

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- Magnéto-résistance – 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