

**PLASMAS COLLISIONNELS**  
**PHYSIQUE DES DÉCHARGES RF ET MICRO-ONDE**

**Michel MOISAN et Jacques PELLETIER**

**edp sciences**

17, avenue du Hoggar  
Parc d'Activité de Courtabœuf - BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A - France

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Avant-propos</b> .....	1
<b>Remerciements</b> .....	3
<b>Symboles et abréviations</b> .....	5
<b>Constantes</b> .....	10
<b>Chapitre 1. Le milieu plasma : définition et principales grandeurs</b> ....	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
<b>Chapitre 2. Mouvement individuel d'une particule chargée dans <math>E</math> et <math>B</math></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
<b>Chapitre 3. Description hydrodynamique d'un plasma</b> .....	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 <sup>er</sup> moment hydrodynamique : moment d'ordre zéro en $\mathbf{w}$ ) .....	153
3.5.2.	Équation de transport de quantité de mouvement (2 <sup>e</sup> 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 $\rho_0$ 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
<b>Chapitre 4. Introduction à la physique des décharges HF</b> .....	<b>215</b>
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 $\theta$ 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 $\omega$ sur la FDEE stationnaire ....	237
4.3.5. Influence de $\omega$ sur la valeur de la puissance $\theta$ .....	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
<b>Exercices du chapitre 1</b> .....	<b>263</b>
<b>Exercices du chapitre 2</b> .....	<b>313</b>
<b>Exercices du chapitre 3</b> .....	<b>363</b>
<b>Exercices du chapitre 4</b> .....	<b>419</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>435</b>
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
<b>Bibliographie</b> .....	493
<b>Références</b> .....	497
<b>Index</b> .....	499