

## AVERTISSEMENT

Dans le cours de Physique des Plasmas, nous utiliserons la convention suivante consacrée par l'usage en physique des plasmas:

- Les températures  $T$  sont exprimées en électron-volt (eV). Rigoureusement, c'est la quantité  $k_B T$  qui est exprimée en eV ( $k_B$  = constante de Boltzman =  $1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ). Par habitude, on dit que la température est de tant d'eV. La conversion est:  $1 \text{ eV} = 11605^\circ \text{ K}$ . Ainsi un plasma thermonucléaire à une température de "10 keV" possède une température de l'ordre de 100 millions de degré.
- Les densités électronique et ionique sont exprimées en nombre de particules par unité de volume.

Rappelons également quelques constantes souvent utilisées dans le cours:

Masse de l'électron $m_e$	= $9.1095 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton $m_p$	= $1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Rapport $m_p/m_e$	= 1836.2
Charge de l'électron $e$	= $1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
$\epsilon_0$	= $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
1 eV	= $1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

## LA PHYSIQUE DE PLASMAS : INTRODUCTION

### I) INTRODUCTION

Plasma vient du grec et veut dire "ouvrage façonné".

Le terme "plasma" a été introduit en 1928 par le physicien américain I. Langmuir.

La physique des plasmas étudie les propriétés des **gaz ionisés**. Cependant, il est nécessaire de préciser la notion de gaz ionisé lorsque l'on parle de plasma. On entend par plasma un ensemble de particules chargées qui doit satisfaire les conditions suivantes:

- La somme totale des charges est nulle dans un volume macroscopique. C'est la **quasi-neutralité**.
- Les **effets collectifs** des particules doivent être plus importants que les effets dus aux forces coulombiennes entre particules. Nous préciserons cette notion lorsque nous aurons défini la notion d'écrantage de Debye.

On dit souvent que le plasma est le quatrième état de la matière. Cette appellation vient du fait qu'au fur et à mesure que la température d'un corps est augmentée, il change d'état. Il passe successivement de l'état solide à l'état liquide puis à l'état gazeux. Si la température atteint environ 10'000 °K à 100'000° K, la plupart de la matière est ionisée: on a alors l'état de plasma. A une température de l'ordre de  $10^5$  °K correspond une énergie d'environ 10 eV, ce qui est approximativement les énergies d'ionisation. Bien entendu, les plasmas existent à des températures bien inférieures pour autant que l'on fournisse un processus d'ionisation dont le taux soit supérieur à celui des pertes. Nous allons décrire quelques plasmas de laboratoire pour lesquels les températures sont inférieures à  $10^5$  °K.

Pourquoi étudions nous la physique des plasmas? La réponse la plus simple est qu'environ 99% de l'univers apparent est formé de plasma. Cette affirmation peut apparaître surprenant alors que sur Terre nous rencontrons la plus grande difficulté à avoir du plasma! A côté des phénomènes physiques liés à l'état de plasma, il y a également un moteur fort important à toute la recherche en physique des plasmas: la fusion thermonucléaire contrôlée. Sans rentrer, pour le moment, dans les détails, la fusion thermonucléaire entre les noyaux légers (comme le deutérium et le tritium) a lieu à des températures de l'ordre de  $10^8$  °K. A ces températures, les gaz sont complètement ionisés et sont à l'état de plasma. Seule alors une connaissance approfondie de ses propriétés nous permettra de confiner et de chauffer le plasma et ainsi obtenir des réactions de fusion. A côté de l'étude des propriétés du plasma, signalons que les méthodes tant expérimentales que théoriques utilisées en physique des plasmas sont communes à d'autres branches de la physique. Un domaine important est l'étude des propriétés des faisceaux d'électrons et de la propagation des ondes dans un tel milieu.

Quels sont les phénomènes que nous allons étudier en physique des plasmas? Le sujet principal sera l'étude des ondes dans le plasma. Pour la réalisation de la fusion thermonucléaire contrôlée, il est également nécessaire de pouvoir confiner le plasma: c'est le problème de l'équilibre entre les forces qui confinent le plasma et la pression thermique. La stabilité de l'équilibre revient en fait à l'étude des modes qui peuvent le perturber. Un autre sujet important sera l'étude des phénomènes de transport dans un plasma: transport de particules, mais également conductibilité thermique et conductibilité électrique.

Quelles sont les méthodes que nous emploierons? Les plasmas que nous allons étudier seront décrites par des théories classiques (non quantiques et, dans la plupart, des cas non relativistes). Nous allons dans le plupart des cas faire la démarche suivante:

- Equation de base: Equations de Maxwell qui font intervenir la densité de charge  $\rho$ , et de courant  $j$ . Ces quantités sont caractéristiques du milieu, c.-à-d., du plasma.

- Pour obtenir  $\rho$  et  $\mathbf{j}$  en fonction de  $\underline{\mathbf{E}}$  et  $\underline{\mathbf{B}}$ , il nous faut une description (ou modèle) du plasma. Cette description pourra être une description fluide ou cinétique.

D'une manière symbolique on peut décrire les phénomènes qui se passent dans le plasma de la manière suivante:

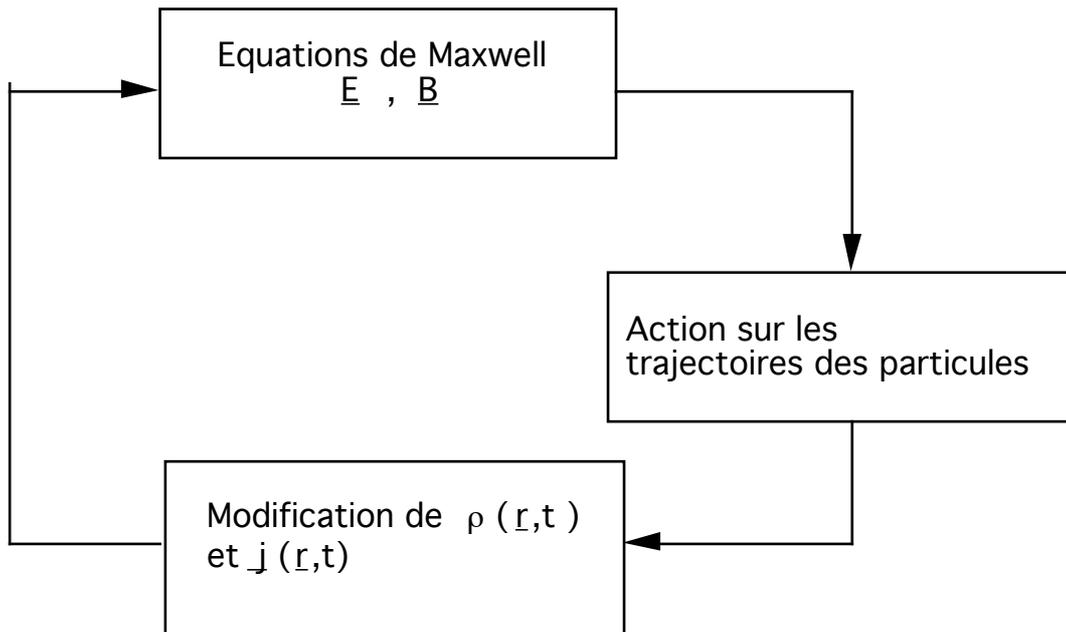


Fig. I.1 Action des champs électromagnétiques sur un plasma

Les champs électrique et magnétique, qu'ils soient statiques, uniformes ou variables dans le temps et dans l'espace, agissent sur le mouvement des particules et modifient les densités de courant  $\mathbf{j}$  et de charge  $\rho$  qui entrent en jeu pour la détermination des champs. C'est ce que vous avez vu dans le **cours d'électrodynamique**. Nous retrouverons des notions que vous avez vu lors de votre cours d'électrodynamique comme la notion de tenseur diélectrique, de relation de dispersion des ondes électromagnétiques.

La simulation particulière est une méthode d'étude du plasma qui utilise directement ce schéma. Les champs  $\underline{\mathbf{E}}$  et  $\underline{\mathbf{B}}$  modifient la trajectoire des ions et des électrons, ce qui modifie la densité de charge  $\rho$  et de courant  $\mathbf{j}$ , qui à

leur tour, en agissant comme terme de source dans les équations de Maxwell, modifient  $\underline{E}$  et  $\underline{B}$ .

## II) LES CARACTERISTIQUES DU PLASMA

On décrit un plasma en spécifiant **la densité de ions ou d'électrons**. Nous définirons la densité comme le nombre d'électrons par unité de volume, soit  $n_e$ . Si les ions ont une charge  $+Ze$ , la densité ionique  $n_i$  est obtenue par la condition de neutralité de charge

$$n_e e = n_i Z e$$

$$n_i = \frac{n_e}{Z}$$

Si  $Z$  vaut 1 nous avons alors

$$n_i = n_e$$

Une autre quantité importante est la **température  $T$** . Là il nous faudra distinguer entre température électronique  $T_e$  et température ionique  $T_i$  bien que les deux gaz d'électrons et d'ions soient mélangés. Il est évident qu'à l'équilibre ces deux quantités sont égales. Cependant, lorsqu'on calcule les temps d'équipartition d'énergie, on constate les échelles de temps suivantes:

- les électrons se thermalisent entre eux;
- les ions se thermalisent entre eux;
- finalement, ces deux gaz se thermalisent entre eux.

Dans beaucoup de cas, le temps de confinement (c. à d. où le plasma non entretenu existe) est trop court pour que le troisième processus ait lieu, d'où une température électronique et une température ionique qui sont différentes.

Signalons également qu'il y a également lieu dans certains cas de tenir compte d'une *anisotropie de température*. En effet, dans beaucoup de cas, le

plasma est immergé dans un champ magnétique: les propriétés de transport de l'énergie diffèrent dans la direction du champ et dans celle perpendiculaire au champ.

Les plasmas de laboratoire ont pour paramètres

- Densité :  $n_e = n_i = 10^{14} - 10^{17}$  particules/m<sup>3</sup>
- Température : 0.1 eV à une dizaine d'eV  
(1 eV  $\approx$  11'000° K)

Les plasmas d'intérêt pour la fusion thermonucléaire ont une densité de l'ordre de  $10^{19} - 10^{20}$  particules/m<sup>3</sup>. Les températures sont de 1 keV à 10 keV.

Le tableau I donne les densités et températures typiques de quelques plasmas.

Type de plasma	Densité [m <sup>-3</sup> ]	Température [eV]
Plasma interstellaire	$10^5 - 10^7$	$10^{-2} - 10$
Plasma ionosphérique	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{-2} - 1$
Décharge gazeuse	$10^{12} - 10^{19}$	quelques eV
Plasmas industriels	$10^{16} - 10^{19}$	1 - 100
Plasma de fusion	$10^{19} - 10^{21}$	$\sim 10^4$

Tableau I  
Caractéristiques de quelques plasmas

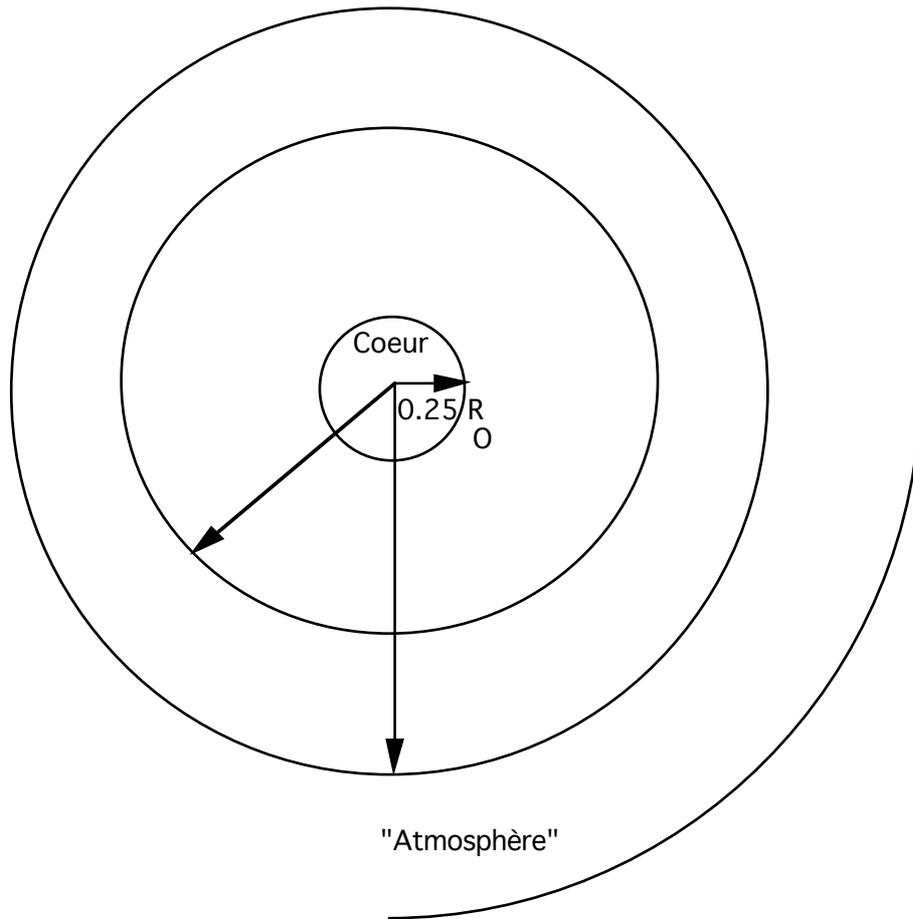
II) LE PLASMA SOLAIRE

Le soleil est une boule de plasma dont les réactions de fusion nucléaire nous fournissent l'énergie. Les données du soleil sont résumées dans le tableau II.

Masse du soleil $M_{\odot}$	$1.99 \times 10^{30} \text{kg}$
Rayon du soleil $R_{\odot}$	$6.96 \times 10^8 \text{ m}$
Puissance rayonnée	$3.9 \times 10^{26} \text{W}$

Tableau II

La structure du soleil est présentée sur la figure 1

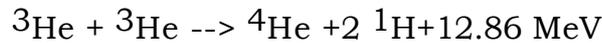
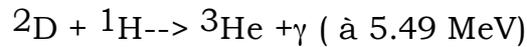
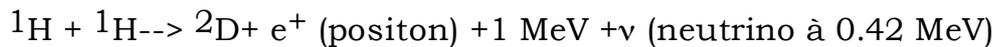


**Figure 1**

Le cœur est la région très chaude du soleil (Température environ  $1.5 \times 10^7$  °K) où se produisent les réactions de fusion qui produisent la puissance rayonnée. Son rayon est  $0.25$  rayon solaire  $R_{\odot}$  mais sa masse atteint la moitié de la masse totale  $M_{\odot}$ . Dans le cœur, les réactions de fusion ont lieu:

- entre des noyaux d'hydrogène pour former un noyau de deutérium;
- entre un noyau de deutérium et un noyau d'hydrogène pour former un noyau de  $\text{He}^3$ ;
- entre deux noyaux de  $\text{He}^3$  pour donner un noyau d' $\text{He}^4$  et deux protons.

Nous avons donc les réactions de fusion suivantes:

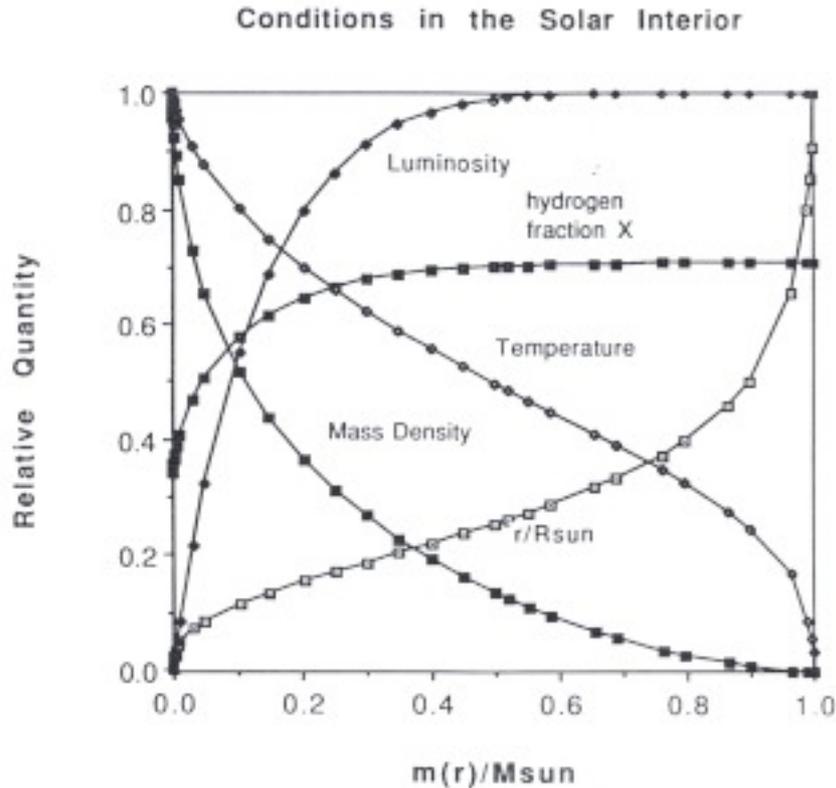


soit au total:



En résumé, avec 4 noyaux d'hydrogène, un noyau d' $\text{He}^4$  est formé. *Le défaut de masse entre les 4 protons et le noyau d' $\text{He}^4$  est converti en énergie.* Cette énergie dans le cœur du soleil est sous forme de rayons  $\gamma$ . Notez que la première réaction (celle qui donne naissance au noyau de deutérium) donne naissance à un neutrino  $\nu$ . Des expériences d'observations des neutrinos sur la terre ont montré une anomalie sur le nombre de neutrinos détectés, ce qui donne lieu à des questions de physique très intéressantes sur le neutrino (et non sur les réactions de fusion dans le soleil!)

Dans la zone radiative, elle est transportée par diffusion: les rayons  $\gamma$  sont absorbés puis ré-émis à des longueurs d'onde plus élevées. Notez que nous recevons l'énergie solaire dans le spectre visible (énergie de l'ordre de l'eV) alors que les rayons  $\gamma$ , dus aux réactions de fusion, ont une énergie de plusieurs MeV. Dans la zone de convection, le gaz solaire est agité de mouvement de convection. Finalement au-delà d'une fois le rayon solaire  $R_{\odot}$ , nous arrivons dans l'atmosphère solaire.



**Figure 2**

Variation des paramètres à l'intérieur du soleil, L'axe horizontal est la masse au rayon  $r$  normalisée à la masse totale du soleil. Le rayon correspondant est donné par la courbe  $r/R_{\text{sun}}$ . Notez la variation de la densité (Au centre du soleil elle vaut  $115 \text{ g/cm}^3$ , alors que la densité moyenne est de  $1 \text{ g/cm}^3$ ), celle de la température (au centre du soleil elle est de l'ordre de 15 millions de degrés). Le soleil "brûle" 564 millions de tonnes d'hydrogène par seconde et les convertit en 560 millions de tonnes d'hélium. C'est l'énergie équivalente (selon la réaction  $E=mc^2$ ) des 4 millions de tonnes manquantes qui nous fournit l'énergie rayonnée par le soleil.

La surface du soleil est relativement froide ( $5700^\circ \text{ K}$ ) et est relativement peu épaisse. Cette couche est appelée photosphère. La photosphère est parsemée de tâches sombres froide ( $4500^\circ \text{ K}$ ) entourées de zones bouillantes et chaudes ( $7000^\circ \text{ K}$ ) avec une forte concentration de champs magnétiques. Ces tâches solaires ont un cycle d'environ de 11 ans.

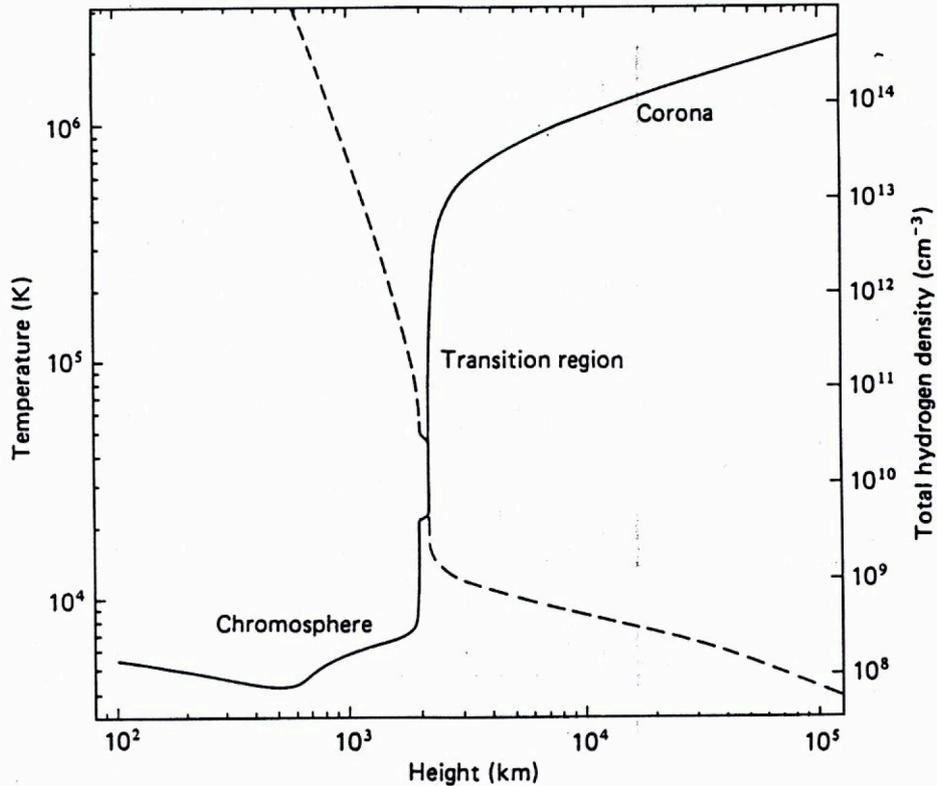


Figure 5.6. Temperature (solid line) and density (dashed line) versus height in the solar atmosphere. The height  $h = 0$  occurs at the level of unit optical depth for visible radiation. (From Withbroe and Noyes, 1977. Reproduced, with permission, from the *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 15, © 1977, by Annual Reviews Inc.) Also see Noyes and Avrett (1987).

### Figure 3

Paramètres de la chromosphère, de la couronne solaire en fonction de l'altitude

Les zones au-dessus de la photosphère sont:

- la chromosphère
- une zone de transition
- la couronne solaire.

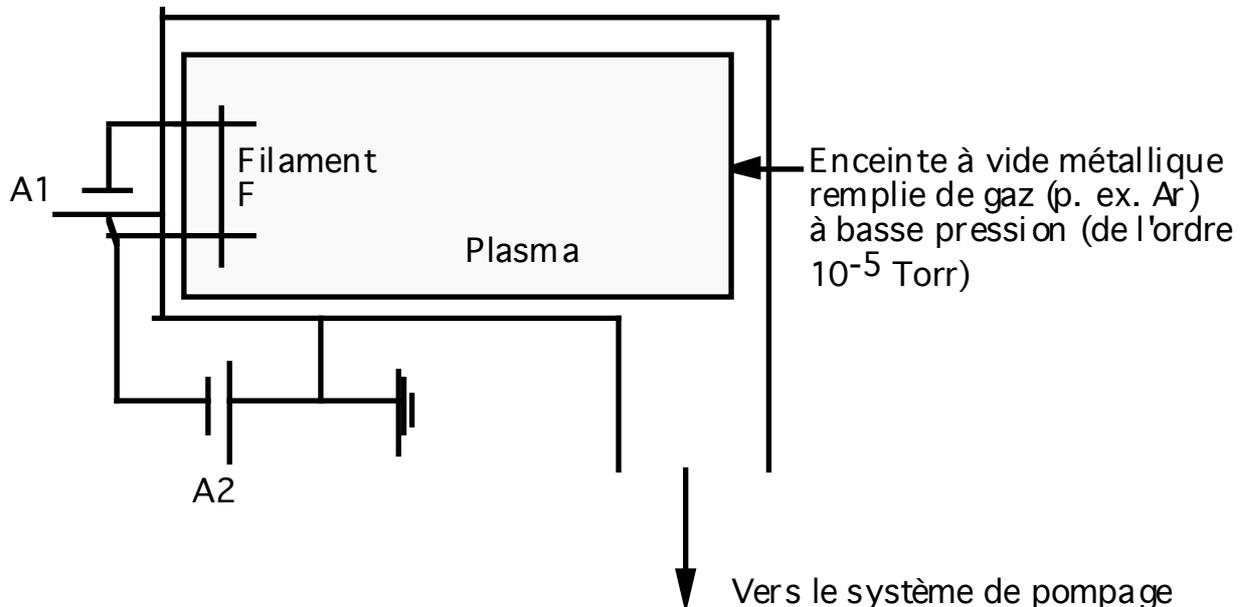
La densité et la température dans ces zones sont indiquées sur la figure 2. Il est intéressant de noter que la température de la couronne est de l'ordre du million de degrés alors que celle de la photosphère est inférieure à  $10^4$  °K La couronne est le siège de nombreuses activités, générant par exemple le vent

solaire qui n'est autre qu'un plasma qui est éjecté du soleil. La densité du vent solaire est entre  $10^6 - 10^8 \text{ m}^{-3}$  avec une température entre 1 et 100 eV.

#### IV) QUELQUES SOURCES DE PLASMA DE LABORATOIRE

Nous allons décrire ici quelques machines qui sont couramment utilisées lors des expériences de physique fondamentale des plasmas. On distingue les plasmas non magnétisés et les plasmas magnétisés selon qu'il y a ou non un champ magnétique statique  $\underline{B}_0$ .

Les plasmas non magnétisés sont créés par différentes méthodes. La première utilise des électrons énergétiques émis par des filaments de tungstène. L'énergie de ces électrons primaires est supérieure à l'énergie d'ionisation du gaz utilisé (Table. III), qui est souvent un gaz noble comme l'Argon. Les gaz nobles sont souvent utilisés car ils sont monoatomiques et lors de l'ionisation donnent une population d'ions ayant un seul rapport (charge /masse) pour autant qu'il n'y ait que des ions une fois ionisés. Le schéma d'une telle expérience est présenté sur la figure 4.



**Figure 4**

Schéma d'une installation permettant de créer un plasma non magnétisé.

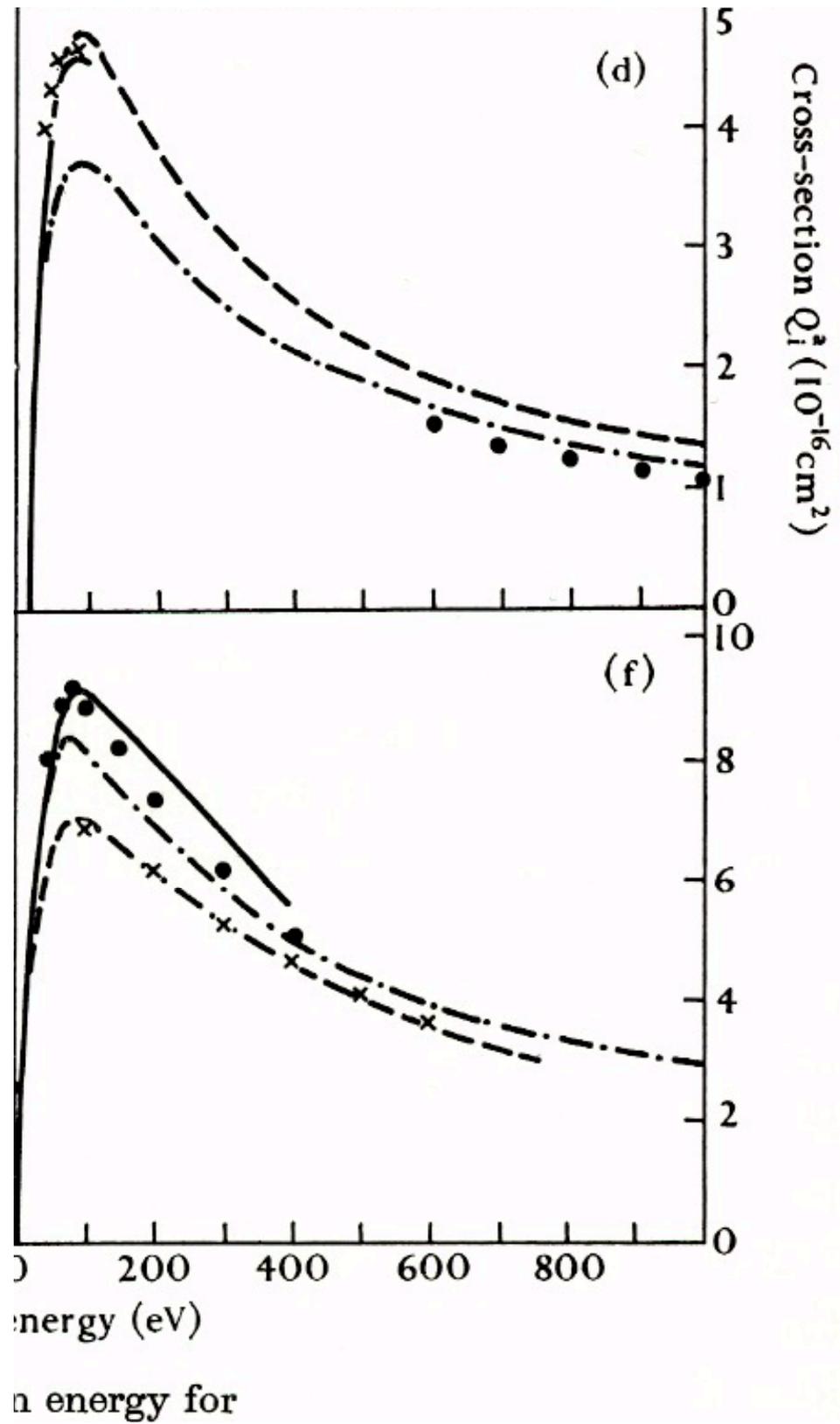


Fig. 5. Section efficace d'ionisation pour l'argon par des électrons

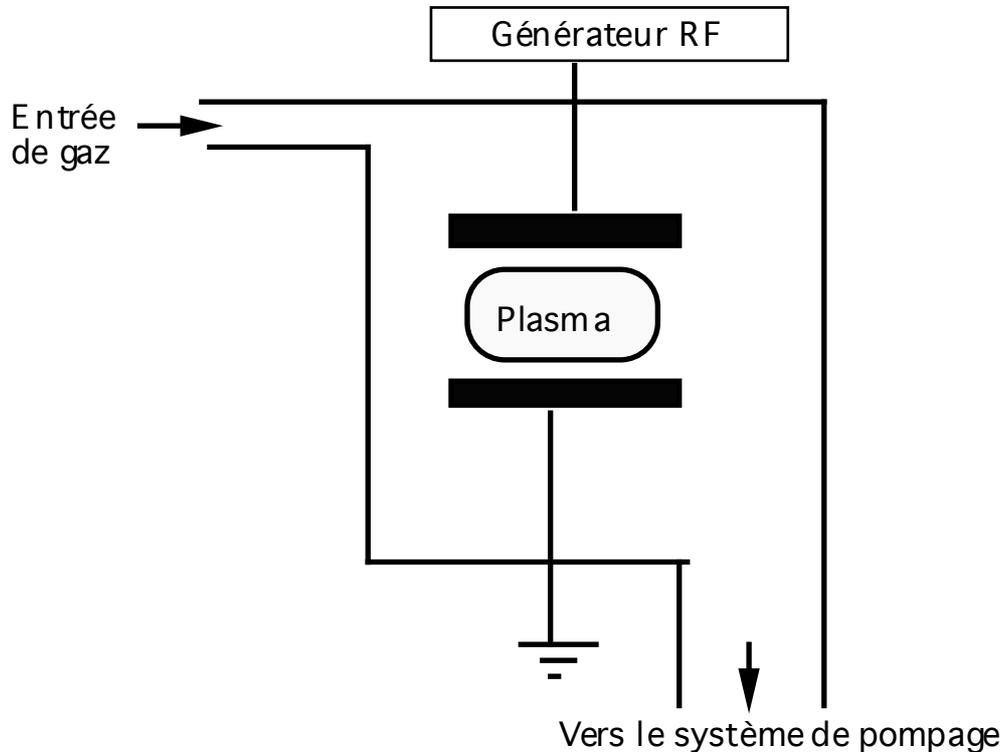
Ion	$E_{\text{ioni}}[\text{eV}]$	$E_{\text{imax}} [\text{eV}]$	$\sigma_{\text{ionin}}(E_{\text{imax}})[10^{-16} \text{ cm}^2]$
H <sup>+</sup>	13.54	56	0.7
He <sup>+</sup>	24.46	126	0.37
He <sup>++</sup>	78	500	0.0012
Ne <sup>+</sup>	21.5	150	0.78
Ne <sup>++</sup>	62.6	250	0.045
A <sup>+</sup>	15.76	90	3.21
A <sup>++</sup>	43.4	120	0.31
Kr <sup>+</sup>	14	80	5
Kr <sup>++</sup>	38.6	100	0.5
Xe <sup>+</sup>	12.13	115	4.8
Xe <sup>++</sup>	33.3	100	0.75

Table III. Energie d'ionisation  $E_{\text{ioni}}$  [eV], énergie  $E_{\text{imax}}$  pour laquelle la section efficace d'ionisation est maximale et valeur  $\sigma_{\text{ionis}}(E_{\text{imax}})$  de la section efficace maximale pour quelques états d'ionisation des gaz.

On fait le vide dans l'enceinte (pression de base  $< 10^{-6}$  Torr) puis on introduit le gaz à une pression typique de  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$  Torr. Les filaments de tungstène sont chauffés grâce à l'alimentation A1 par effet Joule jusqu'à une température d'environ  $2500^{\circ}\text{C}$  où ils émettent des électrons. Ils sont polarisés à environ 100 V par rapport à l'enceinte en utilisant l'alimentation A2. A cette énergie, la section efficace de ionisation est maximale. Les plasmas obtenus ont une densité de l'ordre de  $10^8$  -  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . La température électronique  $T_e$  est de quelques eV et la température ionique  $T_i$  d'environ 0.1 - 0.2 eV.

Une autre technique souvent employée pour des applications industrielles est l'utilisation de radiofréquence (R.F.). La puissance R.F. (de l'ordre d'une dizaine à une centaine de Watt à une fréquence de quelques dizaines de MHz) est appliquée entre deux électrodes (Fig. 6). Elle permet d'accélérer les électrons jusqu'à une énergie suffisante pour ioniser le gaz. La densité et la température de ces plasmas sont typiquement de  $10^9$  -  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . La température électronique est de quelques eV mais la fonction de distribution

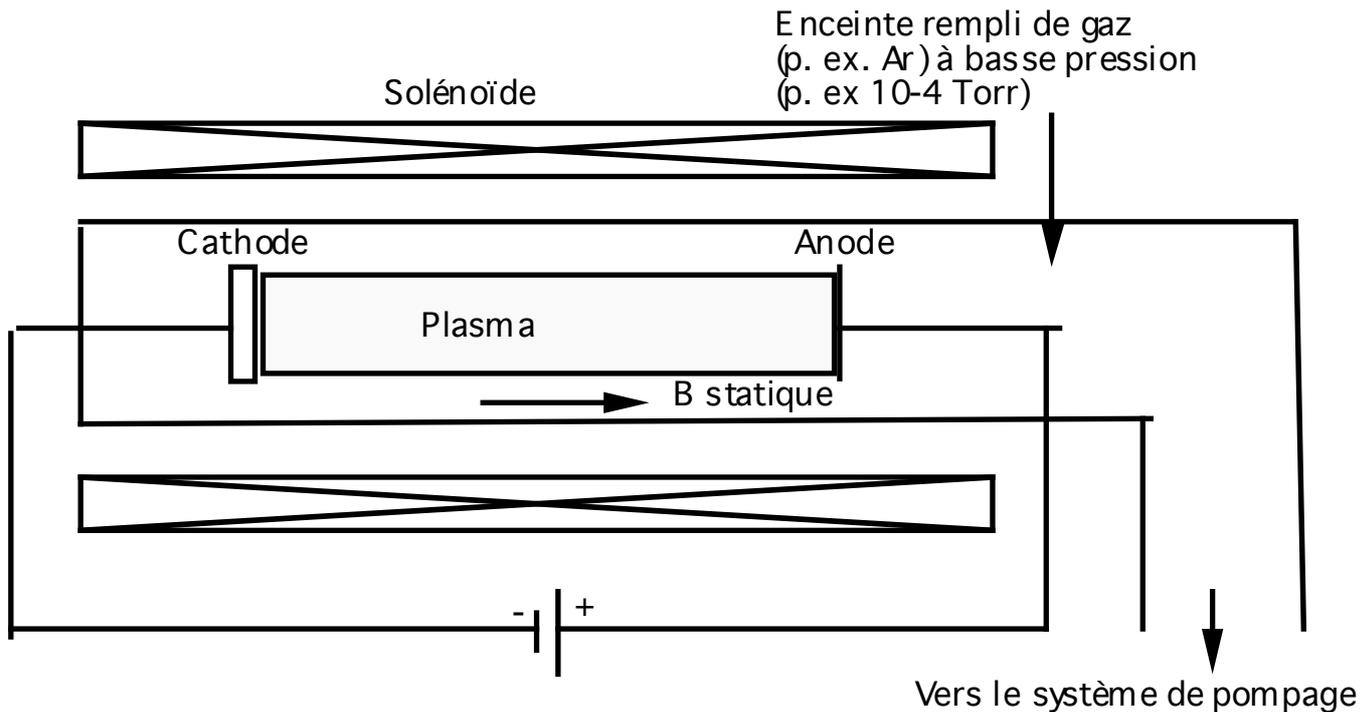
électronique n'est pas une maxwellienne. Les ions sont froids et proches de la température du gaz neutre. On peut également créer des plasmas avec des micro-ondes.



**Figure 6**

Schéma d'une machine à plasma utilisant une décharge R.F..

Les plasmas magnétisés jouent un rôle très important pour l'étude de la physique des plasmas. En effet, l'introduction d'un champ magnétique statique enrichit considérablement la physique des phénomènes qui peuvent être générés dans le plasma. La configuration la plus simple est celle d'une colonne de plasma cylindrique immergée dans un champ magnétique statique homogène  $\underline{B}_0$ . Le champ  $\underline{B}_0$  est créé par des bobines. Le plasma peut être créé par ionisation d'un gaz noble. Les électrons ionisants sont émis par une cathode recouverte d'oxyde de Baryum (température d'émission  $\sim 1000^\circ \text{C}$ ) ou d'hexaborure de Lanthane  $\text{LaB}_6$  (température d'émission  $\sim 1500^\circ \text{C}$ ). Le schéma d'une telle machine est présenté sur la figure 7.



**Figure 7**

Schéma d'une machine créant un plasma magnétisé par décharge

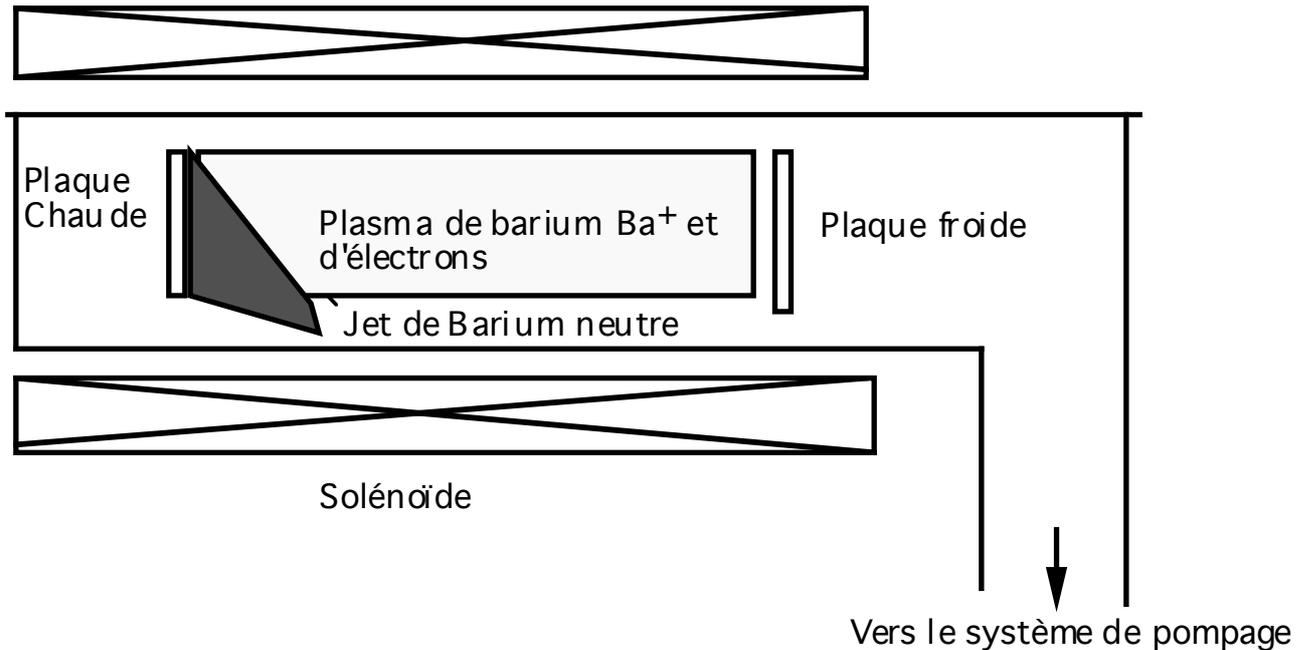
Les densités sont analogues à celles obtenues dans les machines analogues sans champ magnétique, c.à-d. d'environ  $10^9$  à  $10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ . La température électronique  $T_e$  est de quelques eV et la température ionique  $T_i$  de quelques dixièmes d'eV.

Un autre type de machine produisant un plasma magnétisé est la machine Q (Q pour "quiescent", c.-à-d. calme. Le plasma produit n'a pas de fluctuation et est donc "calme", d'où le nom de machine Q). Le processus d'orientation des ions est basé sur le phénomène de ionisation par contact. Certains alcalins (Caesium, Potassium, Baryum) peuvent être ionisés au contact d'un métal comme le tungstène. La base physique du phénomène est liée au fait que le potentiel d'ionisation  $E_{\text{ioni}}$  de ces alcalins est comparable (3.87 eV pour le Cs, 4.32 eV pour le K et 5.19 eV pour le Ba) par rapport au potentiel de sortie  $\Phi_{\text{extr}}$  du métal (4.52 eV pour le tungstène). Des ions sont ainsi produits par ce phénomène. La probabilité d'ionisation sur une plaque de W à  $T = 2500$  °K (appelée plaque chaude) est de 0.91 pour le Cs, 0.56 pour le K, 0.083 pour le Ba. Ces probabilités sont calculées à partir de l'équation de Langmuir-Saha:

$$n_i/n_n = 1/2 \exp (e(\Phi_{\text{extr}} - E_{\text{ioni}})/k_B T)$$

où  $n_i$  et  $n_n$  sont respectivement la densité d'ions et de neutres.

Pour produire les électrons, il suffit de chauffer la plaque de W jusqu'à une température qui donne lieu à une émission d'électrons. Le schéma de la machine Q est présenté sur la figure 8.



**Figure 8**

Schéma d'une machine Q produisant un plasma de Ba. En remplaçant le Ba par du Cs, du K on obtient un plasma de Cs ou de K.

Le plasma obtenu a une densité de l'ordre de  $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . La principale caractéristique est l'égalité des températures électronique et ionique  $T_e = T_i \approx 0.2 \text{ eV}$  qui est la température  $T$  de la plaque chaude de W. De plus on peut obtenir un plasma complètement ionisé en soignant le vide de base et la technologie de l'injecteur de vapeur de métal alcalin pour éviter d'avoir des atomes neutres dans la région où se trouve le plasma.

Nous discuterons dans le chapitre sur la fusion thermonucléaire des plasmas d'intérêt pour la fusion.

## REFERENCES

Text- books:

**Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion** par Francis Chen, Plenum Publishing Corporation (1984)

**Introduction to Plasma Physics** par R.J. Goldston et P.H. Rutherford (IOP -1995)

**The Physics of Plasmas** by T.J.M. Boyd and J.J. Sanderson, Cambridge University Press (2003)

**Principles of Plasma Physics** par N. A. Krall et A.W. Trivelpiece (Niveau avancé)

**Physique des Plasmas** par J.-L. Delcroix et A. Bers, Inter Editions/ CNRS Edition (1994) (en français)

**The Physics of Fluids and Plasmas: an introduction for astrophysicist** par A. R. Choudhuri, Cambridge University Press (1998)

**Principle of Plasma Discharges and Material Processing**, par M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Wiley-Interscience (1994)

Les livres suivants sont des livres de vulgarisation de très bon niveaux:

**L'univers de plasmas** par Pascal Bradu (Edition Flammarion ; Janvier 1999).  
Un bon survol du sujet

**Généalogie de la matière** par Michel Cassé (Edition Odile Jacob; Octobre 2000) pour les réactions de fusion qui génèrent les éléments dans les étoiles