

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	1
Remerciements	3
Symboles et abréviations	5
Constantes	10
Chapitre 1. Le milieu plasma : définition et principales grandeurs	11
1.1. Définition et nature essentielle du plasma	11
1.1.1. Un plasma est un milieu à comportement collectif	11
1.1.2. Un plasma est un milieu macroscopiquement neutre	12
1.1.3. Premiers exemples de plasma	13
1.2. Domaines d'étude et d'applications	15
1.2.1. Fusion thermonucléaire contrôlée	15
1.2.2. Astrophysique et physique de l'environnement spatial	17
1.2.3. Pompage des lasers	18
1.2.4. Chimie dans les plasmas	19
1.2.5. Traitement de surface	20
1.2.6. Stérilisation d'objets médicaux	21
1.2.7. Analyse élémentaire (chimie analytique)	22
1.2.8. Éclairage	23
1.2.9. Écrans plasma	23
1.2.10. Sources d'ions	23

1.2.11. Propulseurs ioniques	24
1.3. Différents types de décharge en laboratoire	25
1.3.1. La décharge en courant continu ou alternatif de basse fréquence	25
1.3.2. La décharge de haute fréquence (HF)	25
1.3.3. La décharge par rayonnement laser	26
1.4. Densité électronique et température d'un plasma	26
1.4.1. Domaine des valeurs de densité électronique des plasmas	26
1.4.2. Concept d'équilibre thermodynamique et définition de la température d'un plasma	27
1.4.3. Divers niveaux d'écart par rapport à l'équilibre thermodynamique complet	30
1.5. Fréquence propre d'oscillation des électrons d'un plasma	32
1.5.1. Origine et description du phénomène	32
1.5.2. Calcul de la fréquence propre des électrons du plasma	34
1.6. Longueur de DEBYE : effet d'écran dans les plasmas	36
1.6.1. Description du phénomène	36
1.6.2. Calcul du potentiel exercé par un ion dans un plasma à deux températures : définition de la longueur de DEBYE	37
1.7. Phénomènes de collision dans les plasmas	42
1.7.1. Types de collision	42
1.7.2. Échange de quantité de mouvement et transfert d'énergie lors d'une collision entre deux particules	45
1.7.3. Section efficace microscopique différentielle	53
1.7.4. Section efficace microscopique intégrée (totale)	57
1.7.5. Section efficace macroscopique totale	59
1.7.6. Expression de la température d'un plasma en électron-volt	61
1.7.7. Fréquence de collision et libre parcours probable entre deux collisions	63
1.7.8. Fréquence moyenne de collision et libre parcours moyen	64
1.7.9. Exemples de sections efficaces collisionnelles	67

1.8. Mécanismes de perte et de création des particules chargées	72
1.8.1. Mécanismes de perte	72
1.8.2. Mécanismes de création	74
1.8.3. Équation de conservation des particules chargées	75
Chapitre 2. Mouvement individuel d'une particule chargée dans E et B	77
2.1. Équation générale du mouvement d'une particule chargée	79
2.1.1. Équation du mouvement	79
2.1.2. Équation des forces vives	80
2.2. Analyse de cas particuliers de E et B	80
2.2.1. Champ électrique seul ($B = 0$)	81
2.2.2. Champ magnétique constant et uniforme	90
2.2.3. Champ magnétique (légèrement) non uniforme ou (lentement) variable dans le temps	111
Chapitre 3. Description hydrodynamique d'un plasma	131
3.1. Considérations élémentaires sur l'équation de BOLTZMANN	133
3.1.1. Présentation sommaire de l'équation de BOLTZMANN	133
3.1.2. Approximation du terme de collisions élastiques de BOLTZMANN : relaxation de la fonction de distribution vers un état isotrope	136
3.1.3. Deux méthodes classiques de recherche de solution analytique de l'équation de BOLTZMANN	138
3.2. Fonctions de distribution et notions de corrélation	138
3.2.1. Densité de probabilité de présence dans l'espace des phases	139
3.2.2. Fonction de distribution simple (cas de particules corrélées)	140
3.2.3. Fonction de distribution simple (cas de particules non corrélées) .	140
3.2.4. Fonction de distribution double (cas de particules corrélées)	141
3.2.5. Fonction de distribution double (cas de particules non corrélées) .	142
3.2.6. Fonction de distribution à N -tuples	142
3.3. Fonctions de distribution et grandeurs hydrodynamiques	143

3.4.	Conductivité électrique due aux électrons d'un plasma	146
3.4.1.	Forme cinétique de la conductivité électrique due aux électrons en champ HF	146
3.4.2.	Forme hydrodynamique de la conductivité électrique due aux électrons en champ HF	149
3.5.	Équations de transport	151
3.5.1.	Équation de continuité (1 ^{er} moment hydrodynamique : moment d'ordre zéro en \mathbf{w})	153
3.5.2.	Équation de transport de quantité de mouvement (2 ^e moment hydrodynamique : moment d'ordre un en \mathbf{w})	155
3.5.3.	Équations du moment d'ordre deux en \mathbf{w}	161
3.5.4.	Équations des moments d'ordres supérieurs	166
3.6.	Fermeture des équations de transport	166
3.7.	Modèle du plasma d'électrons de LORENTZ	170
3.8.	Diffusion et mobilité de particules chargées	171
3.8.1.	Les concepts de diffusion et de mobilité	171
3.8.2.	Solution de l'équation de LANGEVIN avec dérivée particulaire nulle ($d\mathbf{v}/dt = 0$)	173
3.9.	Modes propres de diffusion	180
3.9.1.	Notions de modes propres de diffusion : étude d'une post-décharge temporelle	181
3.9.2.	Distribution spatiale de la densité des particules chargées en régime stationnaire de diffusion	185
3.10.	Diffusion en régime ambipolaire	187
3.10.1.	Hypothèses nécessaires à une description analytique complète du régime de diffusion ambipolaire	188
3.10.2.	Équations régissant la diffusion ambipolaire et le régime de transition de la diffusion libre vers la diffusion ambipolaire	189
3.10.3.	Valeur de l'intensité du champ électrique de charge d'espace	191
3.10.4.	Expression de la densité des charges ρ_0 sur l'axe : limite de validité du calcul analytique	192
3.10.5.	Conditions à remplir pour qu'une décharge en mode de diffusion soit en régime ambipolaire	195

3.11. Diffusion ambipolaire en champ magnétique statique	197
3.12. Régime de chute libre par opposition à celui de diffusion	199
3.13. Loi d'échelle $T_e(pR)$	200
3.13.1. Hypothèses du modèle	201
3.13.2. Dérivation de la relation $T_e(p_0R)$	202
3.14. Notion de gaine	208
3.14.1. Cas d'un potentiel de paroi positif par rapport au potentiel du plasma : gaine électronique	208
3.14.2. Cas d'un potentiel de paroi négatif par rapport au potentiel de plasma : gaine ionique	210
3.14.3. Potentiel flottant	213
Chapitre 4. Introduction à la physique des décharges HF	215
4.1. Préambule	215
4.2. Transfert de puissance du champ électrique à la décharge	217
4.2.1. Décharge en courant continu	217
4.2.2. Décharges HF	221
4.2.3. Décharges HF en présence d'un champ magnétique statique	223
4.2.4. Évolution de la valeur de θ en fonction de \bar{n}_e dans diverses conditions de plasma	229
4.3. Influence de la fréquence	232
4.3.1. Position du problème	232
4.3.2. Fonction de distribution en énergie des électrons en régime non stationnaire	234
4.3.3. FDEE en régime stationnaire	236
4.3.4. Trois cas limites de l'influence de ω sur la FDEE stationnaire	237
4.3.5. Influence de ω sur la valeur de la puissance θ	239
4.3.6. Densité d'espèces produites par seconde à densité de puissance absorbée constante : efficacité énergétique	240
4.3.7. Résultats expérimentaux et modélisation	241
4.3.8. Conclusion sommaire à l'étude des propriétés des plasmas HF à basse pression	246

4.4. Les plasmas HF à haute pression	246
4.4.1. Observation expérimentale des phénomènes de contraction et de filamentation à la pression atmosphérique	247
4.4.2. Modélisation du phénomène de la contraction à la pression atmosphérique	252
4.4.3. Validation par un modèle auto-cohérent des hypothèses émises sur la contraction à la pression atmosphérique	257
4.4.4. Décharges à pression atmosphérique en expansion résultant de l'addition de traces de gaz rares	259
4.4.5. Résumé des propriétés des plasmas HF à haute pression	262
Exercices du chapitre 1	263
Exercices du chapitre 2	313
Exercices du chapitre 3	363
Exercices du chapitre 4	419
Annexes	435
A1. Rappels sur la fonction de distribution des vitesses de MAXWELL-BOLTZMANN (M-B)	435
A2. Expression complète de la loi de SAHA	439
A3. Équilibre thermodynamique local partiel	441
A4. Représentation des collisions binaires dans les repères du centre de masse et du laboratoire	443
A5. Interactions collisionnelles de nature coulombienne. Limitation de leur portée (logarithme coulombien)	444
A6. Ionisation par étapes	456
A7. Notions de tenseur	459
A8. Opérations sur les tenseurs	462
A9. Orientation de $\mathbf{w}_{2\perp}$ dans le trièdre de référence ($\mathbf{E}_{0\perp} \wedge \mathbf{B}$, $\mathbf{E}_{0\perp}$, \mathbf{B})	467
A10. Force agissant sur une particule chargée dans la direction d'un champ \mathbf{B} faiblement non uniforme axialement	468

A11. Le moment magnétique, un invariant dans l'approximation du centre de guidage	469
A12. Vitesse de dérive d'une particule chargée soumise à une force F_D dans un champ B	470
A13. Vitesse de dérive magnétique dans le repère de FRENET associé aux lignes de force d'un champ magnétique	471
A14. Harmoniques sphériques	474
A15. Expression des termes de l'équation de transport de la pression cinétique	475
A16. Fermeture de l'équation hydrodynamique de transport de pression cinétique dans le cas d'une compression adiabatique	476
A17. Compléments de calcul pour l'expression de $T_e(pR)$	479
A18. Propagation d'une onde plane électromagnétique dans un plasma et épaisseur de peau	481
A19. Plasmas d'onde de surface (POS)	484
A20. Intégrales utiles et expressions des principaux opérateurs différentiels	488
Bibliographie	493
Références	497
Index	499