

TABLE DES MATIÈRES

ERRATUMS.....	xx
CHAPITRE 1. — Propriétés générales des plasmas et processus élémentaires	1
<i>I. — Description élémentaire.</i>	
1. Grandeurs fondamentales	2
Densité des constituants - Distance moyenne entre les particules - Masse et charge des particules - Condition de quasi-neutralité - Degré d'ionisation - Libres parcours moyens et fréquences de collision - Températures cinétiques - Fréquences cyclotroniques et rayons de giration - Fréquence propre du plasma - Longueur de Debye - Longueur de Landau - Dimensions macroscopiques.	
2. Types d'interactions dans les plasmas	7
3. Description macroscopique des plasmas : fonctions de distribution	8
Définition du libre parcours moyen (l. p. m.)	
4. Notions sur les collisions et les sections efficaces.....	12
Notion de section efficace de choc-Sections efficaces macroscopiques et l. p. m.	
5.1. Mobilité des ions	16
5.2. Vitesse de dérive des électrons	18
6.1. Diffusion des ions	19
6.2. Diffusion des électrons.....	20
6.3. Diffusion des porteurs dans un champ électrique et diffusion ambipolaire	20
6.4. Diffusion des électrons dans un champ électrique	21
6.5. Diffusion dans un champ magnétique.....	21
7. Répulsion mutuelle : effets de charge d'espace.....	22
<i>II. — Processus fondamentaux.</i>	
A) Généralités	23
Phénomènes d'ionisation, d'attachement, de recombinaison - Collisions superélastiques - Transfert de charges.	
B) Etude détaillée des divers processus élémentaires.....	25
1. Collisions élastiques	25
Distribution angulaire - Sections efficaces totales - Transfert d'impulsion - Collisions aux hautes énergies : électrons « emballés » - Scattering des ions.	

2. Phénomènes d'excitation	29
Excitation par électrons - Excitation par ions et atomes - Photoexcitation - Excitation thermique.	
3. Phénomènes d'ionisation	31
Ionisation par électrons - Coefficient de Townsend et formules diverses - Ionisation par ions - Ionisation par atomes neutres rapides - Excitation multiple et auto-ionisation - Ionisation multiple - Ionisation d'atomes excités - Ionisation et excitation thermiques - Ionisation par ondes de choc - Collisions superélastiques ou de seconde espèce - Transfert de charges - Photoionisation.	
4. Phénomènes d'attachement : formation d'ions négatifs	40
5. Phénomènes de recombinaison	40
Recombinaison ion-ion - Recombinaison entre ions et électrons.	
6. Emission de particules par les solides et effets de parois	43
Emission photo-électrique - Emission thermoionique - Emission de Schottky - Emission de champ - Réactions de parois mettant en jeu des ions positifs - Réactions de parois des atomes normaux et métastables.	
III. — <i>Formation et désintégration d'un plasma.</i>	
1. Formation d'un plasma et décharges haute-fréquence	46
Paramètres caractérisant la décharge - Différents types de décharge - Mécanismes des pertes d'électrons en présence de l'ionisation - Condition de décharge - Coefficient d'ionisation haute-fréquence.	
2. Désintégration d'un plasma	54
IV. — <i>Plasmas à haute température et fusion thermonucléaire.</i>	
1. Processus physiques dans un plasma chaud	55
Processus corpusculaires, binaires et multiples.	
2. Ionisation	56
3. Chocs coulombiens	57
Particules identiques - Chocs électrons-ions.	
4. Rayonnement de freinage et rayonnement d'excitation	62
Rayonnement de freinage électron-ion - Rayonnement de freinage électron-électron - Rayonnement d'excitation.	
5. Transfert de charges	64
6. Réactions nucléaires	65
7. Effet de striction (pinch effect)	67
V. — <i>Aperçu sur les processus collectifs.</i>	
CHAPITRE 2. — Principes de Mécanique statistique	71
A. <i>Etat d'équilibre.</i>	
1. Définitions et résultats fondamentaux	71
2. Théorème de Liouville. Evolution dans le temps et ensemble d'équilibre	74
3. Ensembles uniforme, microcanonique et canonique	76

4. Remarques sur les fondements de la méthode statistique	78
Equilibre - Systèmes hors d'équilibre.	
5. Distribution d'équilibre et équation d'état	82
6. Développement de l'équation d'état en puissances de la densité	86
7. Méthode de Bogolioubov	93
B. <i>Systèmes évolutifs ou hors d'équilibre.</i>	
1. Etablissement des équations B. B. G. K. Y.	98
2. Aperçu sur le passage des équations B. B. G. K. Y. à l'équation de Boltzmann	101
Méthode de Bogolioubov	106
Evolution temporelle de P_N et des F_s d'après Bogolioubov. Etape initiale - Etape cinétique - Etape hydrodynamique.	109
C. <i>Applications des principes généraux à la physique des plasmas.</i>	
1. Plasmas en équilibre (applications)	115
2. Equations cinétiques et phénomènes évolutifs (applications)	133
CHAPITRE 3. — Dynamique classique des collisions binaires	139
1. Introduction	139
2. Définitions (repères)	140
3. Equations de conservation	143
4. Etude de la trajectoire et calcul de la déviation	145
5. Retour au système (L)	149
Relations angulaires - Pertes d'énergie relative - Bilan énergétique pour des chocs inélastiques.	
6. Définition des sections efficaces de collisions élastiques	156
Section efficace différentielle - Effet du changement du système d'axes - Section efficace totale et sections efficaces de transfert.	
7. Lois de force et calcul des sections efficaces	159
8. Forces intermoléculaires	166
Sphère rigide parfaitement élastique - Centres ponctuels répulsifs - Potentiel en puits carré - Potentiel de Sutherland - Potentiel du type de Lennard-Jones.	
CHAPITRE 4. — Mouvement des particules chargées dans les champs électriques et magnétiques. Mouvement aléatoire des porteurs de charge	169
I. — <i>Mouvement individuel d'une particule chargée.</i>	
1. Equations générales du mouvement	170
2. Analyse de cas particuliers	171
A. Cas du champ électrique seul	171
$B = 0$, E quelconque - $B = 0$, $E = -\nabla_r U$; $U(r)$ admet une symétrie cylindrique - $B = 0$, $E = E_0 \exp(i\omega t)$.	
B. Cas d'un champ magnétique constant et homogène	179
$E = 0$, $B = C^{te}$ - $E = C^{te}$ et $B = C^{te}$: orbites dans un champ électrique et magnétique homogènes et superposés - $E = E_0 \exp(i\omega t)$ et $B = C^{te}$; orbites dans un	

champ magnétique uniforme et dans un champ électrique alternatif - Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique homogène, en présence d'une force F de nature quelconque.	
C. Cas des champs magnétiques inhomogènes ou variables dans le temps	195
Moment magnétique orbital - Mouvement dans un champ magnétique homogène, mais variable dans le temps - Champs magnétiques inhomogènes dans l'espace - Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique inhomogène - Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique à symétrie cylindrique - Optique ondulatoire des particules chargées.	
II. — <i>Mouvement aléatoire de particules chargées dans un champ électromagnétique.</i>	
1. Mouvement brownien - Aperçu général	231
2. Mouvement brownien d'une particule chargée	235
3. Relations énergétiques	238
Collisions élastiques	
4. Diffusion et marche aléatoire	240
CHAPITRE 5. — Équation intégral-différentielle de Boltzmann. Propriétés fondamentales. Équations de transport de Maxwell	
1. L'équation intégral-différentielle de Boltzmann	242
2. Définition des fonctions de distribution en théorie cinétique des gaz	242
3. Flux attachés aux propriétés moléculaires	245
Théorie générale - Applications (Transfert de masse, d'impulsion, d'énergie cinétique ; température cinétique) .	
4. Mélanges de gaz	251
5. Etablissement de l'équation de Boltzmann	254
Equation de Boltzmann en termes des sections efficaces.	
6. Effet d'un champ magnétique sur l'équation de Boltzmann ..	260
7. Equations de transport de Maxwell	261
8. Expression particulière du terme collisionnel	264
9. Invariants collisionnels	266
CHAPITRE 6. — Relations macroscopiques. Équations de la dynamique et de l'hydrodynamique des plasmas	
1. Fluide neutre à un seul constituant. Equations de l'hydrodynamique	270
2. Fluide neutre à plusieurs constituants	276
3. Gaz ionisé à plusieurs constituants	280
Equations relatives à un seul constituant - Equations globales du gaz ionisé.	
4. Cas particuliers des équations générales des plasmas	289
Gaz complètement ionisé - Mélange ternaire.	

5. Solutions stationnaires des équations générales des plasmas. .	298
Equations de la magnétohydrostatique.	
Gaz complètement ionisés - Mélange ternaire.	
6. Magnétohydrodynamique des plasmas. Applications diverses.	303
Equations générales - Applications à la magnétohydrostatique. Confinement - Coefficients de conductivité et de diffusion en présence d'un champ magnétique.	
7. Linéarisation des équations générales et propagation des ondes	316
CHAPITRE 7. — Théorème H. Propriétés de l'état maxwellien des plasmas. Libre parcours moyen. Application aux phénomènes de transport	
I. — <i>Théorème H.</i>	
1. Introduction	326
2. Théorème H de Boltzmann : solutions d'équilibre	327
3. Propriétés de l'état maxwellien	330
4. Etat stationnaire d'un gaz dans un récipient à parois réfléchissantes	332
5. Etat stationnaire d'un gaz en présence d'une force extérieure	334
6. Théorème H pour un mélange de gaz	338
II. — <i>Théorie cinétique du libre parcours moyen.</i>	
7. Calcul du nombre total de collisions N_{12}	339
8. Définition de la fréquence de collision et libre parcours moyen selon Maxwell	342
9. Libre parcours et fréquence de collision d'une particule de vitesse donnée	344
10. Probabilité d'observer un libre parcours de longueur donnée	347
11. Libre parcours moyen de Tait	348
12. Persistance des vitesses après le choc	349
13. Le rapport de persistance moyen	350
III. — <i>Phénomènes de transport dans les plasmas.</i>	
14. Flux des propriétés moléculaires	351
Description macroscopique des phénomènes de transport (viscosité, conduction thermique, diffusion) - Analyse cinétique des phénomènes de transport - Théorie élémentaire.	
15. Coefficients de transport	357
16. Corrections apportées à la théorie élémentaire du l.p.m.	360
Effet de la distribution des vitesses - Effet de la persistance des vitesses - Comparaison avec l'expérience - Conclusions.	
17. Théorie, fondée sur le l.p.m., de la conduction thermique et de la diffusion au sein d'un plasma, en présence d'un champ magnétique	366

18. Cas où la force F est produite par un champ électrique E ...	370
19. Effet Leduc-Righi et effet Nernst	371
20. Conductivité en présence d'un champ alternatif.....	372
21. Retour à la théorie du mouvement moyen de l'électron dans un magnétoplasma.....	381
CHAPITRE 8. — Méthodes générales pour la résolution approchée de l'équation intégral-différentielle de Boltzmann.....	
1. Introduction et aperçu historique	385
2. Idées directrices du plan de ce chapitre.....	389
Propriétés des intégrales de collision des équations de Maxwell - Propriétés des opérateurs linéarisés $L(\Phi)$ et $K_{ij}(\Phi_i)$. Méthode de Grad.	
3. Equation de Boltzmann et équations des moments de la fonction de distribution	398
4. Méthode générale d'itération (Maxwell, Ikenberry et Truesdell)	404
5. Méthode de Grad	412
Cas des particules maxwelliennes - Cas général (loi d'interaction quelconque) - Principes généraux - Approximation du troisième ordre.	
6. Solutions normales de Hilbert, Enskog et Chapman	427
Méthode de Hilbert - Passage à la méthode d'Enskog - Méthode d'Enskog-Chapman - Calcul de $f^{(1)}$. Calcul de $f^{(2)}$ (approximation d'ordre deux : généralités et ordres de grandeur - équation intégrale - la deuxième approximation du flux thermique et du tenseur de pression - calcul des termes de $q^{(2)}$ - calcul des termes de $p^{(2)}$).	
Etude comparative du schéma d'itération (Maxwell - Truesdell) et de la méthode des solutions « normales » (Enskog - Chapman).	
7. Méthode de linéarisation de l'équation de Boltzmann.....	476
Linéarisation autour de $f^{(0)}$, fonctions propres de l'opérateur $L(\Phi)$, résolution de l'équation linéarisée par un développement en fonctions propres de l'opérateur $L(\Phi)$, processus de transport et relaxations, cas particulier des molécules maxwelliennes, retour au cas général, linéarisation autour d'une fonction localement maxwellienne $f_m^{(0)}$.	
8. Equations voisines de l'équation de Boltzmann.....	494
Gaz très raréfiés (équation de Vlasov, équation de Boltzmann modifiée).	
9. Méthode de résolution de l'équation de Boltzmann linéarisée vérifiée par un plasma lorentzien.....	498
Généralités - Analyse de la distribution électronique f_e dans les plasmas lorentziens - Développement de la distribution électronique f_e sous forme tensorielle (irréductible) - Equations générales du premier ordre - Solutions d'un système pour un champ électrique faible - Remarques sur la forme tensorielle générale de l'équation de Boltzmann - Etude de la distribution ionique f_i dans le cas des champs électriques forts.	

APPENDICE I. — Notations dyadiques et tensorielles utilisées dans ce livre	521
1. Vecteur gradient	521
2. Dyades et tenseurs	522
3. Produits de vecteurs	524
4. Théorèmes sur les dyades	525
5. Opérateurs différentiels dyadiques	526
6. Formules intégrales	527
7. Notations en théorie cinétique des gaz	529
APPENDICE II. — Fonctions sphériques	533
1. Note sur les fonctions sphériques	533
2. Polynômes d'Hermite et polynômes de Laguerre-Sonine....	542
3. Polynômes de Sonine $T_m^{(n)}(x)$ et $S_m^{(n)}(x)$	545
4. Polynômes tensoriels d'Hermite	546
5. Calcul de certaines intégrales utiles	551
6. Applications à la théorie cinétique des gaz. Relations entre tenseurs sphériques et tenseurs d'Hermite et comparaison des divers développements de la fonction de distribution..	554
7. Calcul des premiers moments des fonctions de distribution..	559
APPENDICE III. — Calcul de diverses intégrales déduites de l'intégrale de collision	564
(Cas d'une seule espèce de particules).	
1. Calcul des termes en $\mathcal{C}(V_n)$	564
1.1. Calcul de $\mathcal{C}(V^2)$ et $\mathcal{C}(V^3)$ pour des particules maxwelliennes	566
2. Calcul des intégrales $\mathcal{C}(Y_{2r1v})$	569
3. Cas d'une loi de force quelconque. Méthode de Grad	577
APPENDICE IV.	584
1. Propriétés des intégrales de collision. Invariants collisionnels	584
2. Opérateur linéaire $I(\Phi)$	587
3. Fonctions propres de L_M et de K_M pour la loi en $1/r^6$	593
4. Cas d'une loi d'interaction quelconque. Intégrales $\Omega^{(n)}(\rho)$...	602
BIBLIOGRAPHIE	607
INDEX DES NOTATIONS	611
INDEX ALPHABÉTIQUE.....	617