide (— 220 °C) ..... | 0,025 |
| bismuth .....                                                              | 0,029 | nickel .....              | 0,105 |
| cuivre .....                                                               | 0,092 | or .....                  | 0,031 |
| étain .....                                                                | 0,054 | platine .....             | 0,032 |
| fer .....                                                                  | 0,110 | plomb .....               | 0,031 |
| magnésium .....                                                            | 0,246 | potassium .....           | 0,192 |
|                                                                            |       | silicium .....            | 0,180 |

| <b>Alliages</b><br>(en cal. g <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> , à 20 °C)             |       |                 |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------|-------|
| acier ordinaire .....                                                                 | 0,107 | mica .....      | 0,21  |
| bronze<br>(80 % Cu, 20 % Sn) .....                                                    | 0,086 | quartz .....    | 0,19  |
| constantan .....                                                                      | 0,1   | crown .....     | 0,16  |
| laiton<br>(60 % Cu, 40 % Zn) .....                                                    | 0,091 | flint .....     | 0,12  |
| <b>Liquides</b><br>(en cal. g <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> , à 20° C)             |       |                 |       |
| acétone .....                                                                         | 0,528 | éther .....     | 0,54  |
| alcool éthylique .....                                                                | 0,58  | glycérine ..... | 0,56  |
| benzène .....                                                                         | 0,406 |                 |       |
| <b>Gaz</b><br>(en cal. g <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> , à 15 °C, sauf pour l'air) |       |                 |       |
| air (100 °C, 1 atm) .....                                                             | 0,24  | hydrogène ..... | 3,389 |
| azote .....                                                                           | 0,248 | méthane .....   | 0,53  |
| éthane .....                                                                          | 0,386 | oxygène .....   | 0,218 |
| éthylène .....                                                                        | 0,359 |                 |       |

## V. — CHALEURS DE FUSION ( $L_F = Q_P = \Delta H$ )

| Corps           | Température<br>de fusion (°C) | Chaleur de fusion<br>(cal/g) |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| aluminium ..... | 660                           | 94,0                         |
| cuivre .....    | 1 083                         | 49,0                         |
| plomb .....     | 327                           | 5,47                         |
| mercure .....   | — 39                          | 2,82                         |
| azote .....     | — 210                         | 6,1                          |
| hydrogène ..... | — 259                         | 14,0                         |
| oxygène .....   | — 219                         | 3,3                          |
| eau .....       | 0                             | 79,71                        |

VI. — CHALEURS DE VAPORISATION ( $L_V = Q_P = \Delta H$ )

| Corps           | Température de vaporisation (°C) | Chaleur de vaporisation (cal/g) |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| hélium .....    | — 268,9                          | 6,0                             |
| hydrogène ..... | — 252,8                          | 108                             |
| oxygène .....   | — 182,9                          | 50,9                            |
| eau .....       | 0                                | 595,9                           |
|                 | 30                               | 579,5                           |
|                 | 60                               | 563,2                           |
|                 | 100                              | 539,5                           |
|                 | 180                              | 478,6                           |

## VII. — TENSIONS SUPERFICIELLES

| <i>Liquides</i>                                                                                           |            |                    |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|------------------|
|                                                                                                           | A (dyn/cm) | en contact avec... | Température (°C) |
| acétone .....                                                                                             | 23,70      | air ou vapeur      | 20               |
| benzène .....                                                                                             | 28,85      | air                | 20               |
| dioxyde de carbone .....                                                                                  | 1,16       | vapeur             | 20               |
| chloroforme .....                                                                                         | 27,14      | air                | 20               |
| alcool éthylique .....                                                                                    | 24,05      | air                | 0                |
|                                                                                                           | 22,75      | vapeur             | 20               |
| éther éthylique .....                                                                                     | 17,01      | vapeur             | 20               |
| glycérine .....                                                                                           | 63,4       | air                | 20               |
| eau <sup>(1)</sup> .....                                                                                  | 73,05      | air                | 18               |
| (1) Voir également la courbe A(T) pour l'eau dans le chapitre Tension superficielle-capillarité, page 77. |            |                    |                  |
| <i>Métaux liquides</i>                                                                                    |            |                    |                  |
|                                                                                                           | A (dyn/cm) | en contact avec... | Température (°C) |
| aluminium .....                                                                                           | 840        | air                | 700              |
| argent .....                                                                                              | 800        | air                | 970              |
| cuivre .....                                                                                              | 1 100      | hydrogène          | 1 130            |
| mercure .....                                                                                             | 487        | air                | 15               |
| or .....                                                                                                  | 580-1 000  | hydrogène          | 1 070            |
| plomb .....                                                                                               | 453        | hydrogène          | 350              |

## VIII. — COEFFICIENTS DE VISCOSITÉ

| <i>Liquides</i><br>(en centipoises, cp)                                                        |                             |                              |                   |                       |                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|
|                                                                                                | Température (°C)            | $\eta$                       |                   | Température (°C)      | $\eta$                                                      |
| acétone .....                                                                                  | — 80<br>0<br>30             | 1,49<br>0,4<br>0,3           | glycérine .....   | — 42<br>— 20<br>— 4,2 | $6,71 \cdot 10^6$<br>$1,34 \cdot 10^6$<br>$1,49 \cdot 10^4$ |
| benzène .....                                                                                  | 0<br>20<br>80               | 0,91<br>0,65<br>0,33         |                   | 0<br>20<br>30         | $12,1 \cdot 10^3$<br>$1,49 \cdot 10^3$<br>$0,63 \cdot 10^3$ |
| chloroforme....                                                                                | 0<br>20                     | 0,7<br>0,58                  | huile d'olive ... | 10<br>20<br>40        | 138<br>84<br>36                                             |
| alcool<br>éthylque ....                                                                        | — 90<br>0<br>20<br>70       | 28,4<br>1,77<br>1,2<br>0,5   | eau .....         | 10<br>20<br>30        | 1,308<br>1,002<br>0,801                                     |
| <i>Gaz</i><br>(en micropoise, $\mu p$ )                                                        |                             |                              |                   |                       |                                                             |
|                                                                                                | Température (°C)            | $\eta$                       |                   | Température (°C)      | $\eta$                                                      |
| air .....                                                                                      | 0<br>74<br>409<br><br>1 034 | 171<br>210<br>341<br><br>491 | hydrogène .....   | 0<br>130<br>713       | 83<br>109<br>198                                            |
|                                                                                                |                             |                              | azote .....       | 11<br>127             | 171<br>219                                                  |
| hélium .....                                                                                   | 0<br>20<br>100              | 186<br>194<br>228            | oxygène .....     | 0<br>128<br>608       | 189<br>257<br>437                                           |
| Pour les solides, nous n'indiquerons que le verre : à 575 °C, $\eta = 11 \cdot 10^{12}$ poises |                             |                              |                   |                       |                                                             |

