

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1. Qu'est-ce qu'un plasma ?	3
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
Chapitre 4. Modélisation fluide des plasmas et limite MHD	81
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

Chapitre 5. Ondes dans les plasmas dans l'approximation fluide . . .	113
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
 Chapitre 6. Effets cinétiques : amortissement Landau	 155
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
Chapitre 7. Ondes de choc et discontinuités	201
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
Bibliographie	225
Index	227