



SCIENCES SUP



Cours et applications

Licence • Master • Écoles d'ingénieurs

PHYSIQUE DES PLASMAS

Préface de Bernard Bigot

Jean-Marcel Rax

DUNOD

PHYSIQUE DES PLASMAS

Cours et applications

Jean-Marcel Rax

Professeur à l'université de Paris XI
Directeur du laboratoire de physique
et technologie des plasmas
de l'École Polytechnique

Préface de

Bernard Bigot

Haut-commissaire à l'énergie atomique

DUNOD

Illustration de couverture : *Digital Vision*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2005
ISBN 2 10 007250 1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

À Andrée

Tenebris autem qu   sunt in luce tuemur

Préface

L'ouvrage sur la *physique des plasmas* que nous propose de découvrir le professeur Jean-Marcel Rax est particulièrement bienvenu.

Tout d'abord parce que ce domaine de la physique est un domaine passionnant, incontestablement trop peu enseigné actuellement dans nos universités et grandes écoles, et en conséquence trop largement méconnu, surtout quand on sait l'importance que représente cet état de la matière. Certes, ce n'est pas le plus familier et le plus accessible des quatre états (solide, liquide, gaz, plasma) sous lesquels nous savons désormais que la matière existe. Mais comment pourrions-nous continuer à l'ignorer sachant qu'à l'échelle cosmique il représente plus de 99,9 % de la matière visible de notre Univers et que la physique des plasmas est à la base de nombreuses technologies fortement innovantes et prometteuses dans plusieurs secteurs stratégiques (traitement de surfaces, production de nanomatériaux et de matériaux ultra-durs, production d'énergie par fusion thermonucléaire contrôlée, propulsion spatiale, microélectronique, armes de dissuasion...). Jusqu'à la publication de cet ouvrage, les manuels en français traitant de cette physique et accessibles aux étudiants comme aux chercheurs confirmés, et plus largement à tous ceux qui veulent comprendre le monde qui les entoure, étaient extrêmement rares et dataient de plus de 10 ans. Je ne doute pas que cet ouvrage sera rapidement considéré comme un ouvrage de référence, reflétant fidèlement l'état d'avancement de son sujet tel qu'il est au moment de sa publication.

Ensuite, parce que l'accueil en France à la fois du grand programme international de recherche ITER sur la fusion nucléaire deutérium-tritium sous confinement magnétique, et du programme national laser mégajoule (LMJ) sur la fusion nucléaire sous confinement inertiel, tout autant que le développement des nanotechnologies et de la microélectronique en réacteurs plasma, ou des travaux en astrophysique, vont fortement amplifier les besoins de formation en physique des plasmas. Ils vont positionner cette discipline parmi les disciplines physiques de base de la culture scientifique et

technique du XXI^e siècle, au même titre que la mécanique quantique avec ses déclinaisons que sont la physique atomique et la physique nucléaire, la physique statistique, la mécanique des fluides, la physique de la matière condensée...

Enfin, parce que l'intérêt de la physique des plasmas est qu'elle ouvre la voie à une vision complémentaire de la matière par comparaison avec celle que, de superbe manière, permet la seule mécanique quantique ou la seule mécanique des fluides ; en effet, cette physique autorise une approche plus globale qui intègre à la fois des aspects microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques, des aspects quantiques et classiques, des aspects purement cognitifs et des aspects fortement appliqués.

Remarquablement conçu, écrit de manière très pédagogique, cet ouvrage s'adresse à tous ceux, étudiants, jeunes scientifiques ou chercheurs confirmés, ingénieurs, public avide de culture scientifique et technique, qui veulent participer activement à la création des connaissances, les utiliser de la meilleure manière possible, ou simplement en suivre la progression. Il bénéficie de l'exceptionnelle expérience pédagogique d'un professeur de grande qualité dont le contact continu depuis de nombreuses années avec des étudiants exigeants lui a permis d'affiner sa vision de la discipline et la dynamique de la présentation de ses grands concepts, et de choisir les exemples les plus parlants et l'articulation des arguments les plus démonstratifs. Il bénéficie aussi de sa longue pratique d'une recherche menée au meilleur niveau international. Jean-Marcel Rax a en effet travaillé aussi bien sur le tokamak Tore Supra du Commissariat à l'énergie atomique installé à Cadarache (France) que sur l'équipement européen JET localisé à Oxford (Angleterre) ou sur le TFTR de l'université de Princeton (États-Unis), sans parler de l'équipement dont son laboratoire, installé à l'École Polytechnique à Palaiseau (France), dispose. Cette expérience unique complétée par des collaborations suivies avec les équipes de l'université de Californie à Berkeley ou de l'Institut de physique appliquée de l'Académie des sciences de Russie qui travaillent sur l'interaction laser-plasma ou la physique des réacteurs plasma pour les nanotechnologies, est la meilleure garantie de la pertinence des choix thématiques et des exemples illustratifs qu'il a retenus. Il est en effet un des meilleurs spécialistes mondiaux susceptibles de nous proposer une vision cohérente, actualisée et complète de la discipline qui est la sienne.

Pour toutes ces raisons, je souhaite la meilleure diffusion à cet ouvrage qui me semble pouvoir répondre pleinement à l'une de ses ambitions : éveiller et retenir l'intérêt et l'attention de quelques-uns des meilleurs esprits des futures générations d'étudiants qui voudront, au cours de ce siècle, participer aux formidables aventures scientifiques et techniques qui se profilent dans plusieurs domaines clés (énergie, matériaux innovants, nanotechnologies...) et qui auront un grand besoin de physiciens des plasmas de grande qualité.

Bernard Bigot

Haut-commissaire à l'énergie atomique

Avant-propos

Présenter un exposé synthétique et moderne, utilisable avec profit par les étudiants, de la physique des plasmas au stade actuel de son développement, est une entreprise assez périlleuse. Une telle entreprise nécessite un choix critique : (i) pour identifier, au-delà des modes, ce qui restera fondamental et fondateur au cœur de la discipline, (ii) pour se défaire, au-delà des routines, des sujets traditionnels que les développements récents ont rendu obsolètes ; pour finalement, ramasser et rassembler ce qui semble être l'essence et l'essentiel de la discipline. La délimitation d'un périmètre et le choix d'un centre doivent alors être menés avec le souci d'ordonner et d'équilibrer ces éléments ; en effet, si l'identité de la discipline est déterminée par son cœur, ce sont sur ses marges que se situe le mouvement, découvertes et inventions.

Les plasmas constituent l'essentiel de l'environnement terrestre au-delà de la haute atmosphère ; à l'échelle cosmique plus de 99,9 % de la matière visible se présente sous forme ionisée. Ainsi, la physique des plasmas est l'outil essentiel pour étudier notre environnement au-delà des couches basses de l'atmosphère ; en particulier, les structures et les processus tels que : les aurores boréales, le vent solaire, les queues de comètes, les bras galactiques, les magnétosphères, la couronne solaire, les éruptions solaires, les atmosphères et intérieurs stellaires, l'émission des nébuleuses et des pulsars, relèvent de la physique des plasmas.

Au-delà de son intérêt en tant qu'outil de référence pertinent pour l'étude des problèmes d'astrophysique et de physique spatiale, la physique des plasmas se situe en amont d'un vaste champ d'applications technologiques. Par exemple, dans les domaines des hautes technologies que sont les nanotechnologies et l'exploration spatiale. Plus de la moitié des opérations de fabrication des processeurs et mémoires sont effectuées dans des *réacteurs plasmas*, et les *propulseurs plasmas* sont actuellement considérés comme la seule option pour une mission habitée vers Mars. Au cours de ces dernières années la pénétration des *procédés plasmas* dans les processus industriels a augmenté de façon extrêmement rapide et les *technologies plasmas*

sont devenues indispensables aussi bien dans des domaines innovants comme les nouveaux matériaux, les composants électroniques, la propulsion spatiale et les technologies de dépollution, que dans des domaines plus classiques tels que l'éclairage, la sidérurgie ou la chimie.

Enfin, la physique des plasmas est l'outil essentiel pour concevoir et comprendre les différents systèmes mis en œuvre dans le cadre des programmes de recherche sur la fusion thermonucléaire : fusion inertielle et fusion par confinement magnétique dans les réacteurs tokamaks.

Il est ainsi d'usage de structurer la recherche en physique des plasmas en trois grandes communautés et de distinguer respectivement : (i) la physique des décharges et des gaz faiblement ionisés, (ii) la physique des plasmas thermonucléaires et (iii) la physique des plasmas naturels. Ces trois communautés de recherches ont en commun un ensemble d'outils, de méthodes et de résultats constituant la physique des plasmas.

Ce cours, à vocation généraliste, est construit autour de l'ensemble de ces connaissances et résultats communs ou connexes. Il peut être adopté comme manuel de base aux niveaux L3 et M1 ou comme monographie de référence au niveau M2 pour les ingénieurs et chercheurs confrontés à des problèmes de physique des plasmas.

Cet ouvrage s'adresse donc aux étudiants en Master et Licence (L3) ainsi qu'aux élèves des Écoles d'Ingénieurs. Il est issu d'un cours professé ces dernières années devant différents auditoires : à l'université de Paris XI (Magistère de physique fondamentale, M1 de physique appliquée, L3 de mécanique physique et M2 de physique des plasmas), à l'École Normale Supérieure de Cachan (L3 EEA), à l'École Polytechnique (M2 de physique des plasmas), à l'École Supérieure d'Électricité (L3) et à l'École Centrale Paris (M1 MAE et physique appliquée).

Les concepts et méthodes de la physique des plasmas sont présentés ici en cherchant à concilier deux objectifs différents : (i) d'une part, présenter aux élèves et étudiants qui en resteront là avec cette discipline, ce qu'est cette science et les sensibiliser à l'importance des plasmas qui sont aux traitements de l'énergie et des matériaux ce que les semi-conducteurs sont au traitement du signal ; (ii) d'autre part, donner une solide formation de base à ceux qui, dans la recherche, l'enseignement, ou l'industrie, seront amenés à pratiquer cette discipline, formation mettant en évidence les concepts centraux et leurs articulations décisives avec les méthodes spécifiques d'approche des problèmes en physique des plasmas. Ainsi deux lectures sont offertes, les sept premiers chapitres répondent au premier objectif et la totalité des dix au deuxième ; le premier chapitre étant essentiellement de nature descriptive et historique et le deuxième étant formé de rappels d'hydrodynamique, d'électrodynamique et de physique statistique.

Orsay, mai 2005

Table des matières

CHAPITRE 1 • ÉLECTRONS, IONS ET PLASMAS	1
1.1 Physique des plasmas	1
1.1.1 Environnement	2
1.1.2 Origines et histoire	7
1.1.3 Ordres de grandeur	10
1.2 Technologie des plasmas	15
1.2.1 Réacteurs	20
1.2.2 Tokamaks	24
1.2.3 Propulseurs	29
CHAPITRE 2 • CHAMPS, PARTICULES ET FLUIDES	36
2.1 Électrodynamique	37
2.1.1 Conduction et diffusion	40
2.1.2 Polarisation et magnétisation	48
2.2 Physique statistique	55
2.2.1 Fonctions de distribution	55
2.2.2 Hiérarchie de Bogolioubov	58
2.2.3 Distribution de Maxwell	61
2.3 Hydrodynamique	65
2.3.1 Théorème de Lagrange	66
2.3.2 Équation d'Euler	69
CHAPITRE 3 • PHÉNOMÈNES COLLECTIFS	74
3.1 Perturbation électronique	77
3.1.1 Fréquence de Langmuir	77
3.1.2 Éclatement coulombien	79

3.2	Écrantage électrique	81
3.2.1	Longueur de Debye	81
3.2.2	Sphère de Debye	85
3.3	Écrantage magnétique	86
3.3.1	Longueur de London	86
3.4	Perturbation magnétique	89
3.4.1	Vitesse d'Alfvén	89
3.4.2	Onde d'Alfvén	91
3.5	Perturbation ionique	93
3.5.1	Ondes acoustiques	93
3.5.2	Vitesse de Bohm	94
3.6	Relaxation électronique	96
3.6.1	Temps de Maxwell	96
3.6.2	Longueur de Kelvin	98
CHAPITRE 4 • COLLISIONS ET RÉACTIONS		102
4.1	Section efficace	102
4.1.1	Section efficace de réaction	102
4.1.2	Section efficace de diffusion	104
4.1.3	Libre parcours moyen	105
4.2	Collisions élastiques	108
4.2.1	Diffusion élastique	108
4.2.2	Diffusion Rutherford	112
4.2.3	Interaction électron-atome	118
4.3	Collisions inélastiques	124
4.3.1	Seuil de réaction	124
4.3.2	Ionisation et réactivité	125
4.4	Théorie du libre parcours moyen	134
4.4.1	Viscosité, mobilité, diffusion	134
4.4.2	Coefficients de Townsend	140
CHAPITRE 5 • INTERACTIONS CHAMPS-PARTICULES		147
5.1	Mouvement cyclotronique	148
5.1.1	Rayon de Larmor	148
5.1.2	Moment magnétique	150
5.1.3	Force diamagnétique	151
5.2	Dérives électromagnétiques	154
5.2.1	Dérives électriques	154
5.2.2	Dérives magnétiques	156
5.3	Force pondéromotrice	166
5.3.1	Champ longitudinal	166
5.3.2	Champ transverse	167
5.4	Invariants adiabatiques	168
5.4.1	Intégrale d'action	168
5.4.2	Invariant longitudinal	172
5.4.3	Invariant de flux	174

CHAPITRE 6 • DYNAMIQUE ET STRUCTURES ÉLECTRIQUES	179
6.1 Modèles cinétiques et fluides	180
6.1.1 Réduction fluide	180
6.1.2 Nombre de Knudsen	184
6.2 Mobilité, diffusion, ionisation	189
6.2.1 Mobilité et diffusion	189
6.2.2 Loi de Paschen	194
6.2.3 Ondes d'ionisation	202
6.3 Structures quasi-neutres	205
6.3.1 Diffusion ambipolaire	205
6.3.2 Modèles de Schottky	208
6.3.3 Modèle de Tonks-Langmuir	213
6.4 Gaines ioniques	215
6.4.1 Critère de Bohm	215
6.4.2 Lois de Child-Langmuir	217
CHAPITRE 7 • DYNAMIQUE ET STRUCTURES MAGNÉTIQUES	225
7.1 Magnétohydrodynamique	225
7.1.1 Réduction MHD	225
7.1.2 Pression magnétique	230
7.2 Diffusion magnétique	234
7.2.1 Nombre de Reynolds	234
7.2.2 Diffusion du plasma	236
7.2.3 Diffusion du champ	237
7.3 Théorèmes d'Alfvén	239
7.3.1 Théorème du flux	239
7.3.2 Théorème du gel	241
7.4 Équilibres MHD	245
7.4.1 Équilibre MHD	245
7.4.2 Équilibres cylindriques	246
7.5 Hélicité et topologie	250
7.5.1 Enlacement	250
7.5.2 Équilibres sans forces	254
CHAPITRE 8 • ONDES, OSCILLATIONS ET RÉSONANCES	258
8.1 Ondes électromagnétiques	258
8.1.1 Résonances hybrides	260
8.1.2 Vecteur de Poynting	265
8.1.3 Vitesse de groupe	276
8.2 Modes électroniques et ioniques	279
8.2.1 Photons, plasmons, phonons	280
8.2.2 Modes électroniques magnétisés	284
8.2.3 Modes ioniques magnétisés	291
8.2.4 Coupures et résonances	294

8.3	Irréversibilité et non-linéarités	297
8.3.1	Absorption Landau	297
8.3.2	<i>Bremsstrahlung</i> inverse	300
8.3.3	Absorption résonante	303
8.3.4	Génération de plasmons	305
CHAPITRE 9 • COLLISIONS, RELAXATION ET TRANSPORT		309
9.1	Systèmes markoviens	310
9.1.1	Probabilités de transition	310
9.1.2	Équation de Boltzmann	313
9.1.3	Équation de Fokker-Planck	316
9.2	Interaction particules-particules	321
9.2.1	Transfert d'énergie-impulsion	322
9.2.2	Équation de Landau	328
9.2.3	Équation de l'EEDF	331
9.3	Processus cinétiques	334
9.3.1	Ralentissements	334
9.3.2	Isotropisation	338
9.3.3	Alphas thermonucléaires	341
9.3.4	Électrons relativistes	344
9.4	Fluctuations et turbulence	346
9.4.1	Relation de Green-Kubo	346
9.4.2	Collisions et turbulence	348
CHAPITRE 10 • ADIABATICITÉ, RÉSONANCES ET CHAOS		353
10.1	Systèmes hamiltoniens	353
10.1.1	Équations de Hamilton	353
10.1.2	Intégrale d'action	358
10.1.3	Invariants de Poincaré	364
10.2	Intégrabilité	368
10.2.1	Transformations canoniques	368
10.2.2	Variables angles et actions	370
10.2.3	Relation d'Einstein	375
10.2.4	Interactions électromagnétiques	377
10.3	Adiabaticité	386
10.3.1	Perturbations adiabatiques	387
10.3.2	Dérives et forces séculaires	390
10.3.3	Confinement magnétique	394
10.4	Résonances	397
10.4.1	Résonances linéaires	397
10.4.2	Résonances Landau	399
10.4.3	Résonances cyclotron	403
10.5	Chaos	407
10.5.1	Critère de Chirikov	407
10.5.2	Transition vers le chaos	410
10.5.3	Équation quasi-linéaire	414
INDEX		423

Chapitre 1

Électrons, ions et plasmas

Salviati. - L'activité constante que vous autres vénitiens déployez dans votre célèbre arsenal est une source inépuisable d'interrogations et de recherches pour l'esprit curieux, spécialement les travaux impliquant la mécanique ;... Sagredo. - Tout à fait. Moi-même, curieux par nature, je visite souvent ce lieu pour le simple plaisir d'observer..
Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze,
G. Galilei

1.1 PHYSIQUE DES PLASMAS

La matière constituant notre environnement proche se présente essentiellement sous forme solide, liquide ou gazeuse. Au-delà de ces trois états, à haute et à basse températures, deux nouveaux types d'états, les « *gaz quantiques* » et les « *gaz ionisés* », se distinguent par l'apparition d'une grande diversité de phénomènes physiques nouveaux :

- à très basse température, les états supraconducteur, superfluide ainsi que les condensats de Bose-Einstein présentent une richesse de comportements associée aux corrélations et aux phénomènes d'échange et de cohérence quantiques ;
- à très haute température, la dissociation puis l'ionisation conduisent à la création de populations d'ions et d'électrons libres et ces charges libres induisent un comportement collectif, non-linéaire, chaotique et turbulent.

On appelle « *plasma* » ou « *gaz ionisé* » cet état exotique de la matière contenant une fraction significative de charges libres ; l'ensemble des concepts, méthodes et résultats propres à l'étude de cet état de la matière constitue la « *physique des plasmas* ». La physique des plasmas intègre les connaissances de nombreux autres domaines de la physique, tels que la physique statistique, la dynamique hamiltonienne, l'électrodynamique relativiste, les physiques atomique, moléculaire et nucléaire ; réciproquement, de nombreux concepts et méthodes, issus de recherches fondamentales en physique des plasmas, ont été intégrés par d'autres disciplines, plus particulièrement en physique non-linéaire, chaos et turbulence, interaction champs-particules et théories des instabilités.

1.1.1 Environnement

Les océans, les continents et l'atmosphère, ne sont pas des plasmas ; ils se présentent sous formes fluides et solides neutres. La croûte, le manteau et le noyau terrestre sont constitués principalement de fer, d'oxygène, de silicium et de magnésium sous forme solide et liquide. L'atmosphère terrestre est composée essentiellement d'azote et d'oxygène, sous forme gazeuse neutre et, en quantités minimes, de gaz rares. Enfin, pour ce qui concerne les océans, ils sont formés d'eau, contenant, en proportions minimes, des sels minéraux, principalement des halogénures alcalins et alcalino-terreux. Le tableau (1.1) rappelle l'abondance des principaux éléments présents dans notre environnement, les pourcentages se réfèrent à la masse totale pour la terre et au volume totale pour l'atmosphère.

Tableau 1.1

Éléments	[%] de la masse	Éléments	[%] du volume
Fe	35 – 40	N ₂	78
O	28 – 30	O ₂	21
Si	15 – 17	Ar	0,93

Cette analyse rapide de notre environnement proche pourrait laisser croire que la phase *plasma* est totalement absente à l'état naturel ; au contraire, les plasmas constituent l'essentiel de notre environnement au delà de la haute atmosphère. En effet, à l'échelle cosmique, plus de 99,9% de la matière visible se présente sous forme ionisée, en phase plasma.

Une analyse plus fine de la constitution de l'atmosphère montre qu'une faible proportion d'ions libres est déjà présente au niveau des couches basses de l'atmosphère ; la proportion de cette composante chargée est variable, l'ordre de grandeur du nombre moyen d'ions par centimètre cube en fonction de l'altitude est donné dans le tableau (1.2).

Tableau 1.2

Altitude [km]	Ions positifs [cm^{-3}]	Ions négatifs [cm^{-3}]
0.5	~ 800	~ 700
2	~ 600	~ 500
5	~ 2500	~ 2000

Les agents énergétiques à l'origine de ce faible niveau d'ionisation sont : les rayons cosmiques, la radioactivité naturelle et les phénomènes d'électrisation atmosphérique, liés principalement aux processus triboélectriques ; ainsi que le reliquat de rayonnement solaire ultraviolet dur présent à basse altitude. Cependant, les couches basses de l'atmosphère ne constituent pas un plasma compte tenu de leur faible niveau d'ionisation ; en effet, un tel niveau n'induit pas un comportement collectif, ni une réactivité significative. La physique de l'atmosphère relève donc de la mécanique et de la thermique des fluides classiques. Par contre, à partir d'une altitude de l'ordre d'une centaine de kilomètres, le rayonnement ultraviolet du soleil entretient une structure ionisée dont l'étude relève de la physique des plasmas : l'ionosphère. À une telle altitude, la densité de particules chargées atteint des valeurs supérieures à plusieurs dizaines de milliers d'électrons et d'ions par centimètre cube ; ces charges libres constituent la population à l'origine des propriétés électromagnétiques et physico-chimiques originales de ces couches de la très haute atmosphère. Au-delà de l'ionosphère, c'est-à-dire à partir d'une altitude de l'ordre du millier de kilomètres, s'étend la magnétosphère : un plasma magnétisé structuré par le champ magnétique dipolaire terrestre et alimenté en espèces chargées par le vent solaire. Le comportement de l'ionosphère est dominé par une forte réactivité chimique et relève donc aussi de la physico-chimie des plasmas ; par contre, les phénomènes électrodynamiques et magnétohydrodynamiques sont au coeur de la dynamique de la magnétosphère.

Au-delà de la magnétosphère s'étend l'espace interplanétaire, rempli aussi par un plasma : le vent solaire, issu des couches externes du soleil ; le soleil est aussi une sphère de gaz ionisée structurée en différentes couches. Le tableau (1.3) présente l'ordre de grandeur des caractéristiques (très variables) de densité électronique, n_e , et de température électronique, T_e , de ces différents plasmas spatiaux.

Tableau 1.3

Plasmas spatiaux	n_e [cm^{-3}]	T_e [K]
Ionosphère	$10^3 - 10^6$	$10^2 - 10^3$
Couronne Solaire	$10^4 - 10^8$	$10^4 - 10^6$
Vent Solaire	$\sim 10^{1/2}$	$\sim 10^5$

Au-delà du système solaire, les étoiles, quels que soient leurs types, sont essentiellement des sphères de plasma et les espaces interstellaires et intergalactiques sont aussi remplis de particules chargées en interaction électromagnétique ; le tableau (1.4) présente quelques ordres de grandeurs typiques des paramètres densité et température de ces plasmas astrophysiques.

Tableau 1.4

Plasmas astrophysiques	n_e [cm ⁻³]	T_e [K]
Intérieurs stellaires	$10^{25} - 10^{32}$	$10^7 - 10^8$
Espaces Interstellaires	$10^{-3} - 1$	$10^2 - 10^3$
Espaces Intergalactiques	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^5$

En conclusion, bien que notre environnement proche soit formé de matière neutre sous forme liquide, solide et gazeuse ; à grande échelle, les plasmas constituent l'essentiel de l'environnement terrestre et la physique des plasmas s'impose comme l'outil de référence pour étudier cet environnement au-delà des couches basses de l'atmosphère. En particulier, les structures et les processus tels que : les aurores boréales, le vent solaire, les queues de comètes, les bras galactiques, les magnétosphères, la couronne solaire, les éruptions solaires, les atmosphères et intérieurs stellaires, l'émission électromagnétique des nébuleuses gazeuses et des pulsars, etc. relèvent de la physique des plasmas ; la figure 1.1 présente quelques données typiques de ces structures spatiales et astrophysiques.

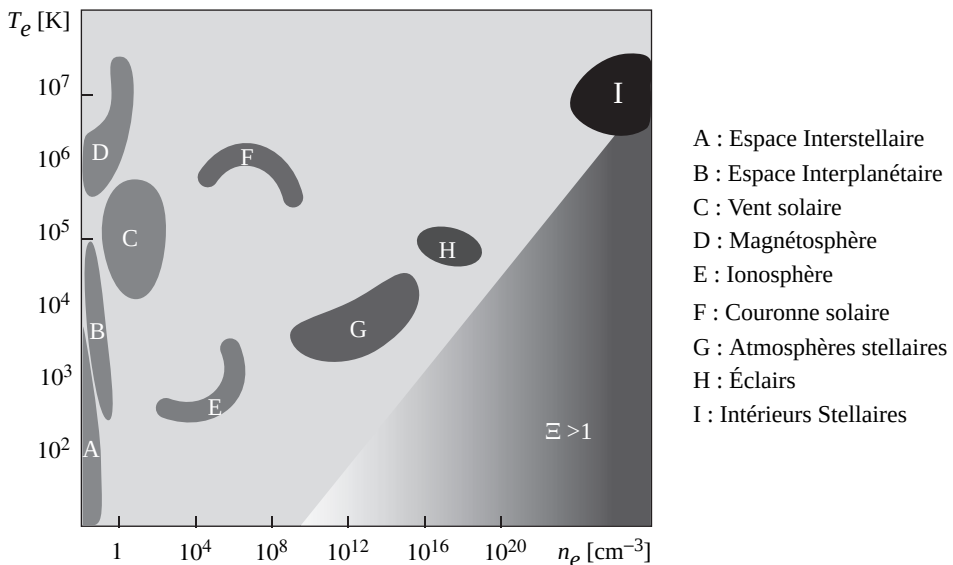


Figure 1.1 Densités et températures électroniques des principaux plasmas naturels.

Face à l'extrême diversité des conditions de densité et température de ces structures, il pourrait sembler difficile d'envisager l'étude de l'ionosphère, de la magnétosphère, du vent solaire, de la couronne solaire, des intérieurs stellaires, des atmosphères stellaires, etc. à l'aide d'un outil unique. Malgré cette difficulté apparente, la physique des plasmas se révèle pertinente pour l'étude de l'ensemble de ces objets et constitue un vaste champ de connaissances structuré autour d'un ensemble de concepts, méthodes et résultats fondamentaux permettant l'étude de systèmes aussi variés ; l'objectif de cet ouvrage est de présenter ces concepts, méthodes, outils et résultats.

Au-delà de son intérêt en tant qu'outil de référence pertinent pour l'étude des problèmes d'astrophysique et de physique spatiale, la physique des plasmas se situe aussi en amont d'un vaste champ d'applications technologiques ; par exemple, dans les domaines des hautes technologies que sont la micro-électronique et l'exploration spatiale : plus de la moitié des opérations de fabrication des processeurs et mémoires sont actuellement effectuées dans des *réacteurs plasmas* et les *propulseurs plasmas* sont considérés comme l'option la plus pertinente pour une mission habitée vers Mars.

Au cours de ces dernières années, la pénétration des *procédés plasmas* dans les processus industriels a augmenté de façon extrêmement rapide ; bien qu'elles ne soient pas encore identifiées en tant que secteur industriel spécifique, les *technologies plasmas* sont devenues indispensables aussi bien dans des domaines innovants comme les nouveaux matériaux, les nanotechnologies et la propulsion spatiale, que dans des domaines plus classiques tels que la sidérurgie, l'éclairage ou la chimie.

Enfin, au-delà des applications industrielles, la physique des plasmas est l'outil essentiel pour comprendre les différents systèmes expérimentaux mis en œuvre dans le cadre des programmes de recherche sur la fusion thermonucléaire ; la fusion nucléaire du deutérium et du tritium en phase plasma constituant la seule option, à long terme, pour palier à l'épuisement des ressources en énergie fossile. La figure 1.2 présente quelques valeurs typiques de densités et températures de ces plasmas thermonucléaires et industriels.

L'usage est de structurer les recherches en physique des plasmas en trois grandes communautés et de distinguer respectivement :

- la physique des plasmas industriels,
- la physique des plasmas thermonucléaires,
- la physique des plasmas naturels, spatiaux et astrophysiques.

Ces trois communautés de recherche ont en commun un ensemble d'outils, de méthodes et de résultats constituant la physique des plasmas. Cet ouvrage, à vocation généraliste, est construit autour de l'ensemble des connaissances et résultats communs à ces trois communautés.

Ces trois communautés ont aussi en commun une histoire, car l'état des connaissances actuelles en physique des plasmas résulte d'un processus de développement historique lié à l'évolution de notre compréhension de la structure de la matière et au développement de notre maîtrise des phénomènes électriques, magnétiques et optiques. La théorie des plasmas s'appuie donc sur la théorie électromagnétique des phénomènes électriques, magnétiques et optiques, ainsi que sur la théorie atomique de la structure de la matière.

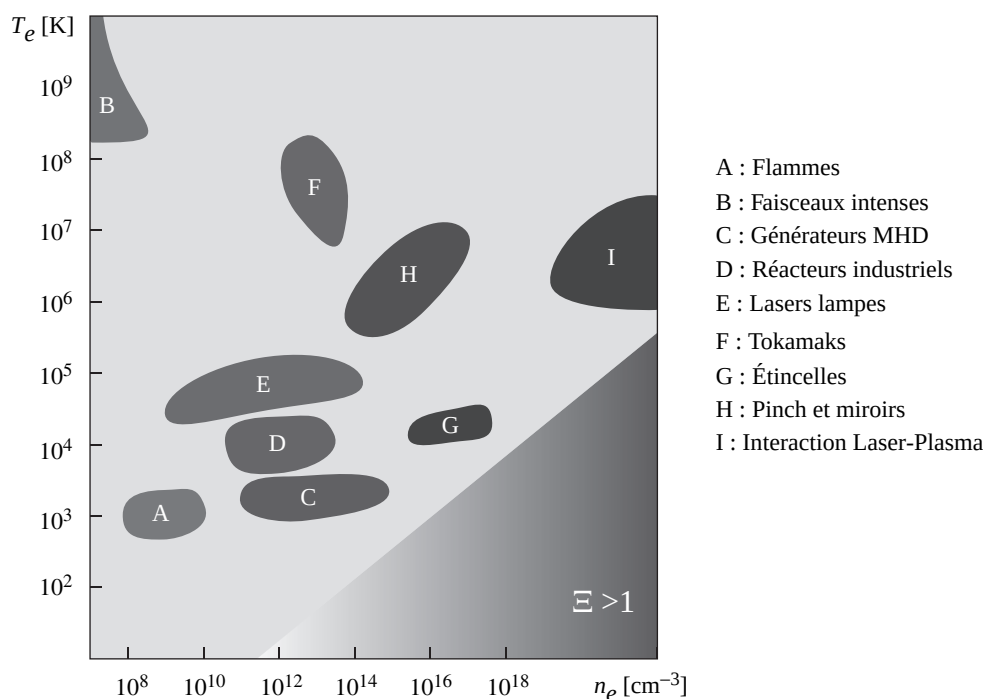


Figure 1.2 Densités et températures électroniques de quelques plasmas thermonucléaires et industriels.

L'achèvement de l'électrodynamique, à la fin du XIX^e siècle, et la construction du modèle atomique de la matière, au début du XX^e siècle, ont permis le développement de la physique des plasmas à travers un processus d'identification de problèmes, d'expérimentation, de modélisation, de découvertes et d'inventions étalé sur ces quatre-vingt dernières années ; ce processus est encore à l'œuvre et la physique des plasmas constitue aujourd'hui une discipline majeure, importante et productive, au sein de la physique moderne. Afin de préciser l'identité de cette discipline, rappelons les différentes étapes de la construction de l'électrodynamique et de la théorie atomique de la matière.

1.1.2 Origines et histoire

La publication, en 1600, du traité de magnétisme de Gilbert constitue l'acte fondateur de ce qui, trois siècles plus tard, allait devenir l'électromagnétisme. Dans ce traité, Gilbert explique l'orientation et la déclinaison de l'aiguille de boussole en assimilant la terre à un dipôle magnétique ; dans ce même traité, il utilise pour la première fois le mot *électricité* pour qualifier les phénomènes d'attraction et de répulsion associés à l'électrisation par triboélectricité. L'histoire ultérieure du développement de l'électrodynamique, au cours des XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles, verra successivement le développement de l'optique, de l'électrostatique, puis de la magnétostatique et enfin de l'électrodynamique. L'unification de la description des phénomènes électriques, magnétiques et optiques, dans le cadre de l'électrodynamique de Maxwell, achève la construction de cette discipline dès la fin du XIX^e siècle. Les principales étapes de cette synthèse remarquable, étalée sur trois siècles, sont rappelées ici.

Dès 1609, Galilée en Italie et Kepler à Prague mettent au point la lunette astronomique. Cette invention est l'aboutissement des progrès constants des technologies de fabrication des lentilles optiques. Malgré l'impact de cette invention, son étude ne débouche pas sur la formulation des lois de la réfraction. Il faut attendre Descartes, en 1637, pour que soient enfin formulées les lois fondamentales de l'optique géométrique permettant de mettre en place la théorie des instruments d'optique. Descartes, afin d'interpréter les lois qui désormais portent son nom, construit une théorie corpusculaire de la lumière. C'est aussi une interprétation corpusculaire de la lumière que met en avant Newton, en 1672, lorsque, sur la base d'une série d'expériences de décomposition et de synthèse, il présente une théorie des couleurs et des phénomènes d'irisation associés à la dispersion dans les milieux transparents. Quelques années plus tard, en 1678, Huyghens propose une interprétation de la lumière en terme de vibrations et montre qu'un tel modèle permet de décrire correctement les phénomènes de propagation et de réfraction. Le XVII^e siècle s'achève sur la confrontation de ces deux théories de la lumière, corpusculaire et ondulatoire, en apparence contradictoires, mais que la physique moderne rendra complémentaires.

Les phénomènes optiques ayant trouvé une interprétation dans un (deux) cadre(s) théorique(s) durant le XVII^e siècle, l'effort des savants du XVIII^e siècle s'est principalement porté sur l'étude des phénomènes électriques. Ainsi, dès 1740, l'abbé Nollet publie son célèbre traité de physique et d'électricité présentant une classification de l'ensemble des phénomènes électriques identifiés à l'époque ; mais il faut attendre 1785 pour que ces phénomènes électrostatiques trouvent une interprétation dynamique en terme de charges électriques et de forces entre ces charges. En effet, Coulomb, à l'aide de la balance de torsion mise au point quelques années auparavant, établit la loi d'attraction et de répulsion des charges électriques en fonction de leur distance ; cette (électro)dynamique permet alors d'interpréter les phénomènes d'électrostatique des conducteurs et des isolants. Cependant, à cette époque, les générateurs électrostatiques, utilisant la triboélectricité, constituaient les seules sources de

courant et tension et les procédés de stockage des charges étaient essentiellement des condensateurs (les bouteilles de Leyde) de mauvaise qualité. Les performances médiocres de ces appareils limitaient toute perspective de développement expérimental pour explorer les propriétés des courants électriques.

Vers 1790, le physiologiste Italien Galvani, étudiant des phénomènes d'électrophysiologie associés à la contraction de cuisses de grenouilles, proposa une explication basée sur l'électricité atmosphérique ; mais c'est à Volta, en 1800, que revient le mérite de l'identification de l'origine de ces contractions. Volta remarqua que ces phénomènes nécessitent l'utilisation de deux métaux de nature différente.

Partant de cette observation, il construit la première pile électrique en empilant des rondelles de métaux différents séparées par des rondelles de drap imbibé de solution saline. Un tel dispositif, appelé « *pile* » de par sa constitution, présente alors naturellement un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels s'écoule un courant électrique lorsque le circuit est fermé. Cette invention de la pile électrique allait permettre le développement d'expériences sur la dynamique des phénomènes électriques et magnétiques tout au long du XIX^e siècle.

En 1820, suivant en cela une intuition récurrente du lien entre électricité et magnétisme, le Danois Ørsted démontre, à l'aide d'une pile de Volta et d'une aiguille de boussole, que le passage d'un courant électrique engendre un champ magnétique ; l'année suivante Ampère met en place le formalisme permettant d'interpréter ce premier phénomène électrodynamique, réalisant ainsi la première synthèse théorique entre électricité et magnétisme. Puis, Faraday, en 1831, met en évidence le phénomène d'induction électromagnétique, démontrant que les champs magnétiques engendrent des champs électriques. L'unification de l'électricité et du magnétisme était ainsi achevée.

C'est à Maxwell que revient le mérite de parachever cet édifice en publiant en 1865 un système complet d'équations permettant d'interpréter et de modéliser l'ensemble des phénomènes électriques et magnétiques observés à l'époque. Cette synthèse finale, entre électricité et magnétisme, s'accompagne d'une unification encore plus vaste, englobant l'optique, puisque ces équations, dites de Maxwell, admettent des solutions décrivant des ondes se propageant à la vitesse de la lumière. En 1888, Hertz, utilisant un circuit électromagnétique oscillant (et une détection par plasma d'étincelle), produit et détecte de telles ondes, confirmant ainsi cette prédiction. Dès lors, la lumière est considérée comme une vibration transverse de nature électromagnétique et les résultats établis en 1815 par Fresnel, qui, pour construire une théorie dynamique de la réfraction et de la diffraction, avait utilisé l'hypothèse d'une vibration transverse de nature inconnue, se trouvent confirmés et précisés, la vibration transverse de Fresnel est donc de nature électrique.

Cette synthèse entre les phénomènes électriques, magnétiques et optiques, formalisée à travers le système des équations de Maxwell, est l'un des outils essentiels de la physique des plasmas.

La dynamique des plasmas ne se réduit pas à celle des champs électrique et magnétique, elle incorpore aussi l'étude du comportement des particules : électrons, ions, atomes et molécules. La construction du modèle atomique de la structure de la matière, permettant de comprendre les mécanismes de production des espèces chargées, est postérieure de plus d'un quart de siècle au développement de la théorie de l'électromagnétisme ; rappelons-en ici les principales étapes.

Bien que l'intuition atomiste ait été privilégiée de façon récurrente depuis l'Antiquité, il faut attendre 1785 pour que cette intuition soit formalisée dans le cadre de la construction d'une théorie opérationnelle du comportement de la matière ; en effet, à cette époque, Bernoulli construit une théorie cinétique des gaz où la notion de pression, clairement identifiée et formulée depuis Pascal et Torricelli, est interprétée dans un cadre mécaniste microscopique. Durant le XIX^e siècle la physique des milieux dilués progresse rapidement ; l'équation des gaz parfaits issue des travaux de Boyle, Mariotte et Gay Lussac trouve son interprétation mécanique dans le cadre d'une vision atomiste et constitue, durant la deuxième moitié du XIX^e siècle, le modèle de référence des développements de la thermodynamique.

Les progrès constants des techniques du vide et des technologies de soudure métal sur verre permettent alors l'étude des décharges électriques dans les gaz raréfiés emplissant des ampoules et tubes en verre et mènent naturellement vers l'étude de leur propriétés électriques et optiques. Le milieu du XIX^e siècle voit alors le développement de la physique des décharges électriques dans les gaz. Certes, les phénomènes d'étincelle et d'éclair, à pression atmosphérique, avaient été décrit depuis l'Antiquité, l'arc électrique inventé par Davy en 1813 et les décharges lumineuses décrites par Faraday en 1839 ; mais, les décharges électriques dans les gaz basse pression allait révéler, tout au long de la deuxième moitié du XIX^e siècle, l'essentiel des lois microscopiques régissant la structure de la matière, tout en permettant l'accumulation d'une phénoménologie extrêmement riche décrite par Hittorf, Geissler, Plücker, Crookes, Goldstein et bien d'autres. En effet, que ce soit la découverte de l'électron par J.J. Thomson en 1890, des rayons X par Röntgen en 1895, du rayonnement ultraviolet par Wiedemann la même année ou des séries spectrales de l'hydrogène à l'origine du modèle de Bohr, la physique, dite moderne, est principalement issue de l'effort d'interprétation du comportement et du rayonnement des décharges électriques dans les gaz basse pression.

En 1858, Plücker démontre expérimentalement la déflexion des rayons cathodiques par un champ magnétique ; ces études sont poursuivies en 1869 par Hittorf qui établit une classification systématique des décharges lumineuses. Dès 1871, Varley postule la nature particulière de ces rayons cathodiques. L'émission thermoionique est découverte par Edison en 1883 et, en 1886, Goldstein identifie la composante ionique des décharges ; enfin, en 1887, Hertz découvre l'effet photoélectrique. L'accumulation de données expérimentales sur les mécanismes d'émission électronique des surfaces métalliques et de production ionique dans les gaz basse pression génère