

## **I.1– Introduction**

Le plasma a été d'abord identifié dans un tube de Crookes, et ainsi décrit par Sir William Crookes en 1879, qui l'avait appelé "la matière radiante". La nature de la matière dans le tube de Crookes "cathodique" a été par la suite identifiée par le physicien britannique Sir JJ Thomson en 1897, et surnommé "plasma" par Irving Langmuir en 1928 [1].

En physique et en chimie, le plasma est un état de la matière similaire au gaz dans lequel une certaine partie des particules est ionisée. Le principe de base est que le chauffage d'un gaz fait briser les liaisons moléculaires, dissociant ainsi les molécules en leurs atomes constitutifs. La poursuite du chauffage du gaz conduit à l'ionisation des atomes (extraction d'électrons), le transformant en un plasma contenant des particules chargées : des ions positifs et des électrons libres négatifs [2].

On peut dire qu'un plasma est une collection de particules chargées, localisées dans l'espace, avec (généralement) la densité des charges positives à peu près égale à la densité des charges négatives. Mais il existe des plasmas dits "non-neutre" composés presque exclusivement d'électrons ou d'ions (e. g. faisceau d'électrons) qui démontrent les propriétés collectives d'un plasma. Les charges positives sont généralement des ions, des atomes ou des molécules d'où on a enlevé un ou plusieurs électrons. Les charges négatives sont généralement des électrons, mais dans certains milieux avec des espèces électronégatives, on peut avoir la formation d'ions négatifs. Des exemples sont  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $O^-$ . Normalement, on considère cette collection de particules chargées un plasma si la dimension de cet "objet" est plus grande qu'une distance de "blindage", une distance sur laquelle l'effet d'influences externes (e. g. des plaques chargées) est réduit ou éliminé par une redistribution interne des charges. Le plasma "s'isole" du monde extérieur. Le mouvement des particules chargées peut être dominé par des collisions avec d'autres particules chargées (si le plasma est "fortement ionisé") ou par collision avec des neutres (si le plasma est "faiblement ionisé").

Pour caractériser un plasma, il faut tenir compte du nombre d'espèces présentes et de leurs différents états de charge, puis étudier l'évolution de la densité, de la température et de la fonction de distribution dans l'espace et en vitesse, ce pour toutes les réactions susceptibles de se produire, qu'elles soient chimiques ou nucléaires, sans oublier les collisions qui peuvent avoir lieu. Si les processus de recombinaison entre électrons et ions n'équilibrent pas le

processus d'ionisation, le plasma est dit hors d'équilibre thermodynamique. L'étude complète de tous les phénomènes apparaissant dans un plasma est à ce jour impossible, il en résulte une simplification initiale nécessaire à la distinction et au classement des plasmas [3].

Si les électrons sont chauds et les ions froids, on l'appelle un plasma "froid", et si les ions/atomes sont chauds, on l'appelle un plasma "chaud" même si la température électronique est plus faible que pour un plasma froid.

Historiquement, les premières études sur les plasmas chauds se basaient sur les observations astrophysiques, notamment celles relatives au soleil. Pour tenter d'expliquer l'origine de l'énergie des étoiles et de celle du soleil en particulier, le physicien Allemand Bethe imagina, en 1939, qu'à l'intérieur du soleil, la température dépasse  $10^7$  K et il s'y produit un ensemble complexe de réactions de fusion de noyaux légers tels que ceux des isotopes de l'hydrogène et de l'hélium. Quelques années plus tard, on découvrit que la haute atmosphère solaire est également un plasma chaud. L'étude des plasmas chauds a connu un vif regain d'intérêt depuis la fin des années 1950, lorsque des chercheurs Soviétiques sont arrivés à produire dans des machines, appelées tokamak, des plasmas atteignant des températures proches de  $10^6$  K. Depuis, les performances des plasmas chauds produits en laboratoire à des fins de fusion contrôlée ne cessent de s'améliorer: des températures aussi élevées que  $10^8$  K associées à des densités d'électrons de l'ordre de  $10^{13}$  cm<sup>-3</sup> ont été obtenues pendant une durée de 0.1 s [2].

## **I.2– Plasmas astrophysiques**

Il est bien connu que la matière présente dans l'Univers se trouve essentiellement (à plus de 99%) à l'état de plasma. Les conditions physiques (température et densité) des plasmas rencontrés dans l'Univers peuvent être extrêmement variées. Le plasma le plus proche de nous et le mieux étudié est le Soleil qui peut être séparé en deux parties : l'intérieur du Soleil incluant le noyau, la zone radiative et la zone convective dont l'étude est limitée par l'observation, et l'atmosphère solaire (photosphère, chromosphère, région de transition et couronne) plus accessible aux observations.

### **I.2.a– Structure interne du soleil**

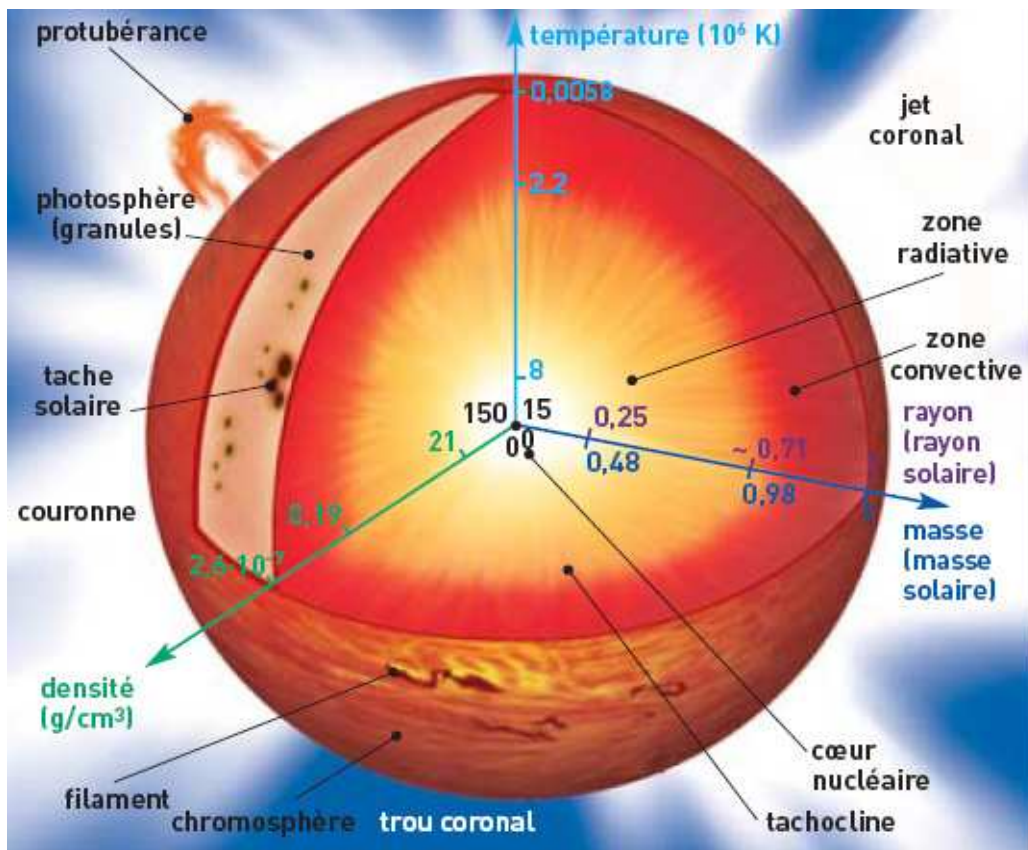


Figure 1 : Structure du Soleil.

Bien que le Soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul près de 99,8 % de la masse du système solaire. Sa forme est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement aux pôles estimé à neuf milliardièmes [4], ce qui signifie que son diamètre polaire est plus petit que son diamètre équatorial de seulement dix kilomètres. La composition chimique de la matière solaire peut être déterminée, au moins dans l'atmosphère, par l'étude des raies spectrales émises. Les abondances relatives indiquent environ 71% d'hydrogène, 27% d'hélium, et des quantités très faibles de 2% des autres éléments plus lourds (C, N, O, ...), quantités pourtant essentielles à l'étude des propriétés physiques du milieu (températures, densités) souvent déduites des spectres de raies. Du centre jusqu'à la surface, quatre zones successives peuvent y être distinguées pour la structure interne du soleil :

- Le cœur ou noyau : on considère que le cœur du Soleil s'étend du centre à environ 0,25 rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à  $150\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (150 fois la densité de l'eau sur Terre) et sa température approche les 15 millions de kelvins (ce

qui contraste nettement avec la température de surface du Soleil, qui avoisine les 5800 kelvins). C'est dans le cœur que se produisent les réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) qui transforment l'hydrogène en hélium.

- La zone de radiation : la zone de radiation ou zone radiative se situe approximativement entre 0,25 et 0,7 rayon solaire. La matière solaire y est si chaude et si dense que le transfert de la chaleur du centre vers les couches les plus extérieures se fait par la seule radiation thermique. L'hydrogène et l'hélium ionisés émettent des photons qui voyagent sur une courte distance avant d'être réabsorbés par d'autres ions. Dans cette zone, il n'y a pas de convection thermique car bien que la matière se refroidisse en s'éloignant du cœur, le gradient thermique reste inférieur au gradient thermique adiabatique. La température y diminue à 2 millions de kelvins.
- La tachocline : la tachocline est l'interface entre la zone radiative et la zone convective. Cette fine couche (estimée à 3000 km) est le siège de phénomènes qui ont motivé les récentes études : la turbulence et la circulation méridionale peuvent expliquer les changements soudains dans la composition chimique entre la zone radiative et la zone convective, et l'effet de dynamo solaire présent au niveau de cette interface permet de caractériser un site de création du champ magnétique.
- La zone de convection : la zone de convection ou zone convective s'étend de 0,7 rayon solaire du centre à la surface visible du Soleil. Elle est séparée de la zone de radiation par une couche épaisse d'environ 3000 kilomètres, la tachocline, qui d'après les études récentes pourrait être le siège de puissants champs magnétiques et jouerait un rôle important dans la dynamo solaire. La température y passe de 2 millions à ~5800 kelvins, de plus la densité y varie d'un facteur un million entre la base et la surface [5].

### **I.2.b– L'atmosphère solaire**

La structure externe du Soleil est généralement connue sous le nom d'atmosphère solaire. Elle comprend quatre zones principales : la photosphère, la chromosphère, la région de transition et la couronne. La chromosphère est séparée de la photosphère par la zone de température minimum et de la couronne par une zone de transition. Pour une raison encore insuffisamment élucidée, la chromosphère et la couronne sont plus chaudes que la surface du Soleil.

- La photosphère : est la partie externe de l'étoile qui produit entre autres la lumière visible. Pour le Soleil, la photosphère a une épaisseur d'environ 400 kilomètres. Sa température moyenne est de 6 000 K. Elle permet de définir la température effective qui pour le Soleil est de 5 781 K.
  
- La chromosphère : proprement dite est épaisse d'environ 2000 kilomètres. Sa température augmente graduellement avec l'altitude, pour atteindre un maximum de  $10^5$  K à son sommet. Son spectre est dominé par des bandes d'émission et d'absorption. La zone de transition entre la chromosphère et la couronne est le siège d'une élévation rapide de température, qui peut approcher 1 million de kelvins. Cette élévation est liée à une transition de phase au cours de laquelle l'hélium devient totalement ionisé sous l'effet des très hautes températures. Dans la chromosphère, les pertes d'énergie sont principalement radiatives ; elles varient de  $2 \times 10^5$  erg/cm<sup>2</sup>/s dans le soleil calme à  $10^7$  erg/cm<sup>2</sup>/s dans les régions actives.
  
- La région de transition : Dans cette région les gradients verticaux de température sont de l'ordre de 10 K par kilomètre, ils deviennent brusquement cent fois plus grands à 2 000 kilomètres d'altitude. C'est là, en effet, que l'influence de la couronne commence à être sensible, un flux conductif important chauffant toute la région de transition chromosphère-couronne. Cette partie de l'atmosphère solaire est difficilement observable dans le domaine visible, car les raies du spectre d'éclipse s'affaiblissent quand la température croît et que la densité diminue.
  
- La couronne solaire : est composée à 73 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium. Les températures sont de l'ordre du million de degrés. Bien plus vaste que le Soleil lui-même, la couronne solaire elle-même s'étend à partir de la zone de transition et s'évanouit progressivement dans l'espace, mêlée à l'héliosphère par les vents solaires. La couronne inférieure, la plus proche de la surface du Soleil, a une densité particulière comprise entre  $10^{14}$  m<sup>-3</sup> et  $10^{16}$  m<sup>-3</sup>, soit moins d'un milliardième de la densité particulière de l'atmosphère terrestre au niveau de la mer. Sa température, qui peut atteindre les 5 millions de kelvins, contraste nettement avec la température de la photosphère. Bien qu'aucune théorie n'explique encore complètement cette différence, une partie de cette chaleur pourrait provenir d'un processus de reconnexion magnétique. Dans la couronne

les pertes d'énergie se font par conduction, rayonnement et perte de masse (vent solaire); elles varient de  $104 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$  pour les pertes de masse dans le soleil calme à  $107 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$  par conduction dans les régions actives.

Pendant de nombreuses années, la couronne étant considérée comme relativement homogène, le mécanisme le plus probable semblait être un chauffage par dissipation des ondes de choc acoustiques créées, sous la photosphère, par la turbulence de la zone convective. Des observations et des calculs théoriques ont montré pourtant que ces ondes n'avaient aucune chance d'atteindre la couronne. Depuis la découverte des arches coronales, d'autres mécanismes ont été proposés, qui font appel soit à la dissipation d'ondes ayant pour support le champ magnétique des arches, soit au dépôt d'énergie liée à l'évolution du champ magnétique lui-même ou à la dissipation de courants électriques [6].

### **I.2.c– Le champ magnétique solaire**

Le Soleil est une étoile magnétiquement active. Toute la matière solaire se trouvant sous forme de gaz et de plasma en raison des températures extrêmement élevées, le Soleil pivote plus rapidement à l'équateur (25 jours environ pour un tour) qu'aux pôles (35 jours pour un tour). Cette rotation différentielle des latitudes solaires donne au champ magnétique solaire une forme de spirale en perpétuelle rotation, les lignes de champ se trouvant emmêlées les unes aux autres au cours du temps. Cet enchevêtrement serait au moins en partie responsable du cycle solaire.

Des cartes de champ magnétique longitudinales obtenues avec le DPSM de THEMIS ont permis d'étudier le gradient vertical du champ dans les taches et ont permis de montrer que le champ magnétique subit de fortes modifications entre la photosphère et la chromosphère avec ouverture des tubes de flux. Les gradients verticaux mesurés sont plus forts que ce qui est déduit des extrapolations. Des observations faites à THEMIS (DPSM) dans la raie Ca II 8542 ont également permis d'étudier des oscillations dans la pénombre des taches.

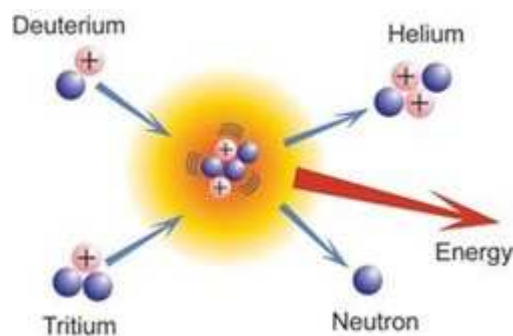
### **I.3– Plasmas de laboratoire**

Pour réaliser la fusion en laboratoire, il est nécessaire de produire des températures dépassant 10 millions de K. Il se pose alors avec acuité des problèmes liés au confinement du plasma non encore parfaitement résolus à ce jour. Néanmoins, le carburant est très abondant.

Le seul carburant nécessaire à un réacteur de fusion est l'hydrogène lourd (deutérium) présent dans l'eau de mer, et représente une source pratiquement illimitée de l'énergie. Si la fusion thermonucléaire contrôlée devient une réalité, cela constituerait l'une des grandes avancées de la civilisation, surtout dans notre monde moderne où les humains sont à la recherche de sources alternatives aux énergies fossiles qui vont bientôt s'épuiser. Toutefois, les problèmes scientifiques et techniques associés à un réacteur de fusion sont considérables.

### I.3.a– La fusion thermonucléaire contrôlée

Au XXe siècle, la science de la fusion a identifié la réaction de fusion la plus efficace réalisable en laboratoire: il s'agit de la réaction entre deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T). La réaction de fusion D–T est celle qui permet d'obtenir le gain énergétique le plus élevé aux températures les plus “basses”. Mais elle exige des températures de 150 millions de degrés, soit dix fois plus que la réaction H–H qui se produit au cœur du Soleil. À ces températures extrêmes, les électrons sont séparés des noyaux et le gaz se transforme en plasma, un gaz chaud électriquement chargé. Dans les étoiles, comme dans les machines de fusion, les plasmas constituent un environnement dans lequel les éléments légers peuvent fusionner et produire de l'énergie.



**Figure 2** : Illustration de la réaction de fusion D–T.

Les principales réactions de fusion d'intérêt pour la production d'énergie sur terre sont [7]:





Les énergies cinétiques qui permettent aux noyaux de vaincre la barrière coulombienne peuvent être fournies sous forme thermique en les maintenant à des températures extrêmement élevées. Un mélange D–T destiné à fusionner doit être porté à une température supérieure à 100 millions de degrés Celsius [8]. A ces températures, tous les atomes de deutérium et de tritium ont été dépouillés de leurs électrons et forment un plasma très chaud, mélange électriquement neutre de noyaux nus et d'électrons libres. Pour produire un plasma dont la température soit aussi élevée puis à le conserver pendant l'intervalle de temps nécessaire à l'obtention d'une réaction de fusion auto-entretenu, il est nécessaire de lui fournir une puissance estimée à  $10^{15}$  W en une micro-seconde, ce qui correspond à une énergie moyenne de 1 GJ.

La fusion inertielle ou fusion par faisceaux consiste à porter un petit volume de matière à très haute température et à très haute pression pendant un temps assez court. On crée ainsi un plasma temporaire et il faut qu'un maximum de réaction de fusion ait lieu dès que le plasma se forme. Ses inconvénients sont que le temps de confinement est très court, donc il y a peu de matière à confiner et le rendement du procédé est encore faible.

La fusion magnétique valable pour un plasma dense de l'ordre de  $10^{20} \text{ m}^{-3}$  consiste à utiliser des champs magnétiques appropriés pour confiner les noyaux de fusion sachant que toute particule chargée a la propriété de tourner autour des lignes de champ magnétique. L'avantage de ce mode de fusion est que le temps de confinement pourrait être infini.

Les 3 conditions pour réaliser un tel réacteur de fusion thermonucléaire sont :

**Une forte densité de particules :** La densité des particules en interaction doit être assez forte pour garantir que le taux de collisions soit élevé.

**Une haute température du plasma :** Le plasma doit être "chaud", sinon la vitesse des particules ne serait pas assez élevée pour permettre de franchir la barrière de répulsion électrostatique.



**Un temps de confinement long :** Un problème essentiel est de conserver le plasma chaud assez longtemps pour permettre que sa densité et sa température restent assez élevées pour qu'une quantité suffisante du combustible fusionne. Il est évident qu'aucun container n'est capable de supporter de telles températures, ce qui conduit à rechercher des techniques de confinement sans contact.

### **I.3.b– Principe de confinement magnétique**

Le plasma est un fluide électriquement conducteur, mais neutre globalement, et dans lequel les ions et les électrons se meuvent presque indépendamment les uns des autres. Plongés dans un champ magnétique, ils vont suivre des trajectoires en forme d'hélices qui s'enroulent autour des lignes de champ et y restent piégés. C'est le principe du confinement magnétique. Le plasma chaud et dense au sein duquel se déroulent les réactions de fusion doit être isolé de l'enceinte qui le contient afin d'éviter les impuretés qui peuvent le refroidir.

### **I.3.c– Le dispositif de confinement : Tokamak**

De nombreuses configurations magnétiques ont été mises au point en laboratoire pour confiner un plasma chaud. Mais les scientifiques ont concentré leurs recherches autour de la configuration dite tokamak qui est une abréviation des quatre mots russes "Toroïdalnaya-kamera-magnitnaya-katushka", signifiant "chambre toroïdale avec des bobines magnétiques". Cette configuration qui met en œuvre le principe du confinement magnétique du plasma, semble la plus prometteuse afin d'aboutir à produire de l'énergie à l'aide des réactions de fusion.

Le Tokamak est un instrument de fusion thermonucléaire d'abord développé en URSS. De grands tokamaks ont été construits et fonctionnent dans plusieurs pays (USA, France, Japon, Grande Bretagne) et plusieurs nouvelles machines sont en cours de construction. Dans un tokamak, comme le montre la figure 3 [9], les particules chargées qui constituent le plasma chaud sont confinées par un champ magnétique à l'intérieur d'un tore. Les forces magnétiques agissant sur les particules en déplacement du plasma empêchent le plasma de toucher les parois de la chambre. Le courant qui génère le champ magnétique est induit dans le plasma lui-même et le chauffe en même temps. Cependant, une réaction thermonucléaire auto-entretenu n'a pu encore être obtenue (réaction qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme).

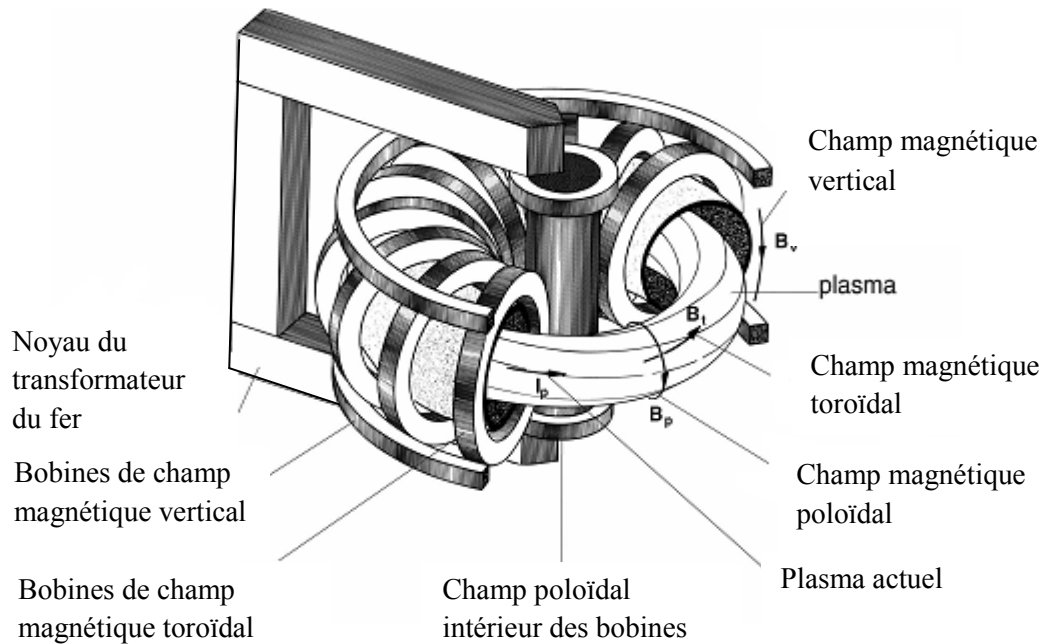


Figure 3 : Principe de conception d'un tokamak.

### I.3.d– Spectroscopie des rayons X dans la fusion

Au cours des 25 dernières années, la spectroscopie des rayons X a été intensivement développée pour les diagnostics des plasmas chauds. Depuis la première application de spectromètres à rayons X sur les dispositifs de fusion au début comme PLT et TFR, elle a été utilisée pour déterminer les paramètres du plasma de base tels que la température des ions et des électrons et leurs densités. Elle est maintenant souvent appliquée non seulement aux plasmas de basses densités dans les tokamaks et objets astrophysiques, mais aussi aux plasmas de hautes densités tels que ceux produits par laser. Il a été démontré, que la précision des paramètres du plasma déduits par spectroscopie de rayons X est concurrentielle à des méthodes normalisées pour les diagnostics de plasmas, tels que la diffusion Thomson et la spectroscopie d'échange de charge pour la température électronique et ionique, respectivement [10].

Le plus souvent, la spectroscopie des rayons X est appliquée au diagnostic des plasmas confinés magnétiquement à haute température pour la fusion thermonucléaire. La gamme de température électronique est comprise entre 0,5 et 15 keV et la plage de densité d'électrons est  $10^{19}$ – $10^{20}$  m<sup>-3</sup>.

Les conditions opérationnelles sont idéales pour observer les spectres d'impuretés avec des numéros atomiques  $Z$  intermédiaires tels que le silicium, l'argon, le chrome, le fer, le nickel, le cuivre et le krypton. Dans le centre du plasma chaud, la densité est suffisamment faible pour être traitée dans la limite de faible densité, où la plupart des ions sont dans l'état fondamental et seule une fraction non négligeable se trouve dans les états excités. Les ions sont excités par des collisions avec des électrons et sont désexcités par émission de photons. Pour des ions de charge intermédiaire et élevée, le taux de désexcitation par émission de photons est suffisamment élevé, même pour les états métastables. Ces conditions ont d'abord été trouvées dans les plasmas à basse densité de la couronne solaire et elles sont souvent présentes dans les expériences des plasmas de fusion magnétique telles que les tokamaks et stellarators. La spectroscopie des rayons X a également été appliquée à l'interprétation des spectres solaires, qui sont émis durant les éruptions solaires [11].

#### **I.4– Conclusion**

Si la fusion thermonucléaire contrôlée apparaît comme une application essentielle des études sur les plasmas chauds, il est d'autres utilisations possibles, où le plasma apparaît comme une source de rayonnement ultraviolet ou X très intense, ou comme un milieu accélérateur efficace pour générer des particules chargées très énergétiques. Ainsi, des impulsions de rayonnements ultraviolets ou X très intenses ont été obtenues par irradiation de cibles constituées de matériaux lourds par des impulsions électromagnétiques délivrées par des lasers de puissance impulsionnels. Le plasma apparaît alors comme un convertisseur de photons, puisqu'il fournit des photons dans le domaine des rayons X à partir de photons infrarouges ou visibles.