

Robert Bédoret

Thermodynamique fondamentale

Cours et problèmes résolus



ellipses

Table des matières

Chapitre 1 : Agitation thermique	17
I- Energies de nature microscopique	17
1- Points de vue local et global – Notion de domaine – Notations	17
2- Energies cinétiques macroscopique et d'agitation thermique	19
3- Interactions microscopiques – Propriétés générales	20
4- Energie potentielle interne d'un système – Energie interne	21
5- Extensivité de l'énergie interne	22
II- Température	23
1- Les interactions : Moteur de l'agitation thermique	23
2- Modélisation des répulsions entre molécules par des chocs élastiques	24
3- Equipartition de l'énergie thermique entre les degrés de liberté des constituants ..	25
a- Gaz monoatomique	25
b- Gaz diatomique	25
c- Solide	27
4- Définition cinétique de la température – Energie thermique	28
5- Gel quantique de certains degrés de liberté	29
6- Etablissement de l'équilibre thermique dans un fluide	30
III- Equation d'état – Viriel.....	31
1- Théorème du viriel – Clausius (1870)	31
2- Viriel intérieur	32
3- Viriel extérieur de pression – Equation d'état	33
4- Equation d'état d'un gaz parfait	33
IV- Coefficients thermo-élastiques d'un matériau	34
1- Capacités thermiques – Cas du gaz parfait	34
2- Compressibilité isotherme – Dilatation thermique – Cas des fluides	35
V- Solides	37
1- Elasticité – Loi de Hooke (1678)	37
2- Energie interne – Capacité thermique – Loi de Dulong et Petit (1819)	38
3- Dilatation thermique	40
VI- Agitation thermique et gravitation – Formation d'une étoile	42

1- Accrétion – Energie gravitationnelle de l'étoile	43
2- Durée de la phase d'accrétion de la nébuleuse	43
3- Equation d'état d'un gaz de particules en interaction gravitationnelle	44
4- Stabilité d'un nuage gazeux – Critère de Jeans (1902)	44
5- Formation d'un plasma	45
6- Allumage de l'étoile	46
VII- Problèmes	46
1- Fuite – Temps d'établissement d'un équilibre de pression	46
2- Elargissement des raies spectrales par effet Doppler	47
3- Refroidissement quasi-statique et adiabatique d'un gaz parfait	48
4- Origine du vent solaire	49
VIII- Solutions	50
Chapitre 2 : Bilans d'énergie dans la matière	55
I- Bilan d'énergie macroscopique	55
1- Bilan d'énergie cinétique macroscopique – Forces et travaux macroscopiques	55
2- Bilan d'énergie macroscopique	56
3- Illustrations dans le domaine du sport	57
a- Saut à la perche	57
b- Puissance développée par un cycliste	57
4- Travaux macroscopiques de pression	57
II- Premier principe	59
1- Echange et source – Cas de l'énergie macroscopique	59
2- Energie mécanique totale – Chaleur – Premier principe	59
3- Illustration : Freinage d'un véhicule	60
4- Bilan d'énergie interne	61
5- Illustration : Loi de Laplace (1780) – Suspensions pneumatiques	61
III- Changements de structure	62
1- Bilan thermique	62
2- Bilan d'enthalpie à pression fixe – Chaleur dégagée	63
3- Chaleur latente de transition de phase – Absorption thermique.....	64
4- Chaleur de réaction – Pouvoir calorifique d'une combustion	65
5- Bilan d'énergie d'une réaction nucléaire – Energie libérée	67

IV- Bilans d'énergie d'un fluide en écoulement	69
1- Bilan d'énergie macroscopique dans un système ouvert	69
2- Illustrations	70
a- Equation de Bernoulli (1877) – Effet de portance	70
b- Puissance de traînée aérodynamique	71
3- Bilan d'énergie totale	72
4- Illustration : Turbine à gaz	73
V- Quelques machines thermiques	74
1- Moteur 4 temps à essence – Cycle de Beau de Rochas (1862)	74
2- La machine thermique humaine	77
3- Refroidissement par absorption – Linde (1876)	78
VI- Problèmes	80
1- Impact de comète – Extinction des dinosaures	80
2- Puissance d'une éolienne	81
3- Propagation du son dans l'air – Niveau sonore	82
4- Détente d'un gaz dans une tuyère – Relation d'Hugoniot (1880)	83
5- Onde de choc dans l'air – Mach (1876)	85
6- Moteur à air chaud – Stirling (1816).....	86
7- Cyclone tropical	88
VII- Solutions	90
Chapitre 3 : Energie électromagnétique	99
I- Bilan d'énergie électromagnétique	99
1- Rayonnement et source d'énergie électromagnétique – Maxwell (1864)	99
2- Puissance électrique de conduction	102
3- Puissance rayonnée dans l'ARQS – Bilan d'un circuit électrique fixe	103
4- Stockage d'énergie électrique dans un condensateur	104
5- Stockage d'énergie magnétique dans une bobine	105
II- Conversions électrothermiques – Extension du premier principe	107
1- Chauffage électrothermique	107
a- Production thermique	107
b- Chauffage par effet Joule (1840)	108
2- Premier principe en présence d'un champ électromagnétique	108

3-	Echanges thermiques par rayonnement	109
a-	Rayonnement thermique – Chauffage radiatif	109
b-	Loi de Kirchhoff (1859) – Coefficient d'échange	109
III-	Conversions électromécaniques	111
1-	Puissance d'entraînement de Laplace	111
2-	Puissance électrique d'induction – Conversions électromécaniques	112
3-	Bilan électromécanique d'un conducteur mobile – Rendement des conversions	113
IV-	Problèmes	115
1-	Bilan d'énergie électromagnétique d'un condensateur dans l'ARQS	115
2-	Transformateur – Gaulard (1883)	116
3-	Chauffe-eau électrique	117
4-	Chauffage par induction – Foucault (1851)	118
5-	Chauffage laser	120
6-	Chauffage micro-ondes	121
7-	Bilan thermique de la Terre – Potentiel solaire – Effet de serre	123
8-	Moteur électrique à courant continu – Faraday (1821)	125
9-	Alternateur – Faraday (1831)	126
V-	Solutions	127
Chapitre 4 : Distributions statistiques d'équilibre		139
I-	Etude statistique d'un système	139
1-	Position du problème – Etat micro – Etat macro	139
2-	Observation statistique – Distribution de probabilités	140
3-	Entropie – Occurrence d'une distribution	141
II-	Distribution d'équilibre	142
1-	L'équilibre : Révélateur de la distribution la plus probable	142
2-	Cas d'un système isolé – Distribution microcanonique	143
III-	Système en équilibre thermique	144
1-	Distribution canonique – Boltzmann (1872)	144
2-	Probabilité d'une variable énergétiquement découplée	145
3-	Equipartition de l'énergie dans ses contributions quadratiques – Température	146
4-	Condition d'équilibre thermique	147
IV-	Eléments de cinétique des gaz	148

1- Distribution des vitesses dans un gaz – Maxwell (1866)	148
2- Illustration : Raréfaction d'une atmosphère	150
V- Système en équilibre thermique et chimique	151
1- Distribution grand-canonique	151
2- Potentiel chimique : Energie d'incorporation	152
3- Condition d'équilibre chimique	153
4- Illustration : Adsorption – Langmuir (1916)	154
VI- Système en équilibre thermique, chimique et mécanique de pression	155
1- Distribution associée	155
2- Lien entre le paramètre η et la pression	156
VII- Gaz de particules quantiques	157
1- Fermions – Distribution de Fermi-Dirac	158
2- Bosons – Distribution de Bose-Einstein	158
3- Approximation quasi-classique	159
4- Gaz parfait dans l'approximation quasi-classique.....	159
a- Modes de propagation d'un atome dans une boîte	159
b- Potentiel chimique d'un gaz parfait monoatomique	161
VIII- Problèmes	163
1- Elasticité d'une fibre polymère	163
2- Cinétique chimique commandée par l'agitation thermique	164
3- Modèle d'équilibre solide-vapeur	165
4- Fixation du dioxygène par l'hémoglobine	166
IX- Solutions	167
Chapitre 5 : Evolution vers l'équilibre - Entropie	173
I- Entropie - Interprétations	174
1- Entropie statistique – Occurrence d'une distribution	174
2- Entropie et information – Shannon (1948)	174
II- Entropie et évolution – Second principe – Irréversibilité	175
1- Second principe	175
2- Evolution quasi-statique – Evolution réversible	176
3- Réversibilité microscopique	176
4- Le second principe et l'irréversibilité émergent de la vision macroscopique	177

III- Evolutions réversibles – Relations de Gibbs	178
1- Variations ordonnée et désordonnée d'une variable extensive	178
2- Relation de Gibbs (1873)	179
3- Transfert thermique non lié au transfert de matière	180
4- Relations de Gibbs-Duhem (1886).....	181
IV- Application au gaz parfait	181
1- Entropie d'un gaz parfait monoatomique	181
2- Mélange idéal de gaz parfaits – Dalton (1801)	182
V- Transferts et dissipations	183
1- Echange et production d'entropie	183
2- Taux volumique de production d'entropie	184
VI- Réponses linéaires aux irréversibilités – Transports associés	186
1- Réponses linéaires du milieu aux forces thermodynamiques – Onsager (1931) ..	186
2- Diffusion – Loi de Fick (1856)	187
3- Conduction électrique – Loi d'Ohm (1827)	187
4- Conduction thermique – Loi de Fourier (1866)	188
VII- Réactions chimiques	188
1- Evolution vers l'équilibre – Loi d'action de masse	188
2- Illustration : Acidité des solutions aqueuses	190
VIII- Performance maximale d'une machine thermique – Carnot (1824)	191
1- Moteur thermique	192
2- Réfrigérateur	192
3- Pompe à chaleur	193
IX- Problèmes	193
1- Equilibre osmotique	193
2- Approche entropique de la viscosité – Loi de Maxwell (1860)	195
X- Solutions	196
Chapitre 6 : Transports de matière et d'énergie	199
I- Une approche microscopique de la diffusion de particules	199
1- Probabilité de non collision – Temps de relaxation et temps de vol	199
2- Temps de vol et libre parcours moyen dans le modèle des sphères dures	200
3- Modèle microscopique de diffusion	201

4- Loi d'extension de la diffusion – Smoluchowski (1905)	203
II- Dérive de particules d'un milieu soumis à un champ de force	204
1- Modèle de Drude (1900)	204
2- Illustration : Mécanismes d'équilibre de la troposphère	205
III- Mouvement Brownien – Brown (1827)	207
1- Force de résistance à l'avancement	207
2- Loi d'extension du mouvement brownien – Langevin (1908)	209
IV- Conduction thermique	211
1- Modèle microscopique	211
2- Equation de la chaleur – Loi d'uniformisation de la température	213
V- Viscosité	214
1- Modèle microscopique – Maxwell	214
2- Illustration : Perte de charge – Loi de Poiseuille (1844)	216
3- Equation de Navier-Stokes (1845) – Nombre de Reynolds (1883)	217
VI- Convection thermique	219
1- Rouleaux de convection – Instabilité de Raleigh-Bénard (1900)	219
2- Echanges thermiques associés aux rouleaux – Loi de Newton (1701)	222
VII- Problèmes	224
1- Oxydation des métaux	224
2- Formation d'une couche de glace – Problème de Stefan (1891)	225
3- Température de contact – Sensation de chaud et froid	226
4- Isolation thermique par double vitrage	227
5- Entretien thermique interne de la Terre – La lithosphère	228
6- Refroidissement par air d'un moteur thermique	229
7- Propagation d'un front de flamme	231
VIII- Solutions	234
Chapitre 7 : Transports électriques	243
I- Conduction électrique et thermique dans les métaux	243
1- Loi d'Ohm (1827) – Modèle de Drude (1900)	243
2- Conduction thermique des métaux – Loi de Wiedemann-Franz (1853)	246
II- Conducteur soumis à un champ électromagnétique	247
1- Vitesse de dérive des charges	247

2- Magnétorésistance – Kelvin (1857) - Fert-Grunberg (1988)	248
3- Effet Hall (1879)	249
III- Couplages thermoélectriques	250
1- Expressions générales des courants thermique et électrique	250
2- Circuit ouvert – Effet Seebeck (1821)	251
3- Thermocouple – Thermopile	252
4- Chauffage et refroidissement par effet Peltier (1834)	253
IV- Electrochimie – Stockage de l'électricité	255
1- Cellule électrochimique – Production d'entropie – Fem	255
2- Sens d'évolution – Divers modes de fonctionnements	256
a- Pile-Volta (1800)	256
b- Electrolyse – Nicholson-Carlisle (1800)	257
c- Accumulateur	257
d- Pile à combustible – Schönbein-Grove (1839)	258
V- Semiconducteurs	259
1- Semiconducteurs intrinsèques et dopés – Notion de trou	259
2- Jonction <i>PN</i> non polarisée	260
3- Jonction <i>PN</i> polarisée	261
4- Recombinaison et génération des porteurs	262
5- Jonction <i>PN</i> idéale – Diode – Loi de Shockley (1948)	263
6- Transistor bipolaire – Bardeen-Brattain-Schockley (1948)	265
7- Photodiode – Photocourant – Cellule photovoltaïque	266
Chapitre 8 : Fluides – Modèle de Van der Waals	271
I- Les interactions répulsives	271
1- Répulsion de Pauli (1925)	271
2- Modèle des sphères dures – Covolume	272
II- Les interactions attractives	273
1- Moment dipolaire des atomes et molécules	273
a- Moment dipolaire permanent d'une molécule	273
b- Moment dipolaire induit d'un atome – Modèle de l'atome élastiquement lié	274
2- Interactions dipôle - dipôle de Van der Waals	275
III- Phénomènes interfaciaux	277

1- Energie d'adhésion de deux matériaux – Hamaker (1937)	277
2- Energie potentielle interfaciale	279
3- Mouillage – Relation d'Young-Dupré (1805)	280
4- Tension superficielle	282
5- Gouttes et bulles – Loi de Laplace (1806)	283
6- Capillarité – Loi de Jurin (1718)	285
IV- Energie interne d'un fluide	286
1- Estimation de l'énergie potentielle de cohésion d'un fluide	286
2- Energie interne – Refroidissement par détente de Joule (1845).....	287
V- Equation d'état d'un fluide dilué	289
1- Viriel des interactions	289
2- Equation d'état d'un fluide dilué – Van-der Waals (1873)	291
VI- Approche de la transition gaz-liquide par le modèle de Van der Waals	292
1- Compression du gaz – Isothermes – Andrews (1863)	292
2- Interprétation microscopique d'une isotherme	293
3- Chaleur latente	295
4- Température critique – Phase fluide supercritique	296
VII- Etude entropique de la transition gaz-liquide	296
1- Conditions de vaporisation et de liquéfaction – Equilibre liquide-vapeur	296
2- Vapeur saturante – Humidité relative	298
3- Relation de Clapeyron (1834)	299
VIII- Problèmes	301
1- Interaction entre dipôles permanents – Keesom (1921)	301
2- Interaction entre dipôle permanent et dipôle induit – Debye (1920).....	302
3- Interaction entre dipôle instantané et dipôle induit – London (1930)	303
4- Détente de Joule-Thomson (1852) – Température d'inversion	305
5- Stabilité d'une goutte – Nucléation homogène – Kelvin (1871)	306
IX- Solutions	307
Chapitre 9 : Comportements quantiques collectifs	315
I- Ferromagnétisme	315
1- Interaction d'échange – Heisenberg (1926)	315
2- Aimantation de spin – Modèle du champ moyen – Weiss (1907).....	316

3- Aimantation spontanée – Aimantation induite – Perméabilité relative	317
II- Excitation thermique des porteurs de charge d'un solide	319
1- Bandes d'énergie – Conducteur – Isolant – Semiconducteur	319
2- Caractéristiques d'un trou	320
3- Modes de propagation d'un électron de la bande de conduction	321
4- Densité volumique des électrons dans BC	322
5- Densité volumique des trous dans BV	323
6- Classification des différents conducteurs suivant le potentiel chimique	324
7- Jonction PN à l'équilibre – Potentiel de diffusion	324
III- Quantification de l'énergie lumineuse – Le photon	326
1- Décomposition du champ électromagnétique d'une cavité en ondes planes	326
2- Quantification de l'énergie lumineuse – Le photon	328
3- Energie électromagnétique du vide – Effet Casimir (1948)	330
4- Processus d'émission d'un photon – Einstein (1917)	334
5- Principe du laser – Kastler (1950) - Townes-Prokhorov (1958)	336
IV- Rayonnement thermique du corps noir	337
1- Corps noir – Excitation thermique des photons – Planck (1900)	337
2- Spectre du rayonnement – Loi de déplacement de Wien (1880)	338
3- Puissance rayonnée par un corps noir – Loi de Stefan (1879)	340
V- Excitation thermique des vibrations d'un solide	341
1- Propagation du son dans une chaîne d'atomes	341
2- Quantification du son dans une chaîne d'atomes – Phonons	343
3- Généralisation à 3 dimensions – Modèle de Debye (1912)	344
VI- Condensats de Bose-Einstein	347
1- Condensation de Bose-Einstein	347
2- Gaz de bosons – Température de condensation – Einstein (1925)	348
3- Superfluidité de l'hélium 4 – Kapitsa-Allen-Misener (1937)	350
4- Supraconductivité – Onnes (1911)	351
Bibliographie	353
Index	355

Thermodynamique fondamentale

Cet ouvrage s'intéresse aux aspects fondamentaux de la thermodynamique, dans un esprit visant à chasser les lourdeurs de forme. Il s'adresse aux étudiants du L1 au M2 et aux élèves des classes préparatoires scientifiques désireux de synthétiser et d'approfondir leurs connaissances. Des problèmes, à haute valeur d'enseignement, accompagnés de leurs solutions détaillées clôturent la plupart des chapitres. La thermodynamique statistique, qui formalise le passage du microscopique au macroscopique, est exposée en s'appuyant sur des concepts abordables et porteurs. Les comportements quantiques collectifs, la physique des semiconducteurs, le modèle fluide de Van der Waals, l'approche entropique des phénomènes de transport, les principales conversions d'énergie y compris d'énergie électromagnétique sont autant de sujets qui destinent particulièrement ce livre aux étudiants de master ainsi qu'aux candidats au capes et à l'agrégation.

Robert Bédoret est ingénieur et agrégé de chaire supérieure en physique. Il enseigne en classe préparatoire scientifique au lycée Montaigne de Bordeaux.

