

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	5
Remerciements	7
Liste des symboles	9
Constantes	13
Chapitre 1. Le milieu plasma :	
définition et principales grandeurs caractéristiques	15
1.1. Définition et nature essentielle du plasma	15
1.1.1. Un plasma est un milieu à comportement collectif	15
1.1.2. Un plasma est un milieu macroscopiquement neutre	16
1.1.3. Premiers exemples de plasma	17
1.2. Domaines d'étude et d'applications (exemples)	19
1.2.1. Fusion thermonucléaire contrôlée	19
1.2.2. Astrophysique et physique de l'environnement spatial	21
1.2.3. Pompage des lasers	22
1.2.4. Chimie dans les plasmas	22
1.2.5. Traitement de surface	23
1.2.6. Stérilisation d'objets médicaux	25
1.2.7. Analyse élémentaire (chimie analytique)	26
1.2.8. Eclairage	26
1.2.9. Ecrans plasma	26
1.2.10. Source d'ions	27
1.3. Différents types de décharge en laboratoire	27

1.3.1. La décharge en courant continu ou alternatif de basse fréquence ..	27
1.3.2. La décharge de haute fréquence (HF)	28
1.3.3. La décharge par rayonnement laser	28
1.4. Densité électronique et température d'un plasma	28
1.4.1. Domaine des valeurs de densité électronique des plasmas	28
1.4.2. Concept d'équilibre thermodynamique (ET) et définition de la "température" d'un plasma	29
1.4.3. Divers niveaux d'écart par rapport à l'équilibre thermodynamique complet	32
1.5. Fréquence propre d'oscillation des électrons d'un plasma	34
1.5.1. Origine et description du phénomène	34
1.5.2. Calcul de la fréquence propre des électrons du plasma	35
1.6. Longueur de DEBYE : effet d'écran dans les plasmas	38
1.6.1. Description du phénomène	38
1.6.2. Calcul du potentiel d'un ion dans un plasma à deux températures : définition de la longueur de DEBYE	38
1.7. Phénomènes de collision dans les plasmas	43
1.7.1. Types de collision	43
1.7.2. Echange de quantité de mouvement et transfert d'énergie lors d'une collision entre deux particules	46
1.7.3. Section efficace microscopique différentielle	53
1.7.4. Section efficace microscopique intégrée (totale)	57
1.7.5. Section efficace macroscopique totale	58
1.7.6. Expression de la température d'un plasma en électron-volt	62
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	66
1.8. Mécanismes de perte et de création des particules chargées d'un plasma et leur équation de conservation	71
1.8.1. Mécanismes de perte	71
1.8.2. Mécanismes de création	73
1.8.3. Equation de conservation des particules chargées	74

Chapitre 2. Mouvement individuel d'une particule chargée dans des champs électrique et magnétique	75
2.1. Equation générale du mouvement d'une particule chargée dans des champs $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$ et propriétés de cette équation	77
2.1.1. Equation du mouvement	77
2.1.2. Equation des forces vives	77
2.2. Analyse de cas particuliers de $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$	78
2.2.1. Champ électrique seul ($\mathbf{B} = 0$)	78
2.2.2. Champ magnétique constant et uniforme	86
2.2.3. Champ magnétique non uniforme ou variable dans le temps	106
Chapitre 3. Description hydrodynamique d'un plasma	125
3.1. Considérations élémentaires sur l'équation de BOLTZMANN	127
3.1.1. Présentation sommaire de l'équation de BOLTZMANN	127
3.1.2. Approximation du terme de collisions élastiques de BOLTZMANN : relaxation de la fonction de distribution vers un état isotrope ...	129
3.1.3. Deux méthodes classiques de recherche de solution de l'équation de BOLTZMANN	131
3.2. Fonctions de distribution des vitesses et notions de corrélation	132
3.2.1. Densité de probabilité de présence	132
3.2.2. Fonction de distribution simple (cas de particules corrélées)	133
3.2.3. Fonction de distribution simple (cas de particules non corrélées)	134
3.2.4. Fonction de distribution double (cas de particules corrélées)	134
3.2.5. Fonction de distribution double (cas de particules non corrélées)	135
3.2.6. Fonction de distribution à N -tuples	136
3.3. Fonctions de distribution et grandeurs hydrodynamiques	136
3.4. Conductivité cinétique et hydrodynamique des électrons d'un plasma en présence d'un champ électromagnétique HF	139
3.4.1. Forme cinétique de la conductivité électrique due aux électrons en champ HF	139
3.4.2. Forme hydrodynamique de la conductivité électrique due aux électrons en champ HF	142
3.5. Equations de transport	144
3.5.1. Equation de continuité (1 ^{er} moment hydrodynamique : moment d'ordre zéro en $\mathbf{w}$)	146

3.5.2. Equation de transport de quantité de mouvement (2 ^e moment : moment d'ordre un en $\mathbf{w}$)	148
3.5.3. Equations du moment d'ordre 2 en $\mathbf{w}$	154
3.5.4. Equation des moments d'ordre supérieur	158
3.6. Fermeture des équations de transport	158
3.7. Modèle du plasma d'électrons de LORENTZ	161
3.8. Mobilité et diffusion de particules chargées	163
3.8.1. Les concepts de diffusion et de mobilité	163
3.8.2. Solution de l'équation de LANGEVIN avec dérivée particulaire nulle ($dv/dt = 0$)	164
3.9. Modes propres de diffusion et distribution spatiale de la densité des particules chargées	170
3.9.1. Notions de modes propres de diffusion : étude d'une post-décharge temporelle	171
3.9.2. Distribution spatiale de la densité des particules chargées en régime stationnaire de diffusion	175
3.10. Diffusion en régime ambipolaire	177
3.10.1. Hypothèses nécessaires à une description analytique complète du régime de diffusion ambipolaire	178
3.10.2. Equations régissant la diffusion ambipolaire et le régime de transition de la diffusion libre vers la diffusion ambipolaire	179
3.10.3. Valeur de l'intensité du champ électrique de charge d'espace	181
3.10.4. Expression de la densité des charges ρ_0 sur l'axe : limite de validité du calcul analytique	182
3.10.5. Conditions à remplir pour qu'une décharge en mode de diffusion soit en régime ambipolaire	184
3.11. Diffusion ambipolaire en champ magnétique statique	187
3.12. Régime de diffusion ou de chute libre ?	188
3.13. Température électronique d'une longue colonne de plasma régie par la diffusion ambipolaire : loi d'échelle $T_e(pR)$	190
3.13.1. Hypothèses du modèle	190
3.13.2. Dérivation de la relation $T_e(pR)$	191
3.14. Formation et nature des gaines à l'interface plasma-paroi : flux aux parois et critère de BOHM	197
3.14.1. Cas d'un potentiel de paroi positif par rapport au potentiel du plasma : gaine électronique	197

TABLE DES MATIÈRES	427
3.14.2. Cas d'un potentiel de paroi négatif par rapport au potentiel de plasma : gaine ionique	199
3.14.3. Potentiel flottant	201
Chapitre 4. Introduction à la physique des décharges HF	203
4.1. Préambule	203
4.2. Transfert de puissance du champ électrique à la décharge	205
4.2.1. Décharge en courant continu	205
4.2.2. Décharges HF	209
4.2.3. Décharges HF en présence d'un champ magnétique statique	211
4.2.4. Evolution de la valeur de θ en fonction de $\bar{n}_e$ dans diverses conditions de plasma	217
4.3. Influence de la fréquence du champ HF sur quelques propriétés du plasma et sur certains procédés	219
4.3.1. Position du problème	219
4.3.2. FDEE en régime non stationnaire	221
4.3.3. FDEE en régime stationnaire	222
4.3.4. Trois cas limites de l'influence de ω sur la FDEE stationnaire	223
4.3.5. Influence de ω sur la valeur de la puissance θ	226
4.3.6. Densité d'espèces produites par seconde à densité de puissance absorbée constante : efficacité énergétique	227
4.3.7. Résultats expérimentaux et modélisation	227
4.3.8. Conclusion sommaire à l'étude des propriétés des plasmas HF à basse pression	232
4.4. Les plasmas HF à haute pression	232
4.4.1. Observation expérimentale des phénomènes de contraction et de filamentation à la pression atmosphérique	233
4.4.2. Hypothèses d'étude du phénomène de contraction à la pression atmosphérique	236
4.4.3. Validation par un modèle auto-cohérent des hypothèses émises sur la contraction à la pression atmosphérique	240
Exercices du chapitre 1	243
Exercices du chapitre 2	275
Exercices du chapitre 3	319

Annexes	363
Annexe I. Rappels sur la fonction de distribution des vitesses de MAXWELL-BOLTZMANN (M-B)	363
Annexe II. Expression complète de l'équation de SAHA	367
Annexe III. Equilibre thermodynamique local partiel	368
Annexe IV. Représentation des collisions binaires dans les repères du centre de masse et du laboratoire	370
Annexe V. Interactions collisionnelles de nature coulombienne. Limitation de leur portée (logarithme coulombien)	371
Annexe VI. Ionisation par étape	383
Annexe VII. Notions de tenseur	386
Annexe VIII. Opérations sur les tenseurs	389
Annexe IX. Orientation de $\mathbf{w}_{2\perp}$ dans le trièdre de référence $(\mathbf{E}_{0\perp} \wedge \mathbf{B}, \mathbf{E}_{0\perp}, \mathbf{B})$	393
Annexe X. Force agissant sur une particule chargée dans la direction d'un champ $\mathbf{B}$ faiblement non uniforme axialement : variante de (2.172)	394
Annexe XI. Le moment magnétique, un invariant dans l'approximation du centre de guidage	395
Annexe XII. Vitesse de dérive $\mathbf{w}_D$ d'une particule chargée soumise à une force quelconque $\mathbf{F}_D$ dans un champ $\mathbf{B}$: la dérive magnétique	396
Annexe XIII. Vitesse de dérive magnétique $\mathbf{w}_{DM}$ dans le repère de FRENET associé aux lignes de force d'un champ magnétique présentant une courbure	397
Annexe XIV. Harmoniques sphériques	400
Annexe XV. Expression des termes $\underline{\mathbf{M}}$ et $\underline{\mathcal{R}}_\alpha$ de l'équation de transport de la pression cinétique (3.151)	401

Annexe XVI. Fermeture de l'équation hydrodynamique de transport de pression cinétique dans le cas d'une compression adiabatique	402
Annexe XVII. Compléments de calcul pour l'expression de $T_e(pR)$ (§ 3.13) .	403
Annexe XVIII. Plasmas d'onde de surface (POS)	405
Annexe XIX. Intégrales utiles et expressions des principaux opérateurs différentiels	408
Bibliographie	413
Références	415
Index	417
Table des matières	423