

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>Chapitre 1. Qu'est-ce qu'un plasma ?</b> . . . . .	<b>3</b>
1.1. Dans quelles conditions la matière est-elle à l'état plasma ? . . . . .	3
1.1.1. Décharges électriques . . . . .	4
1.1.2. Chauffage . . . . .	5
1.1.3. Absorption de rayonnement . . . . .	7
1.1.4. Les différents types de plasmas . . . . .	7
1.2. Diagnostics des plasmas : à distance ou <i>in situ</i> . . . . .	10
1.3. Effets qui dominent la physique . . . . .	13
1.3.1. Phénomène d'écrantage . . . . .	14
1.3.2. Interactions binaires ou forces collectives ? . . . . .	16
1.3.3. Rôle des effets quantiques . . . . .	18
1.3.4. Rôle du champ magnétique . . . . .	19
1.4. Le système couplé champs/particules : cas général . . . . .	19
1.5. Cas particulier : l'oscillation de plasma . . . . .	21
1.5.1. Position du problème . . . . .	21
1.5.2. Champ créé par les charges . . . . .	21
1.5.3. Déplacement des charges dû au champ . . . . .	22
1.5.4. Résolution du système couplé . . . . .	23
1.6. Fréquence plasma . . . . .	25
1.6.1. $\tau = \omega_{pe}^{-1}$ : temps caractéristique de réponse des électrons . . . . .	25
1.6.2. Quelques fréquences plasma caractéristiques . . . . .	26
1.7. Effets de la température . . . . .	27
1.7.1. Fonction de distribution des vitesses . . . . .	27
1.7.2. Les différents traitements théoriques . . . . .	29

1.8. Quelques exemples d'application de la physique des plasmas . . . . .	30
1.8.1. Fusion nucléaire et physique des plasmas. . . . .	30
1.8.2. Plasmas froids et leurs applications . . . . .	32
1.8.3. Production de particules énergétiques par accélérateur plasma . . . . .	34
1.8.4. Plasmas astrophysiques . . . . .	35

## **Chapitre 2. Trajectoires individuelles dans un champ électromagnétique . . . . . 37**

2.1. Trajectoire d'une particule dans un champ magnétique uniforme et stationnaire . . . . .	37
2.1.1. Sans champ électrique ( $E = 0$ ) . . . . .	37
2.1.2. Avec un champ électrique stationnaire et uniforme ( $E \neq 0$ ) . . . . .	39
2.1.2.1. Mouvement parallèle au champ magnétique. . . . .	39
2.1.2.2. Mouvement perpendiculaire . . . . .	40
2.1.3. Force constante . . . . .	42
2.2. Champs lentement variables. . . . .	42
2.2.1. Dérives dans un champ B non uniforme, avec $E = 0$ . . . . .	43
2.2.1.1. Dérive de courbure. . . . .	43
2.2.1.2. Dérive de gradient . . . . .	45
2.2.2. Dérive dans un champ E variable . . . . .	46
2.2.2.1. Champ E non stationnaire : dérive de polarisation . . . . .	46
2.2.2.2. Champ E non uniforme . . . . .	48
2.2.3. Premier invariant adiabatique. . . . .	49
2.2.3.1. Moment magnétique et description « centre-guide » . . . . .	49
2.2.3.2. Flux magnétique . . . . .	50
2.2.3.3. Exemples . . . . .	51
2.3. Petites perturbations d'un mouvement périodique. . . . .	53
2.3.1. Résultats généraux (pour un système hamiltonien) . . . . .	53
2.3.2. Un exemple avec trois invariants adiabatiques. . . . .	54
2.4. Annexes . . . . .	55

## **Chapitre 3. Théorie cinétique des plasmas . . . . . 61**

3.1. Fonction de distribution d'un plasma. . . . .	61
3.1.1. Définition. . . . .	61
3.1.2. Mesure expérimentale de la fonction de distribution . . . . .	64
3.1.3. Cas particulier : la distribution maxwellienne . . . . .	66
3.2. Équation cinétique. . . . .	68
3.2.1. Forme générale . . . . .	68

3.2.2. Équation de Vlasov . . . . .	71
3.3. Différents opérateurs de collisions . . . . .	74
3.3.1. Équation de Boltzmann . . . . .	74
3.3.2. Opérateurs de Landau et de BGL . . . . .	76
3.3.3. Opérateur BGK . . . . .	78
3.3.4. Conséquences fluides des opérateurs de collision . . . . .	79
<b>Chapitre 4. Modélisation fluide des plasmas et limite MHD . . . . .</b>	<b>81</b>
4.1. Définition des grandeurs fluides . . . . .	81
4.1.1. Moments de la fonction de distribution . . . . .	81
4.1.2. Définitions de la pression et équation d'état . . . . .	82
4.1.3. Énergie cinétique . . . . .	84
4.2. Équations d'évolution des grandeurs fluides . . . . .	85
4.2.1. Équation de transport de la densité (conservation du nombre de particules) . . . . .	85
4.2.2. Équation de transport de l'impulsion . . . . .	86
4.2.3. Transport de l'énergie . . . . .	87
4.3. Équations de fermeture . . . . .	88
4.3.1. Domaine de validité des équations fluides . . . . .	88
4.3.2. Pression isotrope . . . . .	89
4.3.3. Pression anisotrope en présence de champ magnétique. . . . .	90
4.3.4. Cas général. . . . .	92
4.4. Description multifluide du plasma . . . . .	92
4.4.1. Notion de « population » et système multifluide. . . . .	92
4.4.2. Hypothèse des variations lentes. . . . .	95
4.4.3. Énoncé des hypothèses de variations lentes . . . . .	95
4.4.4. Conséquences . . . . .	95
4.5. Description MHD (magnétohydrodynamique) . . . . .	97
4.5.1. Réduction du nombre de populations pour une même espèce . . . . .	97
4.5.2. Cas $N = 2$ : système bifluide et MHD . . . . .	98
4.5.3. Forme de la force de Laplace en MHD : pression et tension magnétique . . . . .	101
4.5.4. Loi d'Ohm et effet de la non-idéalité . . . . .	103
4.5.5. Conservation de l'énergie . . . . .	104
4.5.6. Conditions d'équilibre MHD . . . . .	104
4.5.7. Exemples d'équilibre MHD . . . . .	105
4.6. Annexes . . . . .	108

<b>Chapitre 5. Ondes dans les plasmas dans l'approximation fluide . . .</b>	<b>113</b>
5.1. Ondes dans les plasmas : modes propres de propagation . . . . .	113
5.2. Calcul des modes propres de propagation : méthode classique . . . . .	116
5.2.1. Écriture du système différentiel . . . . .	116
5.2.2. Linéarisation . . . . .	116
5.2.3. Recherche de solutions exponentielles complexes (« algébrisation ») . . . . .	117
5.2.4. Résolution . . . . .	117
5.3. Traitement fluide de l'onde de plasma . . . . .	118
5.4. Exemple d'instabilité « électronique » : l'instabilité double faisceau . . . . .	122
5.5. Autres modes de propagation « électroniques » . . . . .	125
5.5.1. Système d'équations . . . . .	126
5.5.2. Ondes électromagnétiques dans un plasma froid non magnétisé : fréquence de coupure . . . . .	126
5.5.3. Ondes « électroniques » dans un plasma magnétisé . . . . .	133
5.5.4. Rôle du champ magnétique statique . . . . .	134
5.6. Système à deux fluides : modes de propagation basse fréquence . . . . .	136
5.6.1. Ondes acoustiques-ioniques : fréquence de résonance . . . . .	136
5.6.2. Ondes d'Alfvén . . . . .	138
5.7. Modes de propagation MHD. . . . .	142
5.7.1. Écriture et résolution du système linéarisé . . . . .	142
5.7.1.1. Mode d'Alfvén . . . . .	144
5.7.1.2. Modes magnétosonores (rapide et lent). . . . .	145
5.7.2. Quelques remarques . . . . .	146
5.8. Excitation des ondes dans un plasma . . . . .	147
5.9. Annexes . . . . .	152
 <b>Chapitre 6. Effets cinétiques : amortissement Landau . . . . .</b>	 <b>155</b>
6.1. Traitement cinétique des ondes dans les plasmas. . . . .	155
6.1.1. Modes fluides et modes cinétiques. . . . .	155
6.1.2. Modes propres : nombre attendu et possibilités d'excitation. . . . .	156
6.1.3. Amortissement cinétique : une analogie mécanique. . . . .	157
6.2. Exemple du mode de Langmuir . . . . .	159
6.2.1. Particules résonnantes . . . . .	160
6.2.2. Simulation du mode de Langmuir . . . . .	161
6.3. Calcul cinétique du mode de Langmuir : modes propres du système Vlasov/Gauss . . . . .	163
6.3.1. Système d'équations . . . . .	163
6.3.2. Système algébrisé . . . . .	164

6.3.3. Résolution . . . . .	165
6.3.4. Notion de modes propres cinétiques . . . . .	169
6.4. Rôle des particules résonnantes . . . . .	175
6.4.1. Définitions . . . . .	175
6.4.2. Dynamique non linéaire des électrons dans le champ de l'onde . . . . .	176
6.4.3. Estimation des échanges d'énergie entre champ et particules . . . . .	178
6.4.4. Nombre de particules résonnantes tendant vers zéro : limite fluide . . . . .	182
6.4.5. Effet Landau inverse . . . . .	183
6.5. Autres méthodes de calcul des modes propres . . . . .	185
6.6. Autres modes propres cinétiques amortis et autres résonances. . . . .	186
6.6.1. Effet Landau pour les modes autres que le mode de Langmuir . . . . .	186
6.6.2. Résonances cyclotron . . . . .	188
6.6.3. Autres résonances. . . . .	188
6.7. Amortissement et réversibilité. . . . .	189
6.8. Annexes . . . . .	190
<b>Chapitre 7. Ondes de choc et discontinuités . . . . .</b>	<b>201</b>
7.1. Quelques exemples de chocs et de discontinuités . . . . .	201
7.2. Existence des discontinuités . . . . .	206
7.2.1. Absence de gradient stationnaire . . . . .	206
7.2.2. Raidissement non linéaire . . . . .	207
7.2.3. Formation des discontinuités . . . . .	209
7.3. Établissement des équations de saut . . . . .	210
7.3.1. Signification des équations de saut. . . . .	210
7.3.2. Application aux équations de la MHD. . . . .	212
7.3.3. Repère de De Hoffmann-Teller. . . . .	213
7.4. Différents types de discontinuités pouvant exister dans un plasma. . . . .	214
7.4.1. Solutions du système . . . . .	214
7.4.2. Propriétés des discontinuités rotationnelles. . . . .	216
7.4.3. Chocs . . . . .	217
7.4.4. Discontinuité tangentielle . . . . .	220
7.5. Frontières des magnétosphères . . . . .	220
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>225</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>227</b>