

DANS ONDES 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. <i>Caractères généraux</i>	23
1.2. <i>Plasmas naturels et plasmas de laboratoire.</i>	24
1.3. <i>Interactions entre particules; plasmas collectifs et plasmas individuels</i> .	25
1.4. <i>Définition et conditions d'existence d'un plasma.</i>	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. <i>Collisions.</i>	30
1.6. <i>Propriétés macroscopiques d'un plasma</i>	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. <i>Propriétés microscopiques des plasmas.</i>	37
1.7.1. Description microscopique. Théorie cinétique.	37
1.7.2. Propriétés microscopiques.	40

TABLE

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

2.1. <i>Propagation des ondes planes. Oscillations propres et oscillations forcées.</i>	43
Amplitudes complexes	46
2.2. <i>Propagation des ondes planes dans le vide et dans un diélectrique isotrope.</i>	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. <i>Description diélectrique d'un milieu anisotrope.</i>	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. <i>Forme générale de l'équation de dispersion.</i>	59
2.5. <i>Propriétés générales des solutions.</i>	61

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

3.1. <i>Le modèle plasma froid.</i>	63
3.2. <i>Équation de dispersion en l'absence de champ magnétique extérieur</i>	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. <i>Tenseur diélectrique d'un magnétoplasma froid</i>	70
3.4. <i>Équation de dispersion des ondes planes dans un magnétoplasma froid.</i>	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. <i>Équations de dispersion en propagations parallèle et perpendiculaire au champ magnétique extérieur : ondes principales.</i>	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 extraordinarie.	95
3.5.5. Effet Cotton-Mouton.	97
3.5.6. Indices de groupe des modes ordinaire et extraordinaire.	97
3.6. <i>Courbes de dispersion en propagations parallèle et perpendiculaire</i>	98
3.7. <i>Propagation oblique relativement au champ magnétique extérieur. Diagramme CMA</i>	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. <i>Propagation en très haute fréquence</i>	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. <i>Propagation en très basse fréquence : ondes magnétohydrodynamiques</i>	126
3.10. <i>Caractéristiques de la propagation dans un plasma à plusieurs composants ioniques</i>	129

IV. ONDES DANS LES MAGNÉTOPLASMAS FROIDS, HOMOGÈNES ET LIMITÉS

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

TABLE

4.3.2. Plasma isotrope limité par des conducteurs parfaits	145
4.3.3. Plasma isotrope limité par un diélectrique (ou par le vide).	145
4.3.3.1. Modes rayonnants	145
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.	145
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 rempli 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. <i>Rayonnement à travers une surface plane vide-plasma</i>	204
5.9. <i>Propagation dans les milieux faiblement inhomogènes. Tracé des rayons.</i>	208
5.9.1. Surfaces équiphasse.	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 Poverlein	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 HOMOGENES : MODÈLES MACROSCOPIQUES

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

TABLE

VII. PROPAGATION DES ONDES DANS LES PLASMAS CHAUDS HOMOGENES,
EN L'ABSENCE DE CHAMP MAGNETIQUE EXTERIEUR : THEORIE 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 HOMOGENES :
THEORIE MICROSCOPIQUE EN PRESENCE D'UN CHAMP MAGNETIQUE EXTERIEUR

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 magnéto-sonores.	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 \mathbf{D} et \mathbf{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

TABLE

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

PRÉFACE

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 ouvrage¹. 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'Alfvén).

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 non linéaires 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 exclura 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* ε , 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 ε 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 ε , 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 $\mathcal{D}(\mathbf{k}, \omega) = 0$, dont les solutions définissent les *ondes propres* pouvant se propager dans le milieu. Naturellement, ces solutions seront fonctions des expressions de $\varepsilon(\mathbf{k}, \omega)$, 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 a 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 remplis 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*

INTRODUCTION

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	$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,854.10^{-12}$ 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 $1eV \leftrightarrow 11.600$ °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	$k = e, i$	$i = -, +$	$s = e, i$
Masses	m, M	m_e, 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	$N = N_+; N_+$	$N = N_e; N_i$	n_e, n_i	$n_k = n_k \times T_k$	N_i	$n_{os} = n_{os} KT_s$
Pression d'équilibre	$p_e = N \times T_e$	$p = nKT$	$p = nKT$	K	P_0	$\epsilon_0 \chi$
Tenseur diélectrique	ϵ	ϵ	$ \epsilon $	λ_D	$\epsilon_0 K$	λ_{D_s}
Long. de Debye électron.	D	D	D	$e^{i(k.r - \omega t)}$	$e^{i(k.r - \omega t)}$	$e^{i(k.r - \omega t)}$
Ondes planes	$e^{i(\omega t - k.r)}$	$e^{i(\omega t - k.r)}$	$e^{i(\omega t - k.r)}$	$e^{i(k.r - \omega t)}$	$e^{i(\omega t - k.r)}$	$e^{i(k.r - \omega t)}$
Fréquence	$\omega^2 = \omega + i\gamma$	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	$k = k_1 + k_2; \beta = k + i\chi$
Carré de l'indice $(kc/\omega)^2$	n^2	n^2	y	n^2	n^2	N^2
Indice complexe	$\tilde{n} = n - iz$	$\tilde{n} = \mu - i\chi$	y	u	u_p	$N = N_1 + iN_2$
Vitesse de phase	v_{ph}	V	v_{ψ}	v_g	u_p	$v_{\phi}; u$
Vitesse de groupe	v_{gr}	U	v_g	P	u_g	$v_{\psi}; u$
Vecteur de Poynting	S	Π	N	α	S	S
Angle entre k et v_{gr}	θ	α	α	α	α	Ψ
Fréquence plasma (FP)	ω_p	$\omega_N = \omega^{(e)}; \omega^{(i)}$	ω_p, Ω_p	ω_p, Ω_p	$\omega_{p-}; \omega_{p+}$	$\omega_{ps}; \omega_p, \Omega_p$
Fréquence cyclotron (FC)	ω_{H1}, Ω_{H1}	$\omega_{H1} = \omega_{H1}^{(e)}; \omega_{H1}^{(i)}$	ω_b, Ω_b	ω_b, Ω_b	$\omega_{b-}; \omega_{b+}$	$\omega_{bs} = -q_s B_0 / m_s$
Rapport $(FC)_e / (FC)_i$	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	$Y = Y_e, Y_i$	$m = m_i / Z m_e$	$\mu = m_i / Z m_e$	$1/\mu Z$	$m = m_i / \alpha m_e$
$(FP)/\omega$	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	$X = \sqrt{X_e}, \sqrt{X_i}$	$x = \omega_0^2 / \omega^2$	α	α_-, α_+	p_s
$(FC)/\omega$	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	$Y = Y_e, Y_i$	$A = \omega_0^2 / \omega^2$	γ	β_-, β_+	$b_s = \omega_0^2 / \omega^2; X$
$[(FP)_e^2 + (FP)_i^2] / \omega^2$	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	ω_1	ω_R	α^2 / u_0^2	$x = \omega_0^2 / \omega^2; X$
$[(FP)_e^2 + (FP)_i^2] / (FC)_e (FC)_i$	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	ω_2	ω_L	c^2 / u_0^2	$A = n_0 (m_e + m_i) / \epsilon_0 B_0^2$
Coupure { Modes D et X	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	ω_1	ω_{UH}	u_a	ω_D
Résonances { Supérieure	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	ω_2	ω_{LH}	u_s	ω_G
hybrides { Inférieure	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	ω_1	ω_{LH}	γ	ω_I
Vitesse d'Alfvén.....	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	ω_2	ω_{LH}	γ	ω_{II}
Vitesse sonore ou pseudo-	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	V_a	V_a	γ	V_A
sonore	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	V_g	V_g	γ	V_s, V_{ps}
(Fréq. de collision)/ ω	$\sqrt{u}, \sqrt{u_N}$	X	V_g	V_g	γ	Z
Système d'unités	CGS Gauss	MKSA rat.	UEMCGS	CGS Gauss	MKSA rat.	MKSA rationalisé
Système d'axes						

