



UNIVERSITÉS
PHYSIQUE

U
N
I
V
E
R
S
I
T
É
S

Théorie cinétique Gaz et plasmas

*Résumé de cours
problèmes corrigés*

Bruno CHÉRON



2-533-4-1

UNIVERSITÉS

PHYSIQUE



Théorie cinétique Gaz et plasmas

*Résumé de cours,
problèmes corrigés*

Bruno CHÉRON

Professeur à l'Université de Rouen



Table des matières

I	Résumé de cours	9
1	Dynamique des collisions binaires	11
1.1	Forces et interactions particulières	11
1.2	Approche classique de la collision élastique	14
2	Distribution des vitesses à l'équilibre	19
2.1	Densité de probabilité	19
2.2	Corrélations entre particules	20
2.3	Distribution de Maxwell-Boltzmann	21
2.4	Distribution de l'énergie cinétique	26
2.5	Vitesses et énergie cinétique moyennes	27
2.5.1	Valeur moyenne et écart type	28
2.5.2	Module de la vitesse	28
2.5.3	Température cinétique du gaz	29
2.5.4	Equipartition de l'énergie	29
3	Flux et densité de flux à l'équilibre	31
3.1	Notion de bilan et de flux	31
3.2	Flux de particules	32
3.3	Pression exercée par un gaz sur une paroi	34
3.4	Flux et densité de flux de quantité de mouvement	36
3.4	Flux et densité de flux d'énergie cinétique	39
4	Validité du modèle du gaz parfait	41
4.1	Sections efficaces de collision élastique	41

4.1.1	Choc élastique entre sphères rigides	41
4.1.2	Choc entre particules : approche moyenne	42
4.1.3	Choc entre particules : approche détaillée	42
4.2	Temps de collision et fréquence de collision	43
4.2.1	Durée moyenne d'une collision	44
4.2.2	Fréquence de collision	44
4.3	Libre parcours moyen	47
5	Equilibre thermodynamique local	49
5.1	Diffusion moléculaire	49
5.2	Conductivité thermique	55
5.3	Viscosité dynamique	57
6	Modèle du plasma cinétique	61
6.1	Qu'est-ce qu'un plasma?	61
6.2	Caractéristiques générales des plasmas	62
6.2.1	Degré d'ionisation	62
6.2.2	Ecarts à la neutralité	63
	Longueur de Debye	63
	Fréquence plasma	64
6.2.3	Températures cinétiques	65
6.2.4	Températures d'excitation collisionnelle	67
	Excitation électronique	67
	Vibration	69
	Rotation	69
6.2.5	Température d'ionisation	70
6.2.6	Température de rayonnement	72
	Transitions lié-lié	72
	Transitions lié-libre	73
	Transitions libre-libre	74
6.2.7	Fréquence de collision élastique des électrons	74
6.3	Modèle du plasma cinétique	75
6.3.1	Longueurs caractéristiques	75

6.3.2 Equations d'état d'un plasma cinétique	77
--	----

II Problèmes corrigés 79

1 - Modèle maxwellien de l'effet thermo-ionique	81
2 - Piège à azote liquide	83
3 - Distribution des libres parcours moléculaires	84
4 - Manomètre à viscosité	85
5 - Bruine et pluie d'orage	88
6 - Perte de charge en régime moléculaire	90
7 - Pression de vapeur saturante d'un métal	92
8 - Séparation isotopique par diffusion	94
9 - Stabilité d'une atmosphère planétaire	97
10 - Interprétation cinétique de l'enthalpie	101
11 - Poussée d'un turbo-réacteur	104
12 - Distribution des vitesses simplifiée	107
13 - Faisceau atomique dévié par la pesanteur	110
14 - Explosion d'une baudruche	113
15 - Modélisation de la conduction électrique	116
16 - Elargissement Doppler de raies atomiques	118
17 - Etude d'un radiomètre	120
18 - Régime moléculaire et régime continu	125
19 - Equation des isentropiques d'un gaz parfait	129
20 - Propagation d'ondes acoustiques	132
21 - Onde de choc droite	135
22 - Interprétation cinétique de la viscosité	139
23 - Equation d'état des gaz réels	143
24 - Maxwellienne perturbée par un laser	147
25 - Longueur de Debye	152
26 - Sonde de Langmuir	156
27 - Dissociation de l'oxygène en phase plasma	162
28 - Amorçage d'une décharge électrique	167
29 - Accomodation et recombinaison de l'azote	171

30 - Diffusion simple et diffusion ambipolaire	174
31 - Modélisation du voisinage d'une cathode	180
32 - Recombinaison catalytique de l'oxygène	186
33 - Plasma d'argon créé par onde de choc	194
34 - Elargissement collisionnel de raies spectrales	201

III Annexes 207

A.1 Intégrales très utilisées en théorie cinétique	209
A.2 Constantes physiques fondamentales	210
A.3 Démonstration de Maxwell	211
1. Répartition uniforme dans l'espace	211
2. Indépendance des composantes de la vitesse	211
3. Isotropie du champ des vitesses	211
A.4 Démonstration de Boltzmann	213
1. Equation de Boltzmann	213
2. Ecriture du terme collisionnel	215
3. Distribution d'équilibre	216
A.5 Bibliographie	218

Index 221
--

Le spectacle de la matière à l'échelle microscopique décourage le déterminisme. Comprendre comment les modèles probabilistes élaborés par Maxwell et Boltzmann à partir des lois du hasard permettent de prédire l'état et l'évolution des systèmes physiques à l'échelle macroscopique, tel est l'objectif de cet ouvrage destiné aux élèves des classes préparatoires et des écoles d'ingénieurs, aux étudiants de premier et de deuxième cycle universitaire, et aux enseignants de physique et de mécanique.

La première partie de ce livre présente les concepts fondamentaux de la théorie cinétique : état d'équilibre, fonctions de distribution de la vitesse et de l'énergie, grandeurs moyennes, écarts type, flux et densités de flux et coefficients de transport. Ces notions sont appliquées en phase gazeuse, puis étendues à des milieux dont le passage du monde de la recherche à celui de l'industrie est aujourd'hui accompli : les plasmas cinétiques.

La seconde partie propose 34 problèmes et leurs corrigés, présentés dans un ordre directement inspiré de celui du résumé de cours. Le lecteur accède ainsi à une grande variété de situations physiques couvrant une large gamme de pression et de température. Cette richesse révèle l'appartenance de l'auteur à un laboratoire du CNRS (le CORIA, Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie) qui nourrit ses compétences de l'apport réciproque de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée.

Bruno Chéron, docteur ès Sciences, est professeur à l'Université de Rouen où il enseigne la thermodynamique, les transferts thermiques et la physique des plasmas. Il est également chargé de cours de transferts thermiques et de physique des lasers à l'école supérieure en génie électrique (ESIGELEC). Il a enseigné la conduction et la convection thermiques à l'INSA de Rouen de 1987 à 1994. Ses travaux de recherche sont consacrés à l'étude expérimentale de plasmas supersoniques basse pression en situations de jet libre et de couche limite, à la caractérisation des sources et de jets de plasmas et à la valorisation de déchets par plasmas atmosphériques.

Illustration de couverture : Claude Monet,
La Meule, effet de neige, le matin (1891).



ISBN 2-7298-0599-0