ONDES DANS LES PLASMAS

Collection Méthodes

I

Propriétés générales des plasmas

II

Description diélectrique d'un milieu anisotrope.
Forme générale de l'équation de dispersion

III

Propagation des ondes planes
dans les plasmas froids homogènes illimités

IV

Ondes dans les magnétoplasmas froids, homogènes et limités

V

Transferts d'énergie dans les magnétoplasmas froids homogènes.
Rayonnement d'une source.
Rayons dans les plasmas faiblement inhomogènes

VI

Propagation des ondes dans les plasmas chauds homogènes.
Modèles macroscopiques

VII

Propagation des ondes dans les plasmas chauds homogènes.
Théorie microscopique
des oscillations longitudinales en l'absence de champ magnétique extérieur

VIII

Propagation des ondes dans les plasmas chauds homogènes.
Théorie microscopique en présence d'un champ magnétique extérieur

IX

Transferts d'énergie dans les plasmas chauds homogènes

X

Effets des collisions sur la propagation des ondes

DANIEL QUÉMADA, ancien élève de l'École normale supérieure, agrégé de sciences physiques, maître de conférences à la Faculté des sciences de Paris, est né en 1930. Spécialisé dans l'étude de la propagation des ondes dans les plasmas, il a récemment orienté ses recherches vers les applications rencontrées dans l'ionosphère et la magnétosphère.

LE MANUSCRIT de cet ouvrage a été reçu en août 1967. La préparation du texte et la mise au point des illustrations ont pris fin en octobre 1967. Mis en composition le 13 octobre, le livre a été achevé d'imprimer le 7 mai 1968.

© HERMANN, PARIS, 1968

Tous droits de reproduction, même fragmentaire, sous quelque forme que ce soit, y compris photographie photocopie, microfilm, bande magnétique, disque, ou autre, réservés pour tous pays.

TABLE

PRÉFACE 15
INTRODUCTION 17
NOTATIONS 21

I. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES PLASMAS

1.1. *Caractères généraux* 23
1.2. *Plasmas naturels et plasmas de laboratoire* 24
1.3. *Interactions entre particules; plasmas collectifs et plasmas individuels* . 25
1.4. *Définition et conditions d'existence d'un plasma* 26
1.4.1. Longueur de Debye 27
1.4.2. Oscillations de plasma 28
1.4.3. Quasi-neutralité électrique 29
1.4.4. Conditions d'existence 29
1.5. *Collisions* 30
1.6. *Propriétés macroscopiques d'un plasma* 34
1.6.1. Description macroscopique 34
1.6.1.1. Trajectoires individuelles 34
1.6.1.2. Modèles hydrodynamiques 34
1.6.2. Propriétés macroscopiques 35
1.7. *Propriétés microscopiques des plasmas* 37
1.7.1. Description microscopique. Théorie cinétique 37
1.7.2. Propriétés microscopiques 40

II. DESCRIPTION DIÉLECTRIQUE D'UN MILIEU ANISOTROPE. FORME GÉNÉRALE DE L'ÉQUATION DE DISPERSION

2.1. *Propagation des ondes planes. Oscillations propres et oscillations forcées.* 43
Amplitudes complexes 46

2.2. *Propagation des ondes planes dans le vide et dans un diélectrique isotrope.* 47
2.2.1. Propagation dans le vide 47
2.2.2. Propagation dans un diélectrique. 48
2.2.2.1. Description diélectrique 48
2.2.2.2. Description « charges dans le vide ». 49
2.2.2.3. Équation de dispersion 50
2.2.2.4. Mécanisme physique de la dispersion 51
2.2.2.5. Indice de propagation. Indice d'extinction 51
2.2.2.6. Propriétés générales de la constante diélectrique. . . 53
2.2.2.7. Description diélectrique d'un plasma isotrope 54

2.3. *Description diélectrique d'un milieu anisotrope*. 55
2.3.1. Perméabilité magnétique d'un plasma. 55
2.3.2. Description « charges dans le vide ». Tenseur de conductivité d'un plasma. 57

2.4. *Forme générale de l'équation de dispersion*. 59

2.5. *Propriétés générales des solutions*. 61

III. PROPAGATION DES ONDES PLANES DANS LES PLASMAS FROIDS HOMOGÈNES ILLIMITÉS

3.1. *Le modèle plasma froid* 63

3.2. *Équation de dispersion en l'absence de champ magnétique extérieur* . . 64
3.2.1. Ondes longitudinales 65
3.2.2. Ondes transversales. 67
3.2.3. Courbes de dispersion 68
3.2.4. Vitesse de groupe 69

3.3. *Tenseur diélectrique d'un magnétoplasma froid* 70

3.4. *Équation de dispersion des ondes planes dans un magnétoplasma froid.* 74
3.4.1. Coupures et résonances. 76
3.4.1.1. Fréquence de résonance. 77
3.4.1.2. Fréquence de coupure. 80
3.4.2. Polarisation des ondes 81

3.5. *Équations de dispersion en propagations parallèle et perpendiculaire au champ magnétique extérieur : ondes principales*. 83

3.5.1. Ondes principales en propagation parallèle 83
3.5.1.1. En haute fréquence 86
3.5.1.2. Effet Zeeman. 86
3.5.1.3. Mode sifflement 87
3.5.1.4. En très basse fréquence : ondes d'Alfvén. 87
3.5.2. Indices de groupe des modes droit et gauche. 91
3.5.3. Effet Faraday 92
3.5.4. Ondes principales en propagation perpendiculaire 94
3.5.4.1. Onde ordinaire. 94
3.5.4.2. Onde extraordianire. 95
3.5.5. Effet Cotton-Mouton. 97
3.5.6. Indices de groupe des modes ordinaire et extraordinaire. . . 97
3.6. *Courbes de dispersion en propagations parallèle et perpendiculaire* . . . 98
3.7. *Propagation oblique relativement au champ magnétique extérieur. Diagramme CMA*. 104
3.7.1. Courbes limites 106
3.7.1.1. Propagation parallèle 106
3.7.1.2. Propagation perpendiculaire 108
3.7.2. Diagramme CMA 109
3.7.3. Identification des modes 111
3.8. *Propagation en très haute fréquence*. 114
3.8.1. Équation d'Appleton-Hartree 114
3.8.2. Diagramme CMA en haute fréquence. 116
3.8.3. Approximations quasi parallèle et quasi perpendiculaire. . . 117
3.8.3.1. Propagation quasi perpendiculaire. 117
3.8.3.2. Propagation quasi parallèle. 121
3.8.4. Courbes de dispersion des ondes de haute fréquence en propagation oblique, en fonction de la densité 123
3.9. *Propagation en très basse fréquence : ondes magnétohydrodynamiques*. . 126
3.10. *Caractéristiques de la propagation dans un plasma à plusieurs composants ioniques*. 129

IV. ONDES DANS LES MAGNÉTOPLASMAS FROIDS, HOMOGÈNES ET LIMITÉS

4.1. *Équations générales : séparation des composantes parallèles et perpendiculaires. Conditions aux limites*. 134
4.2. *Ondes guidées dans le vide*. 136
4.3. *Ondes guidées dans un plasma isotrope* 140
4.3.1. Équations générales. Fréquences de coupure. 140

4.3.2. Plasma isotrope limité par des conducteurs parfaits 142
4.3.3. Plasma isotrope limité par un diélectrique (ou par le vide) . . 142
4.3.3.1. Modes rayonnants 144
4.3.3.2. Modes non rayonnants. Ondes de surface 145
4.4. *Ondes guidées dans un plasma plongé dans un champ magnétique axial infini* 147
4.4.1. Plasma limité par des conducteurs parfaits 148
4.4.2. Plasma plongé dans le vide (ou dans un diélectrique isotrope) . 148
4.5. *Ondes dans un magnétoplasma homogène, emplissant entièrement un guide (B_0 axial)* 151
4.5.1. Équations générales 151
4.5.2. Fréquences de coupures 154
4.5.3. Fréquences de résonance 156
4.5.3.1. Résonance plasma 157
4.5.3.2. Résonances gyromagnétiques 158
4.5.3.3. Résonances d'une lame de plasma, limité par des conducteurs parfaits 160
4.5.4. Limite des très hautes fréquences 161
4.5.5. Limite des très basses fréquences 161
4.5.6. Allure des courbes de dispersion 163
4.6. *Ondes dans un guide partiellement empli de plasma* 165
4.6.1. Plasma isotrope 165

V. TRANSFERTS D'ÉNERGIE DANS LES MAGNÉTOPLASMAS FROIDS HOMOGÈNES. RAYONNEMENT D'UNE SOURCE. RAYONS DANS LES PLASMAS FAIBLEMENT INHOMOGÈNES

5.1. *Densité et flux d'énergie instantanés dans un plasma froid* 170
5.2. *Valeurs moyennes dans le temps* 172
5.3. *Ondes réelles (ω et k réels). Caractéristiques géométriques de la propagation* 174
5.4. *Vitesse de groupe* 179
5.5. *Ondes complexes [ω (ou k) complexe, k (ou ω) réel]* 183
5.6. *Rayonnement d'une source située dans un plasma homogène illimité* . . 187
5.6.1. Méthode de la transformée de Fourier 187
5.6.2. Tenseur de Green 192
5.7. *Généralités sur le problème des antennes* 194
5.7.1. Caractéristiques d'une antenne dans le vide 195
5.7.2. Résistance de rayonnement d'une antenne plongée dans un plasma froid anisotrope 197

5.7.3. Réactance d'une antenne plongée dans un plasma froid anisotrope 200
5.7.4. Diagramme de rayonnement d'un dipôle plongé dans un plasma froid anisotrope 202
5.7.5. Cas des plasmas chauds 204
5.8. *Rayonnement à travers une surface plane vide-plasma* 204
5.9. *Propagation dans les milieux faiblement inhomogènes. Tracé des rayons* . 208
5.9.1. Surfaces équiphase 209
5.9.2. Rayons dans un milieu stratifié, en l'absence de champ magnétique extérieur 211
5.9.3. Rayons dans un milieu stratifié, en présence d'un champ magnétique extérieur 212
5.9.3.1. Méthode dite de la quartique de Booker 213
5.9.3.2. Méthode de Poeverlein 217
5.9.3.3. Méthode d'Haselgrove 218
5.9.3.3.1. Relation entre la surface des indices et la surface des vitesses radiales 218
5.9.3.3.2. Équations canoniques du rayon 221
5.9.3.3.3. Loi de Descartes 223
5.9.4. Accessibilité. Couplage de modes 223

VI. PROPAGATION DES ONDES DANS LES PLASMAS CHAUDS HOMOGÈNES : MODÈLES MACROSCOPIQUES

6.1. *La description des plasmas chauds dans l'approximation hydrodynamique* 226
6.2. *Conditions de validité de l'approximation hydrodynamique* 228
6.3. *Théorie macroscopique adiabatique* 231
6.4. *Ondes rapides adiabatiques en l'absence de champ magnétique extérieur* . 232
6.4.1. Ondes transversales 234
6.4.2. Ondes longitudinales 235
6.5. *Ondes rapides adiabatiques en présence d'un champ magnétique extérieur* 236
6.5.1. Propagation parallèle 237
6.5.2. Propagation perpendiculaire 238
6.5.3. Théorie adiabatique à pression scalaire 238
6.6. *Courbes de dispersion des ondes principales rapides* 239
6.7. *Ondes de très basse fréquence en propagation oblique : mode magnéto-sonore* 241
6.8. *Ondes électrostatiques dans un magnétoplasma* 242

VII. PROPAGATION DES ONDES DANS LES PLASMAS CHAUDS HOMOGÈNES, EN L'ABSENCE DE CHAMP MAGNÉTIQUE EXTÉRIEUR : THÉORIE MICROSCOPIQUE DES ONDES LONGITUDINALES

7.1. *Tenseur de conductivité d'un plasma isotrope. Cas de l'équilibre maxwellien* 245

7.2. *Étude des ondes longitudinales pour une distribution d'équilibre quelconque. Modes normaux d'oscillation* 247

7.3. *Évolution d'une perturbation initiale : problème de Landau* 250

7.4. *Modes de Van Kampen. Modes de particules piégées. Domaine de validité de la théorie de Landau* 253

7.5. *Résolution de l'équation de dispersion des ondes longitudinales. Calcul de l'amortissement de Landau* 255

7.5.1. Plasma à un seul composant : ondes électroniques rapides. . 255

— Vitesse de groupe 259

7.5.2. Plasma à deux composants : ondes pseudosonores et ondes plasma ioniques 259

7.5.2.1. Ondes pseudosonore 259

7.5.2.2. Onde plasma ionique 261

7.5.2.3. Oscillations très amorties 262

7.5.2.4. Comparaison avec la théorie hydrodynamique . . . 265

7.6. *Ondes transversales* 267

VIII. PROPAGATION DES ONDES DANS LES PLASMAS CHAUDS HOMOGÈNES : THÉORIE MICROSCOPIQUE EN PRÉSENCE D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE EXTÉRIEUR

8.1. *Le tenseur diélectrique d'un magnétoplasma chaud* 269

8.2. *Limite des grandes longueurs d'ondes. Comparaison avec les résultats de la théorie adiabatique* 271

8.2.1. Limite des grandes longueurs d'ondes. 271

8.2.2. Domaine de validité de la théorie adiabatique : approximation des plasmas tièdes 271

8.3. *Propagation parallèle* 273

8.4. *Propagation perpendiculaire : résultats en haute fréquence* 274

8.5. *Modes de basse fréquence : ondes magnétosonores* 279

8.6. *Ondes longitudinales* 282

8.7. *Amortissement cyclotronique et amortissement par effet Cerenkov. Modes de particules piégées* 283

8.7.1. Mécanismes d'amortissement d'une onde 283

8.7.2. Modèles multifaisceaux 284
8.7.3. Modes de particules piégées 287
8.8. *Étude de la résonance gyromagnétique électronique* 289
8.9. *Critères de linéarisation* 291

IX. TRANSFERTS D'ÉNERGIE DANS LES PLASMAS CHAUDS HOMOGÈNES

9.1. *Puissance dissipée dans le milieu* 293
9.2. *Théorème de Poynting pour une onde réelle (k réel, ω réelle)* 295
9.3. *Théorème de Poynting pour un milieu faiblement dissipatif (k réel, ω complexe)* 296
9.4. *Atténuation des ondes dans un milieu dissipatif. Valeurs moyennes dans l'espace* 299
9.5. *Vitesse de groupe dans un milieu sans pertes* 301
9.5.1. Application aux ondes plasma 303
9.5.2. Application aux ondes pseudosonores 305

X. EFFETS DES COLLISIONS SUR LA PROPAGATION DES ONDES

10.1. *Généralités. Modèles pour les plasmas collisionnels* 307
10.2. *Transfert de quantité de mouvement. Fréquences effectives de collisions* . 310
10.2.1. Coefficient de frottement et fréquence de collision 310
10.2.2. Conductivité de Lorentz 312
10.2.3. Fréquences effectives de collision 312
10.3. *Modifications apportées par les collisions à la propagation dans les plasmas froids* 315
10.3.1. Cas $B_0 = 0$ 315
10.3.2. Cas $B_0 \neq 0$ 317
10.3.3. Fréquence critique de collision 320
10.3.4. Effet des collisions sur l'indice de groupe 321

APPENDICES

1. *Relation entre* **D** *et* **E**. *Propriétés générales de la constante diélectrique* . 327
2. *Champ électrique effectif agissant sur les électrons* 330
3. *Tenseur de Green. Rayonnement d'un dipôle dans un plasma froid* 331
3.1. *Forme générale de* $g_\omega(k)$ 331
3.2. *Puissance rayonnée par un dipôle* 332

4. *Condition de rayonnement. Condition d'antirayonnement (J.-P. Lafon)* . 334
5. *Calcul hydrodynamique du tenseur de conductivité d'un magnétoplasma chaud* 339
6. *Transformation de Laplace* 341
7. *Propriétés de l'intégrale de Cauchy* 343
8. *Étude du mode longitudinal de basse fréquence dans la limite* $T_e \gg T_i$ 346
9. *Intégration de l'équation de Vlasov par la méthode des caractéristiques (méthode des trajectoires). Tenseur diélectrique d'un magnétoplasma chaud* 349
10. *Étude du voisinage de la résonance* $\omega = \omega_b$ 357
11. *Particules résonnantes* 359
12. *Vitesse de groupe et vitesse de signal au voisinage d'une fréquence d'absorption* 360

BIBLIOGRAPHIE 365
INDEX 377

COLLECTION DE PHYSIQUE

DU CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

D. Quémada, Ondes dans les plasmas, 1968.

PRÉFACE

La physique des gaz ionisés, appelés, sous certaines conditions, *plasmas*, s'est beaucoup développée depuis une vingtaine d'années, principalement grâce aux recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée. Dès lors, l'étude des caractéristiques de la propagation des différents types d'onde dans ces plasmas a constitué une méthode d'analyse très efficace de leurs propriétés : cette monographie a pour objet de présenter un exposé systématique de ces caractéristiques.

Mais bien avant, l'étude de l'ionosphère avait conduit les géophysiciens à des travaux sur la propagation des ondes radioélectriques dans les couches ionisées de la haute atmosphère; et dans le même temps, les astrophysiciens s'étaient intéressés aux oscillations de basse fréquence dans la couronne solaire. C'est pourquoi un certain nombre de résultats, déjà anciens, sont repris dans cet ouvrage. Plus récemment, les recherches se sont étendues du côté des basses fréquences pour la magnétosphère, et des hautes fréquences en radioastronomie; la géophysique et l'astrophysique offrent donc un très vaste champ d'application pour une étude d'ensemble de la propagation des ondes : les exemples cités mettent un accent particulier sur les applications dans ces deux domaines.

Cette monographie a eu pour origine différents cours professés par l'auteur dans le cadre, d'une part des enseignements de troisième Cycle (D.E.A. de Physique des Milieux Ionisés et d'Astrophysique, à Paris, depuis 1965; D.E.A. de Physique Spatiale, à Toulouse, depuis 1966) et d'autre part d'une École d'Été de Physique Spatiale, placée sous l'égide du C.N.E.S. (Tarbes, 1966); ils ont couvert essentiellement l'ensemble du sujet traité ici, mis à part les chapitres 4, 8 et 10. Enfin, un exposé plus sommaire du même sujet est enseigné à l'École Supérieure d'Électricité de Paris, depuis 1966.

Deux préoccupations fondamentales ont guidé l'auteur. Tout d'abord, un but pédagogique a été poursuivi : c'est pour cette raison que certaines notions

de base ont fait l'objet de nombreux rappels et que la théorie élémentaire a été particulièrement développée. Ce livre s'adresse donc en premier lieu aux étudiants abordant la physique des plasmas.

L'autre préoccupation non moins importante, mais l'éloignant parfois de la première, a été d'apporter une aide aux chercheurs spécialisés dans ce domaine : bien que très diverses et souvent complexes, les principales méthodes habituellement utilisées et un certain nombre de résultats généraux ont été rassemblés dans cet ouvrage [1]. Néanmoins, il a été nécessaire de limiter, en raison de son ampleur, le sujet traité ici, c'est pourquoi certaines questions, bien qu'essentielles — comme les effets de plasmas dans les solides, les instabilités, les effets non linéaires — ont été exclues ou abordées succinctement.

L'auteur exprime ses remerciements à sa femme pour l'aide qu'elle lui a apportée. Il remercie également Mesdames A. Constantin et A.-M. Pointu pour leurs justes critiques et suggestions à la lecture du manuscrit, et Monsieur P.-M. Velut pour la correction des épreuves. Il exprime sa gratitude à Madame L. Boivin que s'est chargée avec soin et diligence de la frappe du manuscrit.

D. QUEMADA
Orsay, juillet 1967

1. Certains paragraphes (en petits caractères) plus spécialisés, ou plus difficiles, pourront être laissés de côté lors d'une première lecture.

INTRODUCTION

Lorsqu'un système est écarté de sa position d'équilibre stable puis abandonné à lui-même, il prend un mouvement oscillatoire de part et d'autre de cette position d'équilibre. Les caractéristiques de ces oscillations propres et, plus généralement, celles des ondes se propageant dans un milieu, dépendent essentiellement des paramètres qui définissent cet équilibre. C'est pourquoi l'étude des modes d'oscillation d'un milieu constitue un des plus puissants moyens d'analyse des propriétés de ce milieu. De plus, dans le cas des milieux inaccessibles ou difficilement accessibles, on peut utiliser l'onde elle-même comme agent de transport de l'information : ainsi on calcule la répartition de la densité électronique de l'ionosphère à partir de la mesure du temps du trajet aller-retour d'un signal radar émis à partir du sol et qui se réfléchit à une certaine altitude.

Cet ouvrage présente un exposé systématique des caractéristiques des ondes pouvant se propager dans un magnétoplasma dont les propriétés sont supposées connues; inversement, ces résultats pourront être utilisés pour déterminer les caractéristiques d'un plasma en mesurant certaines grandeurs directement ou indirectement attachées à la propagation d'une onde dans ce plasma.

La connaissance des propriétés de la propagation des ondes dans les plasmas est évidemment fondamentale dans tous les domaines de la physique où de tels milieux apparaissent : en astrophysique (atmosphère des étoiles et en particulier du soleil, espaces interstellaire et interplanétaire), en géophysique (ionosphère et magnétosphère), en physique des solides, dans l'étude des réactions thermonucléaires, en hydrodynamique (ondes de choc), en électronique et en électrotechnique (convertisseurs thermo-ioniques, propulsion). La physique spatiale, dans son développement actuel, rencontre, en particulier, les problèmes liés aux mesures effectuées à bord des ballons, des fusées ou des satellites (par ex. les problèmes des antennes), qui sont en connexion très étroite avec les mécanismes de propagation des ondes.

Relativement à ces phénomènes de propagation, le milieu plasma présente un grand nombre de propriétés nouvelles, non rencontrées dans les autres milieux, solides, liquides ou gaz neutres. Ainsi, la présence d'un champ magnétique statique le rend anisotrope; il en résulte un comportement en plusieurs points comparable à celui des milieux cristallins anisotropes (cristaux uniaxes), ou soumis à un champ magnétique, comme par exemple le phénomène de double réfraction. Il existe plusieurs fréquences caractéristiques, en particulier de résonance, qui dépendent en général de la densité électronique et ionique du champ magnétique et de l'angle que la direction de propagation fait avec ce champ magnétique; on rencontre des ondes de basse fréquence, les unes longitudinales (analogues aux ondes sonores habituelles, mais fondamentalement différentes quant à leur mécanisme d'entretien), les autres transversales, liées au champ magnétique extérieur (en particulier, les ondes d'Alfvèn).

Dans des conditions déterminées, certains de ces modes deviennent instables, et, de plus, des instabilités nouvelles apparaissent : l'étude de ces effets ne sera pas traitée ici; de la même façon, nous ne parlerons pas des phénomènes nonlinéaires qui résultent de l'existence de ces instabilités et qui assurent le retour du système soit à l'équilibre thermodynamique, soit à des situations stationnaires spéciales comme les états turbulents. Bien qu'un grand nombre des résultats présentés ici soient valables pour un équilibre quelconque, nous supposerons, dans la plupart des cas, que l'état d'équilibre est décrit par une fonction de distribution isotrope dans l'espace des vitesses (en particulier maxwellienne, ce qui permet de définir une température pour chaque espèce de particules); cela excluera les systèmes faisceaux-plasmas ainsi que les équilibres à température anisotrope, qui conduisent à des instabilités.

Au chapitre 1, les plasmas sont définis, ainsi que leurs conditions d'existence. A travers les interactions collectives entre particules, ils apparaissent comme des milieux tendant à rester électriquement neutres. Leurs propriétés générales sont ensuite brièvement exposées.

Le chapitre 2 rappelle et précise les bases de la description diélectrique linéaire des plasmas en termes des composantes $\varepsilon_{\alpha\beta}$ du *tenseur diélectrique* $\boldsymbol{\varepsilon}$, qui généralise pour les milieux anisotropes la constante diélectrique des milieux isotropes. La correspondance entre cette description et la description mécanique d'un système de charges dans le vide est établie à l'aide de la relation entre $\boldsymbol{\varepsilon}$ et le tenseur de conductivité σ; c'est en fait σ qui sera déduit d'équations cinétiques décrivant le milieu. En général, σ, et par conséquent $\boldsymbol{\varepsilon}$, dépend de la fréquence angulaire ω et du vecteur d'onde $\mathbf{k}$ ($|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda$) de l'onde. On obtient ainsi la relation de dispersion $\mathfrak{D}(\mathbf{k}, \omega) = 0$, dont les solutions définissent les *ondes propres* pouvant se propager dans le milieu. Naturellement, ces solutions seront fonctions des expressions de $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k}, \omega)$, qui dépendent à leur tour du modèle choisi pour décrire le système.

Le modèle le plus simple est celui appelé *plasma froid :* on y néglige l'agitation thermique des particules de sorte qu'on peut écrire une équation du mouvement du même type que celle qu'on écrit pour la particule individuelle. Bien que ce modèle puisse sembler à priori quelque peu éloigné de la réalité, il permet en fait de dégager une vue d'ensemble et une classification des différents types d'ondes propres, un grand nombre de ces résultats n'étant que peu modifiés dans les théories plus élaborées. C'est cette *approximation des plasmas froids* qui sera d'abord étudiée au chapitre 3, pour un plasma *homogène et illimité*. Une description très détaillée des différents modes propres est d'abord effectuée, dans les deux cas particuliers des propagations parallèle et perpendiculaire au champ magnétique extérieur Le milieu étant homogène, nous sommes en présence d'ondes planes. Ces ondes, appelées *ondes principales*, montrent des caractéristiques essentielles, en particulier des fréquences de coupure et des fréquences de résonance délimitant des régions à propagation (bandes passantes) et des régions où les ondes sont évanescentes (bandes non passantes). Puis la propagation oblique est étudiée, et les résultats sont représentés sur le *diagramme CMA;* les limites hautes fréquences (équations d'Appleton-Hartree, et en particulier les approximations « quasi parallèle » et « quasi perpendiculaire ») et basses fréquences (modes magnéto-ioniques) sont examinées.

Les modifications apportées par la présence de limites, circonstances qui ont lieu dans tous les plasmas de laboratoire, sont analysées au chapitre 4, qui constitue une étude des modes de propagation dans les guides d'onde entièrement ou partiellement emplis de plasmas homogènes.

Le chapitre 5 rassemble un certain nombre de problèmes liés à la propagation de l'énergie : après avoir défini les densités et flux d'énergie, on précise les théorèmes du transfert d'énergie dans le cas général des milieux faiblement dissipatifs. Puis, le rayonnement d'une source est étudié, ainsi que le passage à travers une surface plane séparant le plasma du vide; un développement particulier est réservé au problème du rayonnement des antennes. Enfin, le problème des trajectoires de l'énergie, c'est-à-dire les rayons, est traité dans le cas des milieux faiblement inhomogènes, l'ionosphère par exemple, même si les longueurs d'onde sont assez grandes; et pour finir, les principales méthodes du tracé des rayons (Booker, Poverlein, Haselgrove) sont étudiées.

En introduction à la théorie des plasmas chauds homogènes et illimités, un modèle hydrodynamique est développé au chapitre 6. Après en avoir précisé les limites de validité, les principaux résultats sont présentés sous forme de corrections de température à apporter aux modes obtenus dans l'approximation des plasmas froids. Une théorie microscopique est ensuite développée, en utilisant soit les équations cinétiques de Vlasov, soit le modèle multifaisceaux. Dans le cas isotrope (chap. 7) on étudie en détail les oscillations longitudinales, en particulier l'amortissement sans collision *(amorissement Landau)* et le phénomène de *piégeage*

des particules dans l'onde; en plus du mode longitudinal électronique, on trouve un mode longitudinal ionique qui, en très basse fréquence, est le *mode pseudosonore*. Le cas des magnéto-plasmas (chap. 8) est développé ensuite, mettant en évidence l'*amortissement cyclotron ;* là encore, apparaissent de nouveaux modes, les *ondes magnétosonores*. Enfin, le transfert d'énergie, dans les plasmas chauds, est analysé dans le cadre de la description diélectrique (chap. 9).

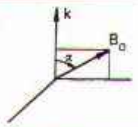
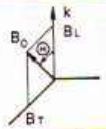
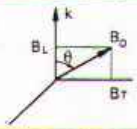
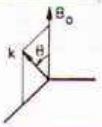
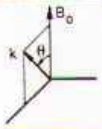
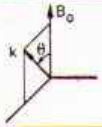
Les phénomènes de collisions proches ont été négligés pratiquement dans tout ce qui précède; ils interviennent cependant d'une manière importante dans les caractéristiques de la propagation, dès que la fréquence de l'onde n'est plus très grande devant la fréquence de ces collisions. Après avoir rappelé un certain nombre de résultats généraux concernant ces chocs, et en particulier, après avoir défini la *fréquence effective de collision*, le chapitre 10 résume les principaux effets sur les caractéristiques des modes de haute fréquence dans les plasmas froids.

C'est le système MKSA rationalisé qui sera utilisé tout au long de l'ouvrage.

Nous rappelons ici les valeurs des principales constantes physiques :

Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 2{,}998.10^{8}$ m/s
Constante diélectrique du vide	$\varepsilon_0 = \dfrac{10^{-9}}{36\pi} = 8{,}854.10^{-12}$ farad/m
Perméabilité magnétique du vide.....	$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} = 1{,}257.10^{-6}$ henry/m
Charge électrique de l'électron.....	$q_e = 1{,}602.10^{-19}$ coulomb
Masse de l'électron.....	$m_e = 0{,}911.10^{-30}$ kg
Masse du proton	$m_i = 1\,838\ m_e = 1{,}674.10^{-27}$ kg
Constante de Boltzmann	$K = 1{,}380.10^{-23}$ joule /°K
Électron volt eV	$1eV = 1{,}602.10^{-19}$ joule
	$1eV \longleftrightarrow 11.600$ °K

Des références renvoient à des manuels où des notations différentes ont été utilisées : il a donc paru utile de donner un tableau comparé des notations employées.

TABLEAU DES NOTATIONS UTILISÉES PAR DIFFÉRENTS AUTEURS

	GINZBURG (1960)	BUDDEN (1961)	DENISSE DELCROIX (1961)	STIX (1963)	ALLIS, BERS BUSCHBAUM (1963)	QUEMADA (1967)
Espèce de particule	$(-, +)$	e, i	e, i	$k = e, i$	$i = -, +$	$s = e, i$
Masse	m, M	$\mathfrak{m}_e$, $\mathfrak{m}_i$	m_e, m_i	m_k	m_i	m_s
Charge électrique	e	$e\ (e < o)$	q_e, $q_i = -Zq_e$	$Z_k e$, $(e > o)$	e_i	q_s, $q_i = -\alpha q_e$
Densités d'équilibre	$N = N_-; N_+$	$N = N_e; N_i$	$\bar{n}_e$, $\bar{n}_i$	n_k	N_i	n_{os}
Pression d'équilibre	$p_e = N\varkappa T_e$	—	$p = \bar{n}KT$	$p_k = n_k \varkappa T_k$	P_0	$P_s = n_{os}\, KT_s$
Tenseur diélectrique	ε'	—	$\lvert\varepsilon\rvert$	K	$\varepsilon_0 K$	$\varepsilon_0 \varkappa$
Long. de Debye électron.	D	—	h_e	λ_D	l_0	λ_{De}
Ondes planes	$e^{i(\omega t - \mathbf{k.r})}$	$e^{i(\omega t - \mathbf{k.r})}$	$e^{j(\omega t - kz)}$	$e^{i(\mathbf{k.r} - \omega t)}$	$e^{j(\omega t - \mathbf{k.r})}$	$e^{i(\mathbf{k.r} - \omega t)}$
Fréquence	$\omega' = \omega + i\gamma$	ω	ω	$\omega = \omega_r + i\omega_i$	ω	$\omega = \omega_1 + i\omega_2$; $\alpha = \omega - i\gamma$
Vecteur d'onde	$k = k_0 - iq$	k	$k = \alpha - j\beta$	$k = k_r + ik_i$	k	$k = k_1 + k_2$; $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{k} + i\boldsymbol{\chi}$
Carré de l'indice $(kc/\omega)^2$.	n^2	$\mathfrak{n}^2$	y	n^2	n^2	N^2
Indice complexe	$\tilde{n} = n - i\varkappa$	$\mathfrak{n} = \mu - i\mathcal{X}$	—	—	—	$N = N_1 + iN_2$
Vitesse de phase	v_{ph}	V	v_ψ	u	u_p	v_φ; u
Vitesse de groupe	v_{gr}	U	v_g	v_g	u_g	v_g
Vecteur de Poynting	S	$\boldsymbol{\Pi}$	$\mathbf{N}$	$\mathbf{P}$	$\mathbf{S}$	$\mathbf{S}$
Angle entre $\mathbf{k}$ et $\mathbf{v}_g$	—	α	—	α	—	Ψ
Fréquence plasma (FP)	ω_0	$\omega_N = \omega_N^{(e)}; \omega_N^{(i)}$	ω_p, Ω_p	Π_k	ω_{p-}, ω_{p+}	ω_{ps}; ω_p, Ω_p
Fréquence cyclotron (FC)	$\omega_{\parallel}$, $\Omega_{\parallel}$	$\omega_{\parallel} = \omega_{\parallel}^{(e)}; \omega_{\parallel}^{(i)}$	ω_b, Ω_b	Ω_k	ω_{b-}, ω_{b+}	$\omega_{bs} = -q_s B_0/m_s$ $\begin{cases}\omega_b = \omega_{be}\\ \Omega_b = -\Omega_{bi}\end{cases}$
Rapport $(FC)_e/(FC)_i$	—	γ	$m = m_i/Zm_e$	$\mu = m_i/Zm_e$	$1/\mu Z$	$m = m_i/\alpha m_e$
$(FP)/\omega$	v, —	$\sqrt{X_e}$, $\sqrt{X_i}$	—	—	α_-, α_+	p_s
$(FC)/\omega$	$\sqrt{u}$, $\sqrt{u_M}$	$Y = Y_e, Y_i$	—	—	β_-, β_+	b_s
$[(FP)_e^2 + (FP)_i^2]/\omega^2$	—	X	$x = \omega_0^2/\omega^2$	α	α^2	$x = \omega_0^2/\omega^2$; X
$[(FP)_e^2 + (FP)_i^2]/(FC)_e(FC)_i$	—	—	A	γ	c^2/u_a^2	$A = n_0(m_e + m_i)/\varepsilon_0 B_0^2$
Coupures: Modes D et X	—	—	ω_1	ω_R	—	ω_D
Coupures: Modes G et X	—	—	ω_2	ω_L	—	ω_G
Résonances hybrides: Supérieure	—	—	ω_I	ω_{UH}	—	ω_I
Résonances hybrides: Inférieure	—	—	ω_{II}	ω_{LH}	—	ω_{II}
Vitesse d'Alfvèn	—	—	V_a		u_a	V_A
Vitesse sonore ou pseudo-sonore	—	—	V_s	—	u_s	V_S, V_{PS}
(Fréq. de collision)/ω	s	Z	—	—	γ	Z
Système d'unités	CGS Gauss	MKSA rat.	UEMCGS	CGS Gauss	MKSA rat.	MKSA rationalisé
Système d'axes