

## TABLE DES MATIÈRES

ERRATUMS.....	xx
CHAPITRE 1. — Propriétés générales des plasmas et processus élémentaires .....	1
I. — Description élémentaire.	
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
II. — Processus fondamentaux.	
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. — <b>Principes de Mécanique statistique</b> . . . . .	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. — <b>Dynamique classique des collisions binaires.</b> . . . .	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. — <b>Mouvement des particules chargées dans les champs électriques et magnétiques. Mouvement aléatoire des porteurs de charge</b> . . . . .	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.	
<b>II. — Mouvement aléatoire de particules chargées dans un champ électromagnétique.</b>	
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
<b>CHAPITRE 5. — Équation intégral-différentielle de Boltzmann. Propriétés fondamentales. Équations de transport de Maxwell .....</b>	
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
<b>CHAPITRE 6. — Relations macroscopiques. Équations de la dynamique et de l'hydrodynamique des plasmas .....</b>	
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
<b>CHAPITRE 7. — Théorème H. Propriétés de l'état maxwellien des plasmas. Libre parcours moyen. Application aux phénomènes de transport .....</b>	
<b>I. — Théorème H.</b>	
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
<b>II. — Théorie cinétique du libre parcours moyen.</b>	
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
<b>III. — Phénomènes de transport dans les plasmas.</b>	
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.	

<b>APPENDICE I. — Notations dyadiques et tensorielles utilisées dans ce livre .....</b>	<b>521</b>
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
<b>APPENDICE II. — Fonctions sphériques .....</b>	<b>533</b>
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
<b>APPENDICE III. — Calcul de diverses intégrales déduites de l'intégrale de collision .....</b>	<b>564</b>
<b>(Cas d'une seule espèce de particules).</b>	
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 $\mathcal{C}(Y_{2r1\nu})$ .....	569
3. Cas d'une loi de force quelconque. Méthode de Grad .....	577
<b>APPENDICE IV. ....</b>	<b>584</b>
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 $1/r^5$ .....	593
4. Cas d'une loi d'interaction quelconque. Intégrales $\Omega^{(l)}(\rho)$ ...	602
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>607</b>
<b>INDEX DES NOTATIONS .....</b>	<b>611</b>
<b>INDEX ALPHABÉTIQUE.....</b>	<b>617</b>