

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.

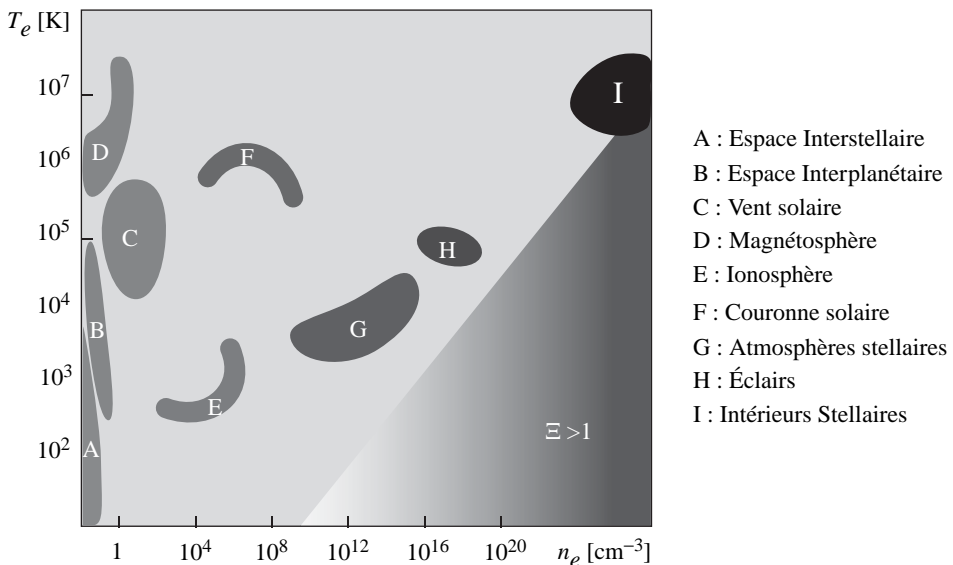


Figure 1.1 Densités et températures électroniques des principaux plasmas naturels.

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.

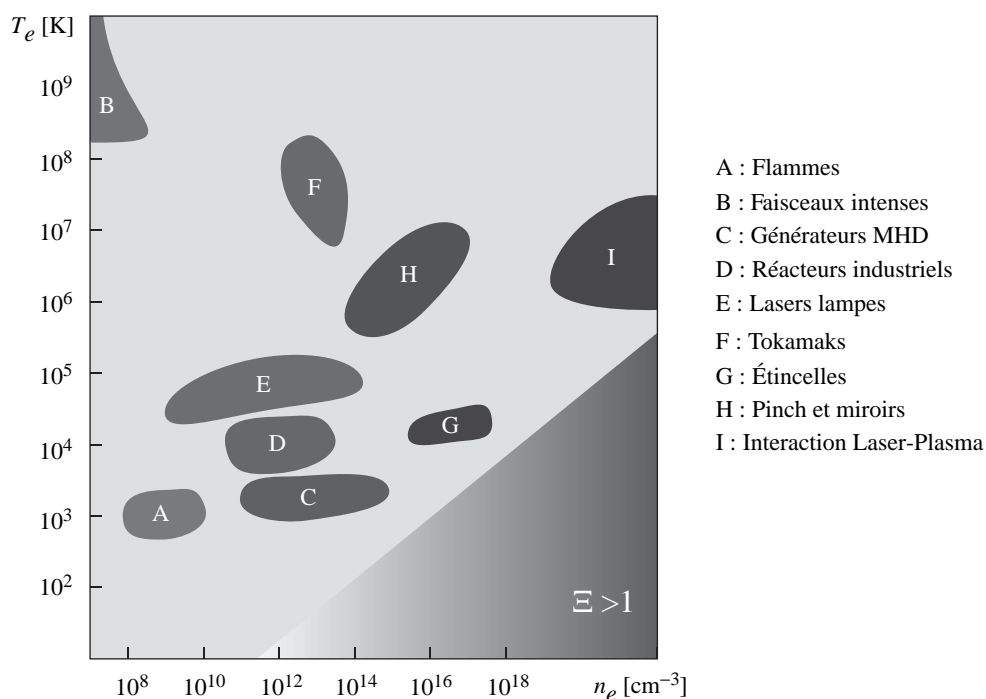


Figure 1.2 Densités et températures électroniques de quelques plasmas thermonucléaires et industriels.

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

un intense débat sur la nature de ces particules et l'interprétation de leur comportement. En 1891, Stoney introduit le terme électron et progressivement les théories électroniques de Lorentz (1895) et J.J. Thomson (1897) s'imposent comme le cadre cohérent et opérationnel d'interprétation des propriétés des gaz ionisés dans les décharges électriques. La structure électronique de l'ensemble des phases de la matière est ensuite élucidée, d'abord dans le cadre du modèle de Bohr-Sommerfeld, puis de la mécanique quantique, permettant, à partir de 1927, non seulement l'interprétation des données accumulées à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, mais aussi, l'élaboration d'un ensemble de prédictions sur les phases diluées et condensées, qui se verront confirmées durant la deuxième moitié du XX^e siècle.

Mais, il serait faux de croire que la physique des plasmas est issue de la seule tradition expérimentale de physique des décharges électriques dans les gaz. En effet, bien que Langmuir, dans le cadre d'études de physique des décharges, ait, en 1923, proposé pour la première fois le mot *plasma* pour désigner l'état ionisé de la matière, le développement historique de la physique des plasmas doit aussi beaucoup à l'astrophysique et à la physique spatiale ; en particulier, aux travaux de Alfvén au milieu du XX^e siècle et aux études sur l'environnement terrestre à haute altitude. En 1901, Marconi réussit la première expérience de télécommunication hertzienne transatlantique. L'interprétation de ce succès stimula les études sur les propriétés de la haute atmosphère, en particulier, sur leur propriété de réflexion des ondes électromagnétiques basse fréquence. Dès les années vingt, ces études amènent Heaviside et Kennelly à postuler l'existence d'une couche de gaz ionisé au delà de la stratosphère, puis les travaux de Appleton et Hartree confirment et précisent l'existence de cette couche : l'ionosphère. La magnétosphère sera ensuite étudiée à l'aide de satellites à la fin des années cinquante et la phase plasma est considérée comme le constituant essentiel de l'univers dès la deuxième moitié du XX^e siècle.

Enfin, l'identification de l'origine thermonucléaire de l'énergie solaire, proposée par Hootermans et Atkinson, rapidement acceptée grâce aux progrès de la physique nucléaire, conduisit, dès la fin des années cinquante, à la mise en place de vastes programmes de recherches, nationaux et internationaux, sur la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique ; les progrès constants des systèmes de chauffage et de confinement thermonucléaires dans les configurations magnétiques de type tokamak trouvent aujourd'hui leur concrétisation ultime dans le projet de réacteur expérimental international ITER.

1.1.3 Ordres de grandeur

Suivant en cela les autres branches de la physique, les physiciens des plasmas n'utilisent pas le système international d'unités et ont développé un système d'unités plus adapté aux ordres de grandeur rencontrés dans les plasmas ; ainsi, l'unité d'énergie n'est pas le joule mais l'électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Deux constantes fondamentales s'expriment partiellement en joules : la constante de Boltzmann k ,

possédant la dimension d'une entropie, et la constante de Planck h , possédant la dimension d'une action,

$$\text{Entropie : } k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, \quad \text{Action : } h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

l'électron-volt peut donc être converti en un temps ou en une température. Enfin, la vitesse de la lumière : $c = 2,99 \times 10^8 \text{ m/s}$, permet de convertir ce temps associé à l'électron volt en une longueur. La table de conversion de l'électron-volt, permettant de converser avec les autres disciplines, s'établit donc comme suit :

- Le thermodynamicien préfère exprimer une énergie à travers une température, la conversion s'effectue à l'aide de la constante de Boltzmann ; l'équivalent en température de l'électron-volt est donné par : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} / k = 11\,604 \text{ K}$.
- L'opticien, quant à lui, quantifie les énergies en termes de longueur d'onde, la conversion s'établit à l'aide de la constante de Planck et de la vitesse de la lumière, le résultat est alors donné par l'équivalence : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} / hc = 12\,398 \text{ Å}^{-1}$.
- Le chimiste préfère raisonner sur l'énergie associée à une mole de matière, $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ particules (Définition 2.19), et utilise plus volontiers les calories ; l'équivalent en calories par mole de l'électron-volt est alors donné par : $1 \text{ eV} = N_A \times 1,6 \times 10^{-19} / 4,18 = 23 \text{ kcal/mol}$.
- Enfin, le radio-électricien, plus accoutumé aux fréquences, travaille sur une telle échelle, la correspondance entre l'échelle d'énergie et l'échelle de fréquences étant donnée par l'équivalence : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} / h = 242 \text{ THz}$.

La table de conversion de l'électron-volt s'établit donc suivant le tableau 1.5 :

Tableau 1.5

K	Å ⁻¹	kcal/mol	THz
11604	12398	23	242

Tout procédé de production de plasma nécessite un apport conséquent d'énergie pour induire une ionisation significative. La matière froide, liquide, solide, ou gazeuse, portée à haute température subit d'abord un processus de vaporisation (pour les phases denses), puis de dissociation (pour les vapeurs moléculaires) et finalement d'ionisation, conduisant ainsi à la création de populations d'ions et d'électrons libres. Le tableau (1.6) présente les valeurs des énergies minimum de dissociation et d'ionisation pour quelques gaz diatomiques usuels.

Sur la base de cet ordering entre dissociation et ionisation, une production significative de particules chargées par élévation de température, précédée par une dissociation, peut être envisagée à partir de quelques dizaines de milliers de Kelvin.

Les valeurs des énergies d'ionisation, pour quelques éléments des trois premières lignes de la classification périodique, sont rappelée dans le tableau (1.7).

Tableau 1.6

Molécule	Dissociation [eV]	Ionisation [eV]
CO	11, 1	14, 0
H ₂	4, 47	15, 4
O ₂	5, 11	12, 0

L'augmentation du potentiel de première ionisation lorsque l'on suit une ligne de la classification périodique de la gauche vers la droite, des alcalins, alcalino-terreux vers les halogènes et gaz rares, s'explique aisément sur la base des règles de construction et de stabilité des couches atomiques. En effet, un alcalin perdant un électron retrouve une configuration à 8 électrons de valence (2 pour Li), de même, un gaz rare perdant un électron ne possède plus que 7 électrons de valence.

Tableau 1.7

Élément	Z	E_I [eV]
Li	3	5,392
Be	4	9,322
F	9	17,422
Ne	10	21,564

Élément	Z	E_I [eV]
Na	11	5,139
Mg	12	7,646
Cl	17	12,967
Ar	18	15,759

L'élévation de température n'est pas le seul procédé permettant d'obtenir un gaz ionisé. La création d'un plasma peut être envisagée à partir de tout procédé couplant, efficacement et rapidement, de l'énergie, en quantité suffisante pour induire une ionisation significative au sein d'une population atomique ou moléculaire neutre. De nombreux autres procédés, tels que

- l'ionisation par impact d'électrons énergétiques,
- l'absorption de photons énergétiques,

sont aussi couramment mis en oeuvre pour la production de plasma. Comme tout problème de physique, le problème de l'ionisation doit être abordé sous deux aspects : un aspect énergétique et un aspect entropique, c'est-à-dire statistique. Ce deuxième aspect est, entre autre, décrit par le degré d'ionisation, α , défini comme le rapport de la densité électronique n_e sur la densité totale d'électrons et d'espèces (neutres) non ionisées n_n .

$$\alpha \equiv \frac{n_e}{n_e + n_n} = \frac{Zn_i}{Zn_i + n_n}$$

Ce paramètre permet de distinguer :

- les plasmas faiblement ionisés, $\alpha < 1$, par exemple les plasmas industriels et l'ionosphère,
- des plasmas fortement ionisés, $\alpha \approx 1$, par exemple les plasmas thermonucléaires et les plasmas stellaires.

Partant de la définition élémentaire d'un plasma comme un ensemble de charges positives et négatives en interactions coulombiennes mutuelles, une intuition physique primaire pourrait nous amener à conclure que la dynamique d'un tel ensemble doit être un simple collapse coulombien : la recombinaison des électrons avec les ions donnant un fluide neutre. Une telle image est totalement fautive et ne prend pas en compte deux éléments essentiels, contradictoires en apparence mais complémentaires en dernière analyse :

- une tendance au désordre due à l'agitation thermique,
- une tendance à l'organisation due à l'aspect dynamique et collectif de l'interaction coulombienne.

Nous verrons que l'agitation thermique et surtout la faible réactivité due à des contraintes cinématiques, expliquent la lenteur des recombinaisons ; le transport des espèces aux parois, pour les plasmas de laboratoire, ou le rayonnement, pour les plasmas astrophysiques, possèdent des échelles de temps beaucoup plus rapides ; la recombinaison dans de telles conditions n'est donc pas dominante. Le compromis entre une tendance au désordre, due à l'agitation thermique, et une tendance à l'organisation, due à l'aspect collectif de l'interaction coulombienne, peut être quantifié par un paramètre sans dimension, le *paramètre plasma* ou paramètre de couplage Ξ . Considérons un plasma de densité électronique n et de température électronique T . L'ordre de grandeur de la densité volumique d'énergie cinétique moyenne, $\langle E_c \rangle$, est donné par : $\langle E_c \rangle \approx 3nkT/2$. Ce premier nombre est une mesure de l'agitation thermique et du contenu en énergie incohérente. L'ordre de grandeur de la densité volumique d'énergie potentielle électrostatique, $\langle E_p \rangle$, a pour valeur $|\langle E_p \rangle| \approx ne^2/4\pi\epsilon_0 n^{-\frac{1}{3}} = n^{\frac{4}{3}}e^2/4\pi\epsilon_0$. Ce deuxième nombre est une mesure de l'énergie d'interaction coulombienne disponible dans le milieu pour organiser des structures ordonnées tel qu'un cristal ionique. Le rapport de ces deux nombres définit le paramètre de couplage Ξ ou paramètre plasma.

$$\Xi \equiv \frac{|\langle E_p \rangle|}{\langle E_c \rangle} \approx 10^{-5} \left[\frac{n}{10^{12} \text{cm}^{-3}} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{T}{10^6 \text{K}} \right]^{-1}$$

Ce paramètre permet de distinguer :

- les plasmas faiblement couplés, *cinétiques* ou *idéaux*, $\Xi \ll 1$, où le désordre domine,
- des plasmas fortement couplés ou *fortement corrélés*, $\Xi \geq 1$, dont la structure est de nature fluide voir cristalline, c'est-à-dire plus ou moins ordonnée.

L'essentiel des méthodes et résultats présentés dans cet ouvrage sont relatifs aux plasmas dits faiblement couplés, idéaux ou cinétiques, tels que $\Xi < 1$. La majorité des plasmas naturels, industriels et de laboratoire entre dans cette catégorie et vérifie le critère d'idéalité $\Xi < 1$ comme le montrent clairement les figures 1.1 et 1.2. La physique des plasmas dits fortement corrélés ($\Xi > 1$) relève de la physique des milieux condensés et est beaucoup moins riche en terme d'instabilités, de chaos et de turbulence, elle ne sera pas abordée dans ce cours et l'usage est d'entendre par physique des plasmas la physique des plasmas idéaux. Pour les plasmas idéaux, le fait que l'essentiel de l'énergie soit sous forme cinétique pourrait nous amener à conclure que la physique des plasmas n'est qu'une branche de la physique des gaz où le potentiel interparticulaire est coulombien. Ce n'est pas le cas, car, malgré l'agitation thermique, lorsque $\Xi < 1$, l'interaction coulombienne développe une tendance à l'auto-organisation à travers les phénomènes collectifs d'écrantage électromagnétique, d'onde, d'instabilité, de turbulence et de cinétique hors équilibre thermodynamique. La dynamique d'un plasma définit ainsi une discipline originale qui a été amenée à développer ses propres méthodes d'études.

Un système dynamique évolue souvent de manière à minimiser l'amplitude des forces qui l'entraînent (les exceptions à cette règle phénoménologique étant les instabilités). Compte tenu du très grand nombre de degrés de liberté d'un plasma, celui-ci pourra souvent se réarranger pour annuler la densité volumique de forces de Coulomb où la densité volumique de forces de Laplace. Le moyen le plus simple et le plus efficace pour annuler cette densité volumique de forces de Coulomb est simplement un réarrangement de charges tel que : $n_e = Zn_i$ où n_e est la densité électronique, n_i la densité ionique et Z l'état d'ionisation. Bien entendu, si la densité volumique de charges était identiquement nulle, sur toutes les échelles de longueur et sur toutes les échelles de temps, toutes les interactions électriques disparaîtraient et la physique des plasmas serait sans objet. Il faut donc considérer l'hypothèse de quasi-neutralité comme l'ordre le plus bas d'un développement asymptotique par rapport au petit paramètre ε :

$$\varepsilon \equiv \frac{n_e - Zn_i}{n_e + Zn_i}$$

Ce paramètre permet de distinguer :

- les plasmas quasi-neutres, $\varepsilon \ll 1$, où les phénomènes d'écrantage dominant l'interaction champ-plasma à basse fréquence,
- des plasmas non-neutres, $\varepsilon \leq 1$, tels que les faisceaux et les gaines, où le champ de charge d'espace contrôle la dynamique du milieu.

L'hypothèse de quasi-neutralité constitue l'un des concepts fondamentaux de la physique des plasmas et sera analysée dans le chapitre trois. Ce terme apparaît de manière récurrente dans l'argumentation physique qui précède la construction de nombreux modèles. Cette tendance des plasmas vers la quasi-neutralité va de pair avec une propension à l'écrantage électrique et magnétique. Cette universalité de

comportement est conforme au fait qu'un système de charges libres possède un caractère diélectrique : sous l'effet d'un champ électrique un tel système a tendance à organiser spatialement les charges afin de créer un champ opposé au champ appliqué (« *les effets s'opposent aux causes qui leur donnent naissance* »). Pour un métal, ce caractère diélectrique est même parfait puisque, dans le cadre d'un modèle de plasma froid non magnétisé, il est possible d'atteindre un équilibre correspondant à une polarisation où le champ appliqué et le champ dû à la séparation induite des charges s'annulent. Pour un plasma magnétisé, cette tendance à la minimisation des champs électriques sera aussi observée dans le cas de la magnétohydrodynamique, et se traduira par la nullité du champ électrique dans le repère au repos du plasma ; cette hypothèse, dite de la magnétohydrodynamique idéale, constitue l'un des modèles centraux de la magnétohydrodynamique et sera analysée dans le chapitre sept.

1.2 TECHNOLOGIE DES PLASMAS

Bien que la physique des plasmas soit un outil essentiel pour étudier les structures et les processus astrophysiques, son domaine d'application ne se restreint pas à la seule physique fondamentale ; depuis plusieurs dizaines d'années, la technologie des plasmas est devenue indispensable dans de nombreuses industries et la physique des plasmas constitue une branche extrêmement active et innovante de la physique appliquée.

Les activités industrielles peuvent être classifiées suivant différents schémas ; du point de vue de la physique appliquée, il est intéressant de considérer trois grands types d'activités et de distinguer respectivement :

- le traitement de l'information,
- le traitement de l'énergie,
- le traitement des matériaux.

Les technologies des plasmas sont au cœur des techniques de pointe mises en œuvre dans ces trois secteurs ; quelques exemples permettent de mesurer l'impact et le potentiel des procédés plasmas dans ces trois domaines.

Les technologies modernes de traitement de l'information utilisent des composants électroniques miniaturisés tels que les microprocesseurs et les mémoires. Ces composants ne peuvent être fabriqués que dans des réacteurs à plasma car la gravure de millions de motifs, possédant des détails de dimensions inférieures au millième de millimètre, est impossible avec les procédés mécaniques ou chimiques usuels ; mais elle devient possible avec les flux d'ions énergétiques issus de la zone périphérique des décharges électriques radiofréquence. Les *réacteurs plasmas radiofréquence*, conçus pour maîtriser et optimiser ces flux d'ions, permettent ainsi les opérations

de gravure et de dépôt sur les substrats de silicium et sont les outils essentiels des chaînes de fabrication des industries microélectronique.

Dans les sociétés industrielles modernes, entre un et quelques gigawatts de puissance électrique sont globalement nécessaires par million d'habitants ; ainsi, la consommation d'énergie annuelle mondiale atteint désormais un niveau de l'ordre de 10^{20} joules et le développement de l'humanité s'accompagne d'une demande énergétique toujours croissante ; elle excède depuis longtemps la satisfaction des besoins énergétiques primaires, c'est-à-dire une consommation minimale d'environ 3 GJ/homme/an qui correspond à une ration journalière de 2 400 kcal. En un siècle, la consommation est passée d'une moyenne de 20 GJ/homme/an en 1890 à 60 GJ/homme/an en 1990 avec de fortes disparités : 160 GJ/homme/an pour la France, 240 GJ/homme/an pour les États-Unis. D'ici un demi-siècle, on estime que la consommation globale va doubler ou quadrupler ; (i) une estimation basse : 8 milliards d'habitants sur Terre en 2050 et une consommation de 64 GJ/homme/an, conduisent à 16 GTep (1 Tep est égale à 42 GJ) ; (ii) une estimation haute, pour un scénario de croissances économique et démographique fortes : une population mondiale de 10 milliards d'habitants et une consommation de l'ordre de 147 GJ/homme/an conduisent à 35 GTep. Ainsi, quelque soit le scénario, la demande actuelle sera multipliée par un facteur deux à quatre. Les réserves estimées des principaux combustibles fossiles, pétrole, gaz et charbon, largement exploitées actuellement, sont limitées ; les réserves prouvées actuelles sont de : (i) 160 GTep pour le pétrole, (ii) 145 GTep pour le gaz et (iii) 530 GTep pour le charbon. Ces estimations sont approximatives et font l'objet de nombreux débats d'experts compte tenu de la difficulté à évaluer le potentiel de découverte de nouveau gisements. L'impact sur l'environnement de l'utilisation de ces combustibles fossiles ne peut plus être négligé, l'émission de gaz à effet de serre conduit à des effets sur le climat que l'on commence à observer et évaluer ; en particulier, la concentration de CO_2 a augmenté de 30% depuis un siècle, et pourrait doubler d'ici la fin du siècle.

Compte tenu de la croissance de la demande et des contraintes écologiques, la fusion de noyaux légers de deutérium et tritium, suivant la réaction :



dans des réacteurs à fusion thermonucléaire contrôlée, est la seule option, à long terme, validant physiquement les schémas de développement envisagés pour les sociétés post-industrielles.

Un système thermonucléaire ne produit pas de dioxyde de carbone, génère des déchets radioactifs de faible activité et ne présente aucun risque d'emballement. Le deutérium (D) se trouve en quantité inépuisable dans l'eau et le tritium (T) peut être produit dans la couverture du réacteur en utilisant le flux neutronique de la réaction de combustion $\text{D} + \text{T} \rightarrow \alpha + \text{n}$ suivant les schémas : $\text{n} + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + \text{T} (+4,8 \text{ MeV})$ et $\text{n} + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + \text{T} + \text{n} (-2,5 \text{ MeV})$. Le lithium (Li) se trouve aussi en quantité abondante

dans la croûte terrestre. Compte tenu des pertes radiatives, la réaction $D + T \rightarrow \alpha + n$ ne peut s'auto-entretenir en régime de combustion exothermique qu'à partir d'une température de l'ordre de 4 keV ; à de telles températures la matière est totalement ionisée et la problématique de la production d'énergie par fusion nucléaire se réduit donc aux problèmes complexes du chauffage et du confinement des plasmas. La solution de ces problèmes, jusqu'à présent non résolus, implique la compréhension et la maîtrise des instabilités et de la turbulence dans les plasmas thermonucléaires, qui constituent les objectifs majeurs des programmes de recherches en physique des plasmas thermonucléaires.

La production d'oxyde d'azote, d'acétylène et de carbure de calcium, par synthèse en phase plasma, dès le début du XX^e siècle, constitue les premières applications industrielles des plasmas dans le domaine de la synthèse et du traitement des matériaux. Les propriétés de hautes températures ($> 10^4 \text{ K}$) des plasmas d'arc de puissance sont utilisées en sidérurgie pour améliorer ou remplacer les procédés conventionnels des hauts fourneaux. Ces mêmes décharges plasma en régime d'arc, mais à plus faible puissance, constituent les éléments actifs des systèmes de découpe et de soudure dans les ateliers de mécanique en amont des industries nucléaire, aéronautique et spatiale. Les plasmas permettent aussi la production de film de diamant ou de couches minces de silicium ; enfin la phase plasma offre une voie unique pour la synthèse de matériaux ultra-durs n'existant pas à l'état naturel tel que le nitrure de carbone.

Au début de ce chapitre d'introduction et de présentation, nous avons considéré les plasmas comme la phase haute température de la matière. Cependant, la production de plasmas, dans les laboratoires et les ateliers, ne fait jamais appel à un procédé de chauffage classique par combustion ; en effet, les températures associées à la combustion chimique sont limitées à quelques milliers de kelvins et une ionisation significative requiert quelques dizaines de milliers de kelvins. Les champs électriques, qu'ils soient continus, basse fréquence, radiofréquence, micro-onde ou optiques, sont les principales sources d'énergie qui permettent la production de plasmas dans les dispositifs expérimentaux, thermonucléaires et industriels.

Considérons, par exemple, le cas des champs quasi-statiques, l'interaction des électrons avec ces champs résulte en une accélération ; les processus d'ionisation par impact électronique sont alors efficaces et permettent la production de la phase plasma ; compte tenu des pertes par excitation l'énergie moyenne nécessaire pour créer une paire électron-ion par impact électronique sur un atome, W_f , est supérieure à l'énergie d'ionisation, E_I . Pour un faisceau d'électrons interagissant avec un gaz W_f est de l'ordre du double de l'énergie de seuil E_I comme le montrent les valeurs du tableau (1.8).

Un électron thermique accéléré par un champ électrique perdra une fraction significative de son énergie dans des processus d'excitations atomiques et moléculaires, cette perte d'énergie rend le processus d'accélération statistique. Ainsi, l'énergie minimum pour créer une paire électron-ion dans une décharge électrique, W_s , est

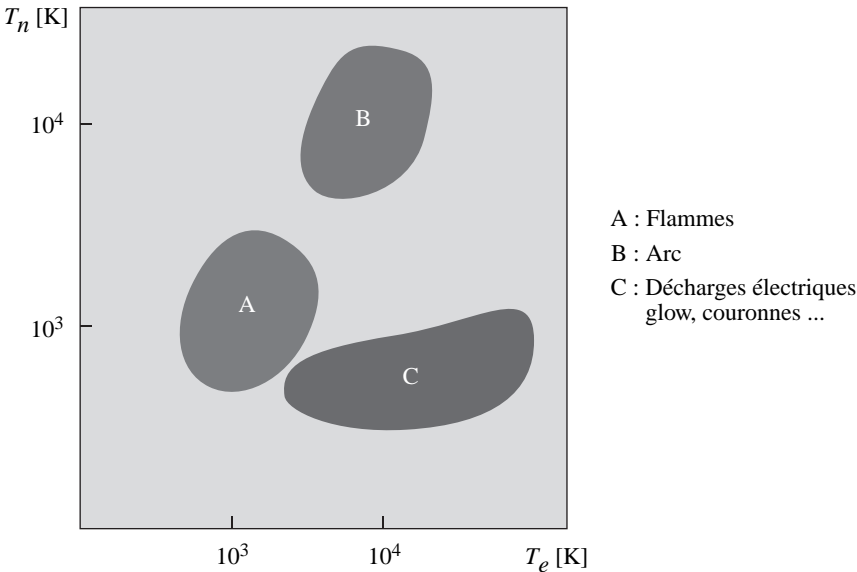


Figure 1.3 Régimes d'interaction dans les décharges électriques.

supérieure à l'énergie nécessaire pour ce processus lorsque l'on considère un faisceau, W_f ; W_s est de l'ordre du triple de l'énergie de seuil E_I comme le montrent les valeurs du tableau (1.8).

Tableau 1.8

Élément	E_I [eV]	W_f [eV]	W_s [eV]
Ar	15, 8	26, 4	45
Xe	12, 1	22, 0	38

Les décharges électriques continues, qui seront étudiées plus en détail dans le chapitre six, ont trouvées de nombreuses applications ; que ce soit les étincelles dans les systèmes d'allumage, les arcs dans les industries sidérurgiques, les décharges lumineuses (*glow*) dans les systèmes d'éclairage ou les décharges dites couronnes (*corona*) dans les systèmes de dépollution. Les propriétés électriques, thermiques, optiques et chimiques uniques de ces structures non-linéaires ont permis la mise au point de dispositifs fiables remplaçant avantageusement les flammes.

Deux types de décharges sont possibles selon les conditions de pression et la géométrie,

- les décharges thermiques, principalement l'arc, où le gaz neutre est à la même température que le plasma,
- les décharges non-thermiques où la température électronique est beaucoup plus élevée que la température des espèces lourdes, ions et neutres.

La figure 1.3 présente la température électronique comparée à la température du gaz pour ces différentes décharges générées par des champs électriques continus.

Les champs électriques radiofréquence, micro-onde et laser permettent aussi de produire des plasmas. En particulier, les décharges radiofréquences, capacitatives et inductives, à 13, 56 MHz (et ses harmoniques), sont largement utilisées dans les industries microélectroniques.

L'interaction de pulses électromagnétiques intenses, générés par des laser de puissance, avec des cibles solides ou gazeuses, engendre aussi des plasmas non stationnaires, dont la richesse de comportement est un sujet actif de recherches ; la figure 1.4 résume les différents régimes d'interaction laser-matière en fonction du flux de puissance et de la durée du pulse, l'interaction laser-plasma est dominante à haute énergie.

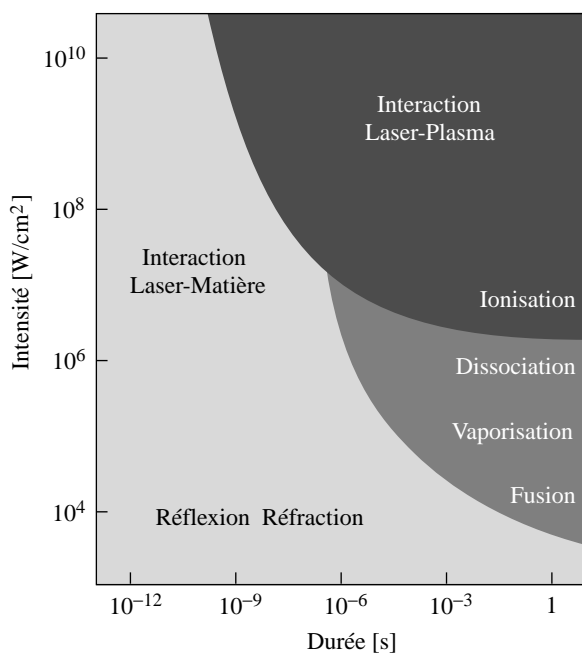


Figure 1.4 Régimes d'interaction laser-matière et production de plasma.

Une description exhaustive des applications industrielles des plasmas dans les domaines du traitement de l'information, du traitement de l'énergie et du traitement des matériaux nécessiterait une monographie entièrement dédiée à ce sujet ; dans cette fin de chapitre d'introduction nous renoncerons donc à un tel programme et nous présenterons et discuterons quelques réalisations telles que les réacteurs pour la microélectronique, les tokamaks et les propulseurs.

1.2.1 Réacteurs

Les réacteurs (à) plasma, parfois appelés générateurs (de) plasma ou sources plasma, sont des dispositifs permettant la production de plasma afin d'utiliser :

- la population électronique pour amorcer et entretenir une réactivité chimique en volume, généralement dans des conditions de non-équilibre thermodynamique,
- le flux d'ions en périphérie du plasma, dans la zone dite de gaines, afin de traiter des matériaux.

Si l'on excepte les décharges d'arc, la température électronique est en général de quelques eV et la température ionique beaucoup plus faible, mais, comme nous le verrons dans le chapitre six, dans la zone dite de pré-gaine et dans la zone de gaine, les électrons transfèrent, en régime non-linéaire, une fraction significative de leur énergie aux ions qui acquièrent ainsi une énergie suffisante pour induire des phénomènes de dépôt de couches minces, de gravure micrométrique (à travers un masque approprié) ou d'implantation ionique.

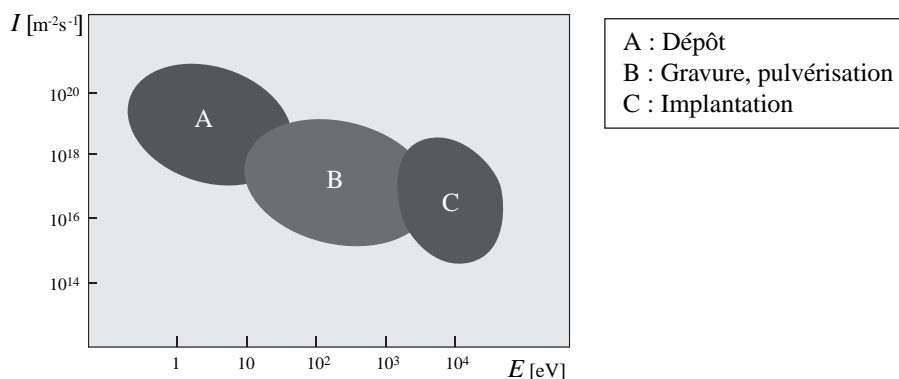


Figure 1.5 Principales applications des populations ioniques énergétiques.

Ces trois opérations ne résultent pas simplement de l'action mécanique du flux d'ions énergétiques sur le substrat, mais, de toute une physico-chimie, hors-équilibre thermodynamique, en volume et surface, qui constitue un sujet extrêmement actif de recherches compte tenu des enjeux industriels ; en effet, ces trois processus, dépôt, gravure et implantation, sont les opérations de base qui ont permis la mise au point des procédés de fabrication dans le domaine des nano-technologies. Un quatrième processus ionique, la pulvérisation ou *sputtering*, complète cette phénoménologie ionique. En 1852 Grove découvrit le phénomène de dépôt de couche mince par pulvérisation dans les décharges basse pression ; W. Thomson appela ce phénomène *sputtering* par analogie avec le phénomène de génération de gouttelette lors de l'impact d'une goutte sur un liquide, mais le mot *sputtering* fut imprimé à la suite d'une erreur typographique et fut adopté par la communauté scientifique.

La figure 1.5 présente des conditions typiques d'intensité ionique, I , et d'énergie ionique, E , pour ces quatre processus : dépôt, gravure, pulvérisation et implantation. La pulvérisation ou *sputtering*, permet de générer des vapeurs métalliques à basse température autorisant ainsi le dépôt de films minces sur des substrats fragiles. Pour ce dernier processus une vision mécanique plus physique que chimique est appropriée : le flux d'ion détruit progressivement la surface métallique par transfert d'énergie cinétique vers le réseau en surface.

Les populations électroniques énergétiques des plasmas possèdent aussi un vaste potentiel d'applications industrielles ; la figure 1.6 en présente quelques-unes en fonction de la puissance et de l'énergie ; à haute énergie les faisceaux issus des accélérateurs prennent le relais des sources (à) plasma usuelles.

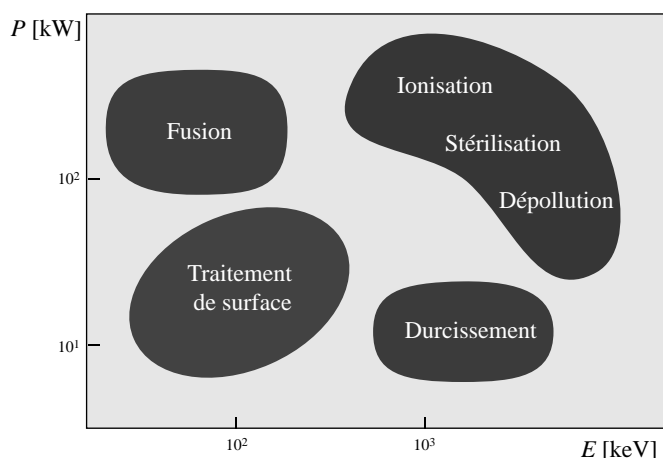


Figure 1.6 Principales applications des populations électroniques énergétiques.

Lorsque l'on aborde le sujet des réacteurs plasma, plusieurs classifications peuvent être établies ; il est, par exemple, possible de distinguer :

- les réacteurs basse pression, fonctionnant en dessous de la pression atmosphérique, entre quelque millitorr et quelque centaines de millitorr,
- des réacteurs haute pression, fonctionnant au voisinage de quelque dizaines de torr jusqu'à la pression atmosphérique (760 torr).

La fréquence du champ électromagnétique d'excitation peut aussi permettre de construire une classification des réacteurs, on distinguera alors :

- les décharges continues,
- des réacteurs radiofréquence (RF) et
- des réacteurs micro-onde fonctionnant à quelques gigahertz.

La nature de la structure de couplage de l'énergie constitue, enfin, un autre élément d'élaboration d'une classification, par exemple, pour les réacteurs RF, qui sont les plus courant dans les chaînes de fabrication des industries microélectroniques :

- les structures de couplage capacitives constituées de deux plaques polarisées permettent de générer des plasmas pour le dépôt et la gravure, viennent ensuite,
- les structures de couplage inductives permettent un transfert de puissance au plasma plus efficace et qui se substitue progressivement au réacteur capacitif dans de nombreuses applications ;
- enfin, les structures radiatives, de type antenne dans les réacteurs dits hélicon ou de type guide ouvert dans les réacteurs dits ECR, génèrent des modes propagatifs du plasma alors que les structures capacitives et inductives opèrent sur des modes évanescents.

Les réacteurs radiofréquence, malgré l'apparente simplicité de leur structure, sont des objets au comportement complexe qui présentent une grande diversité de régimes de fonctionnement et sont sujet à de nombreuses instabilités.

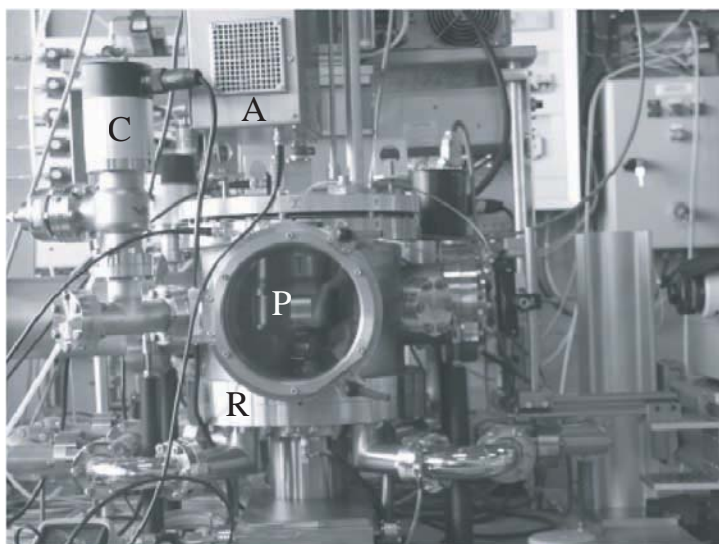


Figure 1.7 Réacteur radiofréquence capacitif du Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas de l'École Polytechnique.

La figure 1.7 présente la vue extérieure d'un réacteur capacitif en opération où un champ électromagnétique RF (13,56 MHz) entretient le plasma (P). Le système complet est composé de quatre éléments : le système de pompage et de contrôle des gaz neutres (C), le générateur RF et le système d'adaptation d'impédance (A), l'ensemble des diagnostics de la phase plasma et de la phase neutre et enfin la structure de couplage et la chambre à plasma (R). À basse pression, au voisinage de quelques

millitorrs, dans ces structures RF, les collisions sont insuffisantes pour expliquer l'absorption du champ électromagnétique par les électrons, un deuxième mécanisme de transfert d'énergie du champ vers la population électronique entre en jeu : le chauffage stochastique. Du point de vue du physicien, ce mécanisme est essentiellement un régime de couplage champ-particule en régime chaotique ; on voit donc que les réacteurs RF, comme beaucoup de systèmes de haute technologie, sont le lieu privilégié de rencontre entre la physique appliquée et la physique fondamentale.

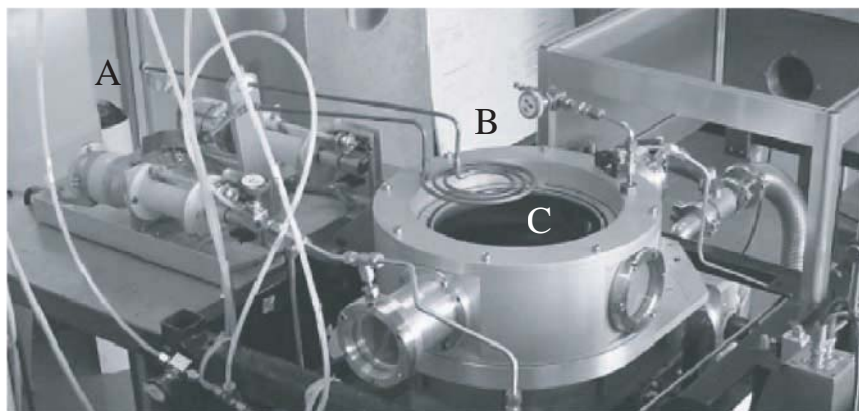


Figure 1.8 Réacteur radiofréquence inductif du Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas de l'École Polytechnique.

Le chauffage stochastique, les instabilités et les transitions entre régimes dans les réacteurs RF sont autant de sujets de recherches qui nécessitent la mise en oeuvre de l'ensemble des méthodes et outils théoriques et expérimentaux de la physique des plasmas. La physico-chimie des plasmas et plus particulièrement la compréhension et la maîtrise des cinétiques des espèces actives participant aux processus de dépôt et de gravure, constitue un deuxième sujet de recherches extrêmement actif, compte tenu de l'impact direct de ces études sur les procédés et opérations de fabrication des composants microélectroniques. La figure 1.8 présente un réacteur inductif ouvert, la chambre de confinement (C) du plasma est de même volume que dans le cas capacitif mais la structure de couplage (B) est ici de nature inductive et les problèmes de transfert de puissance nécessitent l'usage des techniques classiques d'adaptation d'impédance (A).

Avant de clore ce paragraphe d'introduction aux réacteurs, présentons les plus anciens réacteurs plasma industriels, les réacteurs de piégeage de poussières, dont les brevets datent du début du XX^e siècle. De nombreuses industries, telles que les cimenteries ou les centrales thermiques au charbon, rejettent des effluents gazeux très poussiéreux, les systèmes de filtrage classiques ne sont pas adaptés à la taille et aux flux de ces poussières et les procédés de dépoussiérage mis en place dans ces industries utilisent des réacteurs (à) plasma construits autour d'une décharge couronne.

La figure 1.9 présente le schéma de principe d'un tel réacteur de dépollution, le flux de gaz primaire arrive en haut du cylindre (G1) et le gaz dépoussiéré (G2) est collecté en bas de ce même cylindre ; le cylindre constitue la chambre à plasma, une haute tension est maintenue entre la paroi intérieur du cylindre et un fil coaxial, cette tension génère un champ électrique radial (E) qui entretient une décharge électrique de type couronne.

Les ions de cette décharge chargent les poussières qui sont ainsi collectées en bas de la chambre cylindrique (C) par simple attraction électrostatique, à l'aide d'un système d'électrodes annexes.

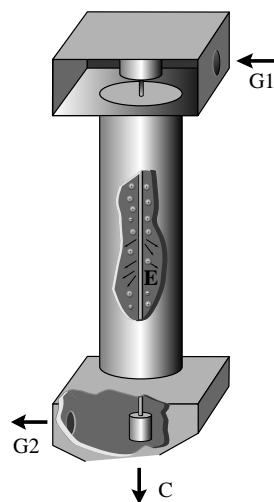


Figure 1.9 Schéma de principe d'un réacteur à décharge couronne pour la dépollution.

1.2.2 Tokamaks

Les réacteurs radiofréquence pour la gravure, le dépôt et l'implantation ionique génèrent des plasmas dont la fonction ultime relève du traitement des matériaux ; le traitement de l'énergie est aussi un vaste champ d'application des technologies plasma. En effet, que ce soit pour la production d'énergie dans les systèmes thermonucléaires tokamaks, ou pour la propulsion des systèmes spatiaux avancés, le potentiel des technologies plasmas permet d'envisager des modes de fonctionnement et des performances inaccessibles aux technologies de l'énergie actuelles.

La figure 1.10 résume les performances des systèmes énergétiques classiques et de quelques technologies plasma. Afin d'identifier la spécificité de ces technologies, considérons l'ensemble des milieux portés à haute température, ou à haute énergie, et représentons en abscisse l'énergie par nucléon E et en ordonnée le nombre de particules ainsi chauffées ou accélérées par unité de volume N .

- À haute énergie et basse densité les technologies classiques des accélérateurs permettent d'accélérer des faisceaux peu denses (A).
- À basse énergie et haute densité les technologies classiques des moteurs de fusées et des turbines permettent de chauffer et d'accélérer des flux de matière importants mais à des niveaux énergétiques modestes (M).
- Entre ces deux extrêmes, les technologies plasma (P) permettent de transférer une quantité significative d'énergie vers une quantité significative de matière.

Les plasmas offrent ainsi la possibilité de développer de nouvelles technologies inovantes, basées sur des principes physiques originaux, dont les performances sont supérieures aux moteurs et accélérateurs classiques. La zone W du diagramme est

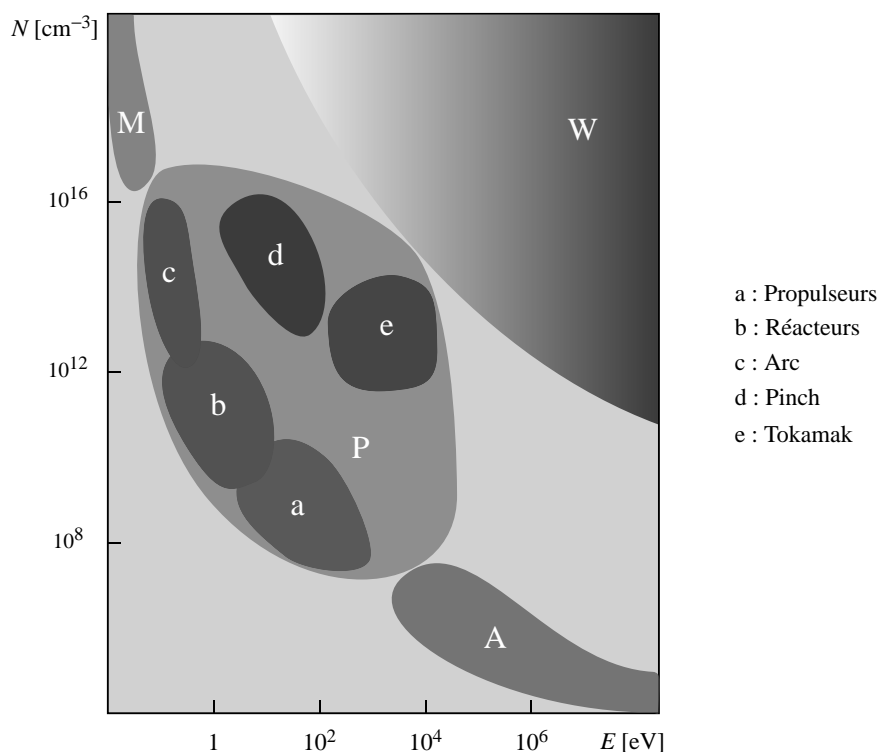


Figure 1.10 Énergétique des milieux dilués.

non physique et inaccessible, en effet un transfert important d'énergie vers une quantité importante de matière requiert, en régime stationnaire, des puissances impossibles à générer sur terre.

Ce positionnement original de la physique et de la technologie des plasmas, analysé sous l'angle de l'énergétique appliquée, se retrouve aussi du point de vue fondamental ; en effet, dans le tableau (1.9) nous avons rappelé l'*ordering* en énergie des excitations élémentaires dans un gaz moléculaire : la physico-chimie moléculaire s'intéresse aux excitations basse énergie (vibrations, rotations, électroniques) jusqu'à la dizaine d'eV et la physique nucléaire aux excitations et réactions des noyaux au niveau du MeV, les énergies typiques mises en jeu pour l'ionisation au sein des plasmas sont intermédiaires (a_0 et a_n sont les dimensions typiques de l'atome et du noyau).

Compte tenu des niveaux d'énergie stockés (des gigajoules), les tokamaks occupent une position originale dans les systèmes énergétiques avancés représentés sur la figure 1.10.

Les tokamaks sont des configurations magnétiques utilisées pour confiner et chauffer des plasmas en régime thermonucléaire ; en effet, la température d'amorçage et d'entretien d'une combustion thermonucléaire étant de l'ordre d'une centaine de millions

Tableau 1.9

Excitation/Réaction	Énergie	Ordre de grandeur [eV]
Nucléaires	$\frac{\hbar^2}{m_n a_n^2}$	$\sim 10^6$
Rotationnelles	$\frac{\hbar^2}{M a_0^2}$	$\sim 10^{-3}$
Vibrationnelles	$\frac{\hbar^2}{\sqrt{M m} a_0^2}$	$\sim 10^{-1}$
Électroniques	$\frac{\hbar^2}{m a_0^2}$	$\sim 1 - 10$
Ionisation	$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0}$	$\sim 10 - 10^2$

de kelvins, il n'existe aucun matériau pouvant supporter de telles températures. Il est donc nécessaire d'utiliser le principe du confinement magnétique qui sera étudié dans les chapitres cinq et dix. Le mouvement d'une particule chargée interagissant avec un champ magnétique statique est la combinaison d'une rotation autour des lignes de champ et d'une translation le long des lignes de champ ; ce comportement des systèmes de charges est à la base du principe du confinement magnétique : si les lignes de champ sont fermées ou restent dans un volume fini, comme c'est le cas dans la configuration tokamak, alors les particules restent confinées dans ce volume fini.

La réalité est plus complexe pour les configurations de type tokamak, car, en repliant des lignes de champ magnétique se créent nécessairement des inhomogénéités qui engendrent des dérives perpendiculaires aux lignes de champ (chapitre cinq et dix) ; il faut donc compenser ces dérives afin d'assurer un confinement orbital. Pour cela, un champ, dit poloïdal, généré par un courant (I) traversant l'anneau de plasma (quelques millions d'ampères dans un réacteur) est superposé au champ toroïdal (B) créé par le système de bobines distribuées autour du tore de plasma. Le résultat est donc une structure de champs complexes où les lignes de champ sont des hélices s'appuyant sur des tores emboîtés. La configuration tokamak, illustrée par la figure 1.11, offre ainsi un exemple de champs complexes où les différentes dérives sont compensées et le confinement orbital assuré. Afin de garantir la stabilité du tore de plasma des bobinages verticaux sont aussi nécessaires. Le confinement orbital est une condition nécessaire, mais ne constitue pas une condition suffisante pour assurer un bon confinement global du plasma ; en effet, le plasma génère des champs électrique et magnétique qui ont tendance à détruire le confinement. Ainsi, le tore de plasma d'une configuration tokamak doit être contrôlé en permanence, car il est l'objet de nombreuses instabilités et d'une intense activité turbulente résultant de couplages non-linéaires entre les champs et les particules.

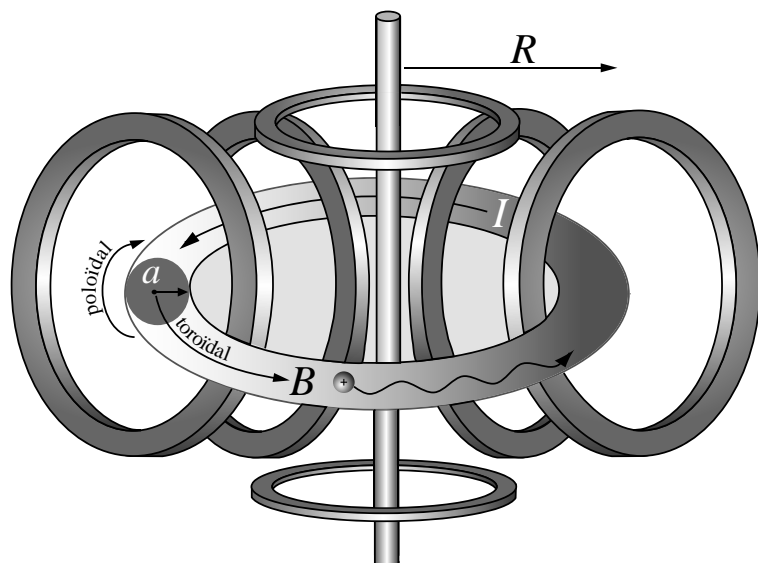


Figure 1.11 Configuration magnétique de type tokamak.

La figure 1.12 présente le tokamak du Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas, les bobines générant les champs toroïdal (B) et vertical sont visibles, ainsi que la chambre à plasma (T) et un ensemble de systèmes de contrôle (C), de chauffage (M) et de diagnostics qui complète ce dispositif expérimental. Dans le domaine de la physique des tokamaks il est d'usage de distinguer les grandes machines dont les performances s'approchent des performances d'un réacteur et dont les équipes regroupent plusieurs centaines de physiciens et ingénieurs, des petites machines telles que celle de la figure 1.12.

Les performances des grands tokamaks les placent loin devant tous les autres types de machines et de procédés qui ont été proposés jusqu'à présent pour amorcer et entretenir une combustion thermonucléaire ; ce succès fait des tokamaks un sujet de recherche particulièrement actif et de grands tokamaks, dédiés aux études de physique des plasmas thermonucléaires, ont été construits depuis plus de vingt ans : Tore Supra en France (TS, CEA Cadarache), JET en Angleterre (EURATOM), TFTR puis MSTX aux États-Unis (DoE Princeton) et JT60 au Japon. Enfin, le projet mondial ITER devrait permettre l'accès à la combustion thermonucléaire quasi-continu pour la prochaine décennie, ouvrant ainsi un vaste champ de recherches sur ce régime encore inexploré. Les principaux paramètres de ces grandes machines sont donnés dans le tableau (1.10) où les dimensions R et a sont définies sur la figure 1.11.

Les performances obtenues ces dernières années en termes de confinement, chauffage et contrôle des plasmas thermonucléaires dans ces grands tokamaks traduisent des avancées remarquables et l'extrapolation des lois d'échelles, issues des bases de données accumulées ces vingt dernières années, permet d'envisager avec confiance

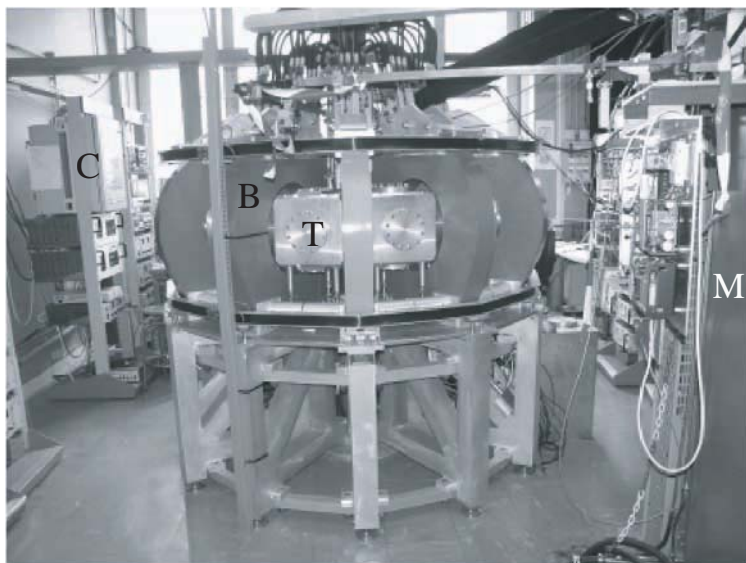


Figure 1.12 Le tokamak « TORIX » du Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas de l'École Polytechnique.

Tableau 1.10

Tokamak	R [m] / a [m]	B [T]	I [MA]
Alcator C	0,64/0,17	12	0,9
ASDEX U	1,65/0,5	3,9	1,0
DIID	1,67/0,67	2,1	0,8
JET	3,0/1,25	3,5	3,0
TS	2,37/0,8	4,5	2,0
TFTR	2,4/0,8	5,0	2,2
ITER	6,2/2,0	5,3	15,0

l'accès à l'ignition et l'entretien de la combustion thermonucléaire dans le réacteur ITER. Cependant, le programme tokamak se heurte actuellement à quatre grands problèmes qui constituent de solides verrous physiques et technologiques. Ces quatre questions-clés, scientifiques et techniques :

- la compréhension et le contrôle de l'interaction plasma-paroi,
- la compréhension et le contrôle de la turbulence,
- la génération et le contrôle du courant en régime continu,
- la maîtrise de la dynamique des populations suprathermiques en régime thermonucléaire,

conditionnent la mise au point d'un réacteur techniquement fiable et économiquement viable. En effet, dans un réacteur tokamak en régime de combustion continue :

- l'injection/extraction de puissance à la périphérie du plasma doit s'effectuer en respectant de sévères contraintes technologiques de tenue des matériaux aux flux intenses de rayonnements et particules,
- la turbulence et le transport doivent être diagnostiqués et contrôlés en temps réel et maintenus à un niveau compatible avec l'entretien de la combustion thermonucléaire,
- quelques dizaines de millions d'ampères doivent être entretenus en régime continu afin d'assurer le confinement orbital et l'accès à des profils de courants optimaux,
- la population de particules alpha d'origine thermonucléaire et les ions suprathermiques doivent être confinés, diagnostiqués et contrôlés afin d'assurer une combustion et un pilotage efficace.

La conception d'un réacteur thermonucléaire, techniquement fiable et économiquement viable, passe donc par l'étude approfondie des processus d'interaction plasma-paroi et des mécanismes de turbulence, ainsi que par l'identification de nouveaux procédés de diagnostic et de contrôle de la turbulence, du courant et des populations suprathermiques à l'origine de la réactivité thermonucléaire, c'est l'achèvement de ce vaste programme de physique, fondamentale et appliquée, qui constitue l'objectif des différentes grandes machines et du projet ITER.

1.2.3 Propulseurs

La propulsion des engins spatiaux est un autre secteur des hautes technologies où le potentiel des technologies plasma permet d'envisager la mise au point de systèmes originaux, présentant des performances supérieures aux systèmes existants. Les moteurs de fusées et les propulseurs pour le positionnement des satellites sont caractérisés par deux paramètres :

- la vitesse d'éjection des gaz ou des plasmas propulsifs,
- la poussée qui mesure la force développée par l'action propulsive des gaz ou des plasmas.

Ces deux paramètres sont également importants pour les raisons suivantes :

- pour quitter l'attraction de la terre une fusée doit développer une forte poussée, supérieure à son poids, et la vitesse d'éjection n'est pas critique,
- par contre, dans l'espace, loin de la terre, pour des missions d'exploration lointaines, la vitesse d'éjection doit être élevée pour minimiser la durée de la mission ; en effet, la loi de Tsiolkovski énonce que *la vitesse finale d'une fusée est proportionnelle à la vitesse d'éjection des gaz* ; la vitesse d'éjection contrôle donc la durée de la mission.

Les systèmes classiques chimiques, voire nucléaires ou électriques, où l'enthalpie est fournie à un gaz par des réactions nucléaires ou un chauffage électrique, développent de fortes poussées, mais, les performances, en terme de vitesse d'éjection, sont limitées par la vitesse du son ; le tableau (1.11) présente les paramètres typiques de poussées et de vitesses d'éjection de ces systèmes classiques.

Tableau 1.11

Système	Vitesse d'éjection [km/s]	Poussée [N]
Chimique solide	2 – 3	10^7
Chimique liquide	3 – 5	10^7
Nucléaire fission	5 – 9	10^6
Électrique thermique	1 – 10	10^1

Depuis plus de trente ans les physiciens des plasmas ont développé un certain nombre de propulseurs basés sur l'accélération des plasmas ; plusieurs types de force peuvent être utilisés :

- la force de Coulomb dans les propulseurs électrostatique et les SPT (Stationary Plasma Thruster),
- la force de Laplace dans les propulseurs magnétoplasmadynamique (MPD),
- la force diamagnétique d'une tuyère magnétique et le chauffage cyclotronique ionique (ICRH, ion cyclotron resonance heating) dans le système VASIMIR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) proposé par la NASA pour une mission habitée vers Mars.

Tableau 1.12

Propulseur	Vitesse d'éjection [km/s]	Poussée [mN]	Rendement [%]
Électrostatique	20 – 50	10^2	75
SPT	10 – 20	10^3	50
MPD	20 – 50	10^4	30
ICRH-VASIMIR	30 – 100	10^5	50

Le tableau (1.12) montre clairement que les performances de vitesse d'éjection sont un à deux ordres de grandeur supérieures à celles des propulseurs chimiques classiques, le rendement des propulseurs plasma est presque deux fois supérieur à celui de ces propulseurs chimiques, par contre, les développements actuels ont été limités aux applications nécessitant de faibles poussées.

La figure 1.13 présente la structure d'un SPT tel que ceux embarqués actuellement sur les satellites de télécommunications. Un système de deux cylindres coaxiaux, en nitrure de bore, constitue la chambre où le plasma est produit et accéléré. Un flux de

xénon alimente la base de ce système coaxial, ce flux de gaz interagit avec un anneau d'électrons piégés dans un champ magnétique radial (B), les impacts électroniques ionisent ce flux de xénon et les ions ainsi produits sont accélérés par un champ électrique axial (E). La fonction du champ magnétique radial est de ralentir les électrons afin qu'ils ne consomment pas l'essentiel de la chute de potentiel, comme c'est le cas dans les décharges classiques, et de les confiner afin d'entretenir le processus d'ionisation. Une cathode émissive, non représentée sur le schéma, permet de neutraliser le flux d'ions éjectés.

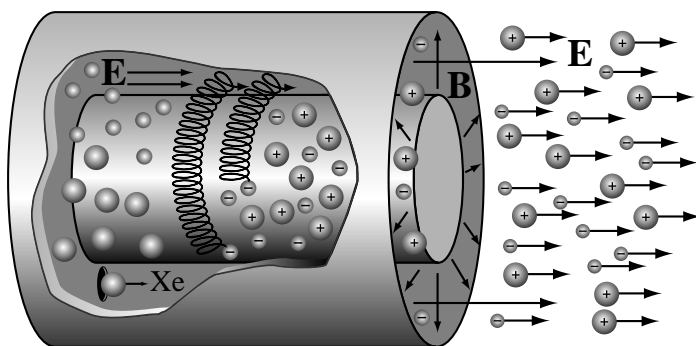


Figure 1.13 Schéma de principe et structures électrique et magnétique d'un propulseur SPT.

Malgré sa simplicité apparente, un tel système présente différents régimes de fonctionnement, plusieurs types d'instabilités et des propriétés de transport électronique probablement turbulentes ; ces propulseurs sont l'objet de vastes programmes de recherche en physique appliquée.

L'objectif de ce chapitre d'introduction est de donner un aperçu de l'importance et de l'impact de la physique des plasmas ; le niveau de développement actuel des technologies plasma ne permet pas d'embrasser l'ensemble des applications en quelques pages, le choix, nécessairement arbitraire, qui a été fait de présenter succinctement les réacteurs, les tokamaks et les propulseurs ne doit pas occulter l'importance et l'impact des autres dispositifs à plasma ; par exemple, les détecteurs de particules, que ce soit les compteurs Geiger, les chambres à fils ou les chambres à étincelles, sont construits sur le principe de l'amplification électronique dans des décharges plasma en régime non autonome ; la figure 1.14 présente le schéma de principe d'un compteur Geiger. Une particule énergétique (R) traversant le gaz d'une enceinte cylindrique crée quelques paires électrons-ions par dépôt d'énergie dans le gaz, les électrons sont accélérés par le champ électrique radial résultant de la différence de potentiel appliqué entre un fil central et le cylindre. Cette population d'électrons énergétiques génère des paires électron-ion secondaires par ionisation par impact électronique, ces électrons secondaires sont accélérés, etc.

La collecte des charges ainsi générées donne lieu à un pulse de tension ou à un pulse de courant $S(t)$ suivant la nature du circuit extérieur, ce pulse signale le passage

de la particule et est ensuite traité par un système d'acquisition et de traitement de données.

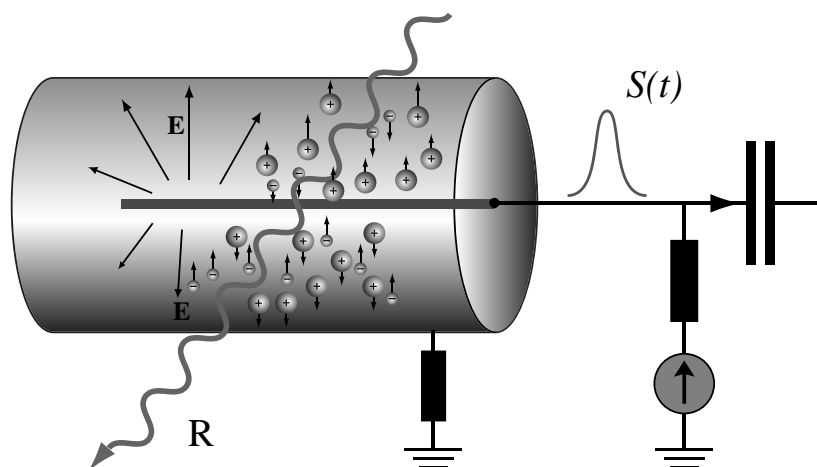


Figure 1.14 Principe de la détection par avalanche : tube Geiger.

BIBLIOGRAPHIE

Les manuels de physique des plasmas sont extrêmement nombreux et les sujets abordés dans les monographies divers et variés ; principalement aux États-Unis où la physique des plasmas constitue une discipline de référence particulièrement active. Face à un tel volume de publications un choix critique s'impose ; le développement historique de cette discipline et l'identification des différentes branches au stade actuel de son développement constituent un fil directeur pour déterminer et ordonner un choix d'ouvrages.

► Physique spatiale et astrophysique

- H. Alfvén et C.G. Fälthammar, *Cosmical Electrodynamics*, Oxford University Press, Oxford, UK, 1963.
- W. Baumjohann et R.A. Treumann, *Basic Space Plasma Physics*, Imperial College Press, London, UK, 1996.
- D.B. Melrose, *Plasma Astrophysics Non-thermal Processes in Diffuse Magnetized Plasmas*, Gordon and Breach, New-York, USA, 1980.
- G.K. Parks, *Physics of Space Plasmas An Introduction*, Addison-Wesley, USA, 1991.

► **Traité généraliste de physique des plasmas**

- T.J. Boyd et J.J. Sanderson, *Plasma Dynamics*, Nelson, UK, 1969.
- T.J. Boyd et J.J. Sanderson, *The Physics of Plasmas*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003.
- S. Chandrasekhar, *Plasma Physics*, The University of Chicago Press, Chicago, USA, 1965.
- F. Chen, *Introduction to Plasma Physics*, Plenum Press, New York, USA, 1977.
- P.C. Clemmow et J.P. Dougherty, *Electrodynamics of Particles and Plasmas*, Addison-Wesley, USA, 1969.
- J.L. Delcroix, *Physique des Plasmas*, Tomes 1&2, Dunod, Paris, France, 1963.
- R.O. Dendy, *Plasma Dynamics*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1990.
- A. von Engel, *Electric Plasmas : Their Nature and Uses*, Taylor & Francis Inc, New York, USA, 1983.
- V.E. Golant A.P. Zhilinsky et I.E. Sakharov, *Fundamentals of Plasma Physics*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- R.J. Goldston et P.H. Rutherford, *Introduction to Plasma Physics*, IOP, London, UK, 1995.
- R.D. Hazeltine et J.D. Meiss, *Plasma Confinement*, Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City, USA, 1992.
- S. Ichimaru, *Statistical Plasma Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City, USA, 1992.
- R. Jancel et Th. Kahan, *Électrodynamique des Plasmas fondée sur la Mécanique statistique*, Dunod, Paris, 1963.
- N. A. Krall et A.W. Trivelpiece, *Principles of Plasma Physics*, Mc Graw-Hill, USA, 1973.
- B. Lehnert, *Dynamics of Charged Particles*, North-Holland, Amsterdam, 1964.
- J.G. Linhart, *Plasma Physics*, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1960.
- C.L. Longmire, *Elementary Plasma Physics*, Intersciences Publishers John Wiley & Sons, New York, USA, 1963.
- D.R. Nicholson, *Introduction to Plasma Theory*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1983.
- G. Schmidt, *Physics of High Temperature Plasmas*, Academic Press, New York, USA, 1979.
- P.A. Sturrock, *Plasma Physics*, Cambridge University Press, UK, 1994.

- W.B. Thompson, *An Introduction to Plasma Physics*, Pergamon Press, Oxford, London, 1962.

► **Traité de physique des décharges**

- S.C. Brown, *Introduction to Electrical Discharges in Gases*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1966.
- F.F. Chen et J.P. Chang, *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing*, Plenum Publishers, New York, USA, 2003.
- A. von Engel, *Ionized Gases*, AIP Press, New York, USA, 1994.
- R.N. Franklin, *Plasma Phenomena in Gas Discharges*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1976.
- M.A. Lieberman et A.J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, Wiley & Sons, New York, USA, 1994.
- E. Nasser, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1971.
- R. Papoular, *Phénomènes Électriques dans les Gaz*, Dunod, Paris, France, 1963.
- F.M. Penning, *Décharges Électriques dans les Gaz*, Dunod, Paris, France, 1958.
- Y.P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, Berlin, RFA, 1997.
- B.M. Smirnov, *Physics of Ionized Gases*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2001.

► **Fusion thermonucléaire par confinement magnétique**

- R.D. Hazeltine et F.L. Waelbroeck, *The Framework of Plasma Physics*, Perseus Books, USA, 1998.
- K. Miyamoto, *Plasma Physics for Nuclear Fusion*, MIT Press, USA, 1989.
- D.J. Rose et M. Clark, *Plasmas and Controlled Fusion*, MIT Press, USA, 1961.
- R.B. White, *The Theory of Toroidally Confined Plasma*, Imperial College Press, London, UK, 2001.

► **Physique des faisceaux de particules chargées et interaction laser-plasma**

- R.D. Davidson, *Physics of Nonneutral Plasmas*, Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City, USA, 1990.
- S. Eliezer, *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas*, IOP, UK, 2002.
- S. Humphries, *Principles of Charged Particle Acceleration*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1986.
- S. Humphries, *Charged Particle Beams*, John Wiley & Sons, New York, USA, 1990.

- W.L. Kruer, *The Physics of Laser Plasma Interactions*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1988.
- J.T. Mendonça, *Theory of Photon Acceleration*, IOP, London, UK, 2001.
- R.B. Miller, *An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams*, Plenum Press, New York, USA, 1985.
- Yu.P. Raizer, *Laser-Induced Discharge Phenomena*, Consultant Bureau, New York, USA ; 1977.

Chapitre 2

Champs, particules et fluides

Hamlet. - Do you see yonder cloud that's almost in shape of a camel ?

Polonius. - By the mass, and'tis like a camel, indeed.

Hamlet. - Methinks it is like a weasel.

Polonius. - It is backed like a weasel.

Hamlet. - Or like a whale ?

Polonius. - Very like a whale.

La place et l'importance de la physique des plasmas étant clairement identifiées au sein de la physique fondamentale et de la physique appliquée, nous devons maintenant aborder le problème des outils et méthodes pour l'étude des plasmas. Dans ce deuxième chapitre, *champs, particules et fluides*, nous rappellerons donc quelques résultats fondamentaux de mécanique, d'électrodynamique et de physique statistique, nécessaires à la construction et à la pratique de la physique des plasmas.

La richesse de comportements des plasmas trouve son origine dans *la nature non-linéaire et auto-cohérente du couplage champs-plasmas* : les champs électrique et magnétique (\mathbf{E} , \mathbf{B}) engendrent les mouvements ioniques et électroniques ; à travers ces mouvements les ions et les électrons s'organisent en charges d'espace et courants électriques (ρ , \mathbf{J}) ; ces courants et charges sont les termes sources des équations de Maxwell et les champs électromagnétiques sont solutions de ces équations de Maxwell (Figure 2.1) ; ces champs électriques et magnétiques engendrent les mouvements ioniques et électroniques, etc.