



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Physique.

Filière : Physique.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique.

Option : **Physique des matériaux.**

Présenté par :

Larbi daouadji djamila

THEME :

**Effet du matériau (w) faisant face au plasma pour la production
des ions négatifs d'hydrogène**

Soutenu le 13 septembre 2021.

Devant le jury composé de :

Mr. Charef Abbas

Président

Mme Benstaali Wafa

Examineur

Mr. Bentounes Jounayd

Encadreur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Je tiens avant tout à exprimer ma reconnaissance à Mr. Bentounes Jounayd pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude.

Je tiens également à remercier Mme Benstaali Wafa pour son acceptation d'examiner ce travail.

Je souhaite également remercier Mr. Charef Abbas d'avoir accepté d'évaluer mon travail en qualité de président de jury de soutenance.

Je remercie mes très chers parents et toute ma famille qui m'ont toujours soutenu durant tout mon parcours.

Liste des figures

<i>Figure N°</i>	Titre de la figure	Page
Figure 1.1.	Les quatre états de la matière.	13
Figure 1.2.	Schéma simplifié d'une gaine électrostatique.	16
Figure 1.3.	Photographie d'un Plasma hydrogène.	17
Figure 1.4.	schéma simplifié d'un réacteur à couplage capacitif	18
Figure 1.5.	schéma simplifié d'un réacteur à couplage inductif.	19
Figure 1.6.	mouvement cyclotronique d'un électron dans un champ magnétique	20
Figure 1.7.	Représentation schématique d'une source ECR	20
Figure 1.8.	Photographie du réacteur multi-dipolaire composé 20 sources	21
Figure 2.1.	Sections efficaces des principales réactions de fusion pour des applications énergétiques	23
Figure 2.2.	Schéma du réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER)	24
Figure 2.3.	Principe de fonctionnement d'une ligne d'injection de neutres	26
Figure 2.4.	Un schéma de la source ISIS Penning.	28
Figure 2.5.	Source de volume RF	29
Figure 3.1.	Schéma du réacteur ROSAE-III	32
Figure 3.2.	Les différentes géométries des sondes de Langmuir	33
Figure 3.3.	Exemple d'une caractéristique de sonde de Langmuir I (V)	34
Figure 3.4.	Spectre d'émission optique dans le visible la typique du plasma H ₂	36
Figure 3.5.	Spectre d'émission optique VUV typique du plasma H ₂	37
Figure 3.6.	Représentation schématique du processus de photo-détachement	37
Figure 3.7.	Schéma de principe d'une installation synchrotron	39
Figure 3.8.	Schéma de la source SCHEME-II couplage la ligne DESIRS du Synchrotron Soleil	39

Figure 4.1	Variations de la densité électronique en fonction de la puissance pour les deux matériaux (inox et Pyrex TM). Position de travail est B et deux pressions différent.	43
Figure 4.2.	Variations de la température électronique en fonction de la puissance pour les deux matériaux (inox et PyrexTM). Position de travail est B et deux pressions différent	43
Figure 4.3.	Variations des rapports des intensités des raies d'émission $H\beta/H\alpha$. Position B.	44
Figure 4.4.	Variations de la densité électronique en fonction de la puissance pour les deux matériaux (inox et Pyrex TM). Position de travail est B et deux pressions différent	45
Figure 4.5.	Variations de la Température électronique en fonction de la puissance, à deux pressions de référence: 6 <i>mTorr</i> et 12 <i>mTorr</i> pour les deux matériaux	46
Figure 4.6.	Variations du Potentiel Plasma en fonction de la puissance (W) pour les deux matériaux (Pyrex –W).	47
Figure 4.7.	Variations du Potentiel flottant en fonction de la puissance (W) pour les deux matériaux (Pyrex –W).	47
Figure 4.8.	Variations de photo-détachement en fonction de la puissance, est dans les deux cas considérés : Pyrex TM , Pyrex + W. $p= 12\text{mTorr}$.	48
Figure 4.9.	Variations de la densité absolue des ions négatifs en fonction de la puissance, est dans les deux cas considérés : Pyrex TM , Pyrex + W. $P= 12 \text{ mToor}$.	49
Figure 4.10.	Variations du rapport des densités ionique sur densité électronique (n_i/n_e) en fonction de la puissance, pour les deux matériaux étudiés (Pyrex TM – tungstène).	50
Figure 4.11.	Absorbance de l'état excité ro-vibrationnellement BX03 (a) et BX04 (b) de la molécule H ₂ dans son état fondamental. En rouge, le Pyrex TM seul, le bleu pour le tungstène ; position B, $p=12\text{mTorr}$.	51

Résumé

Compte tenu du besoin d'énergie dans le monde, les scientifiques et les chercheurs envisagent de trouver des sources productions des ions négatifs. Les progrès dans ce domaine nous obligent nécessairement à connaître le plasma. La production des ions négatifs sont utilisés dans le chauffage du plasma de fusion dans le réacteur **ITER** par la méthode de l'injection des neutres. Les ions négatifs d'hydrogène peuvent être créés en surfaces et/ou en volume. Les mécanismes de surfaces requièrent l'injection du césium qui, par sa contamination de la ligne de chauffage, pose de nombreux problèmes. Le but, est d'améliorer la production d'ions négatifs sans utiliser le césium.

Dans ce travail; La source **ROSAE-III** (ecR hydrOgen plaSma (ecR hydrOgen) pour faisceau neutrAl a été conçue et fabriquée par le groupe PMN au sein du laboratoire LPSC. Elle dispose de méthodes de détection: sondes électrostatiques, photodétachement laser, spectroscopie d'émission optique dans le visible et spectroscopie d'absorption utilisant le rayonnement synchrotron dans un montage expérimental spécial (i.e. source SCHEME-II).

Les ions négatifs sont produits dans ROSAE-III, en volume, principalement, par attachement dissociatif (AD), qui requiert des électrons froids, et des molécules d'hydrogène ro-vibrationnellement excitées $H_2(\mathbf{v}''; J'')$.

Notre étude concerne le Tungstène (W), un des plus prometteurs matériaux. Dans le but d'augmenter la production des ions négatifs, le matériau, ont été placés dans la zone de production du plasma. Les résultats des mesures ont montré que la densité absolue des ions négatifs a été multipliée par un facteur 2,5 passant de $1.97 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ à $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$.

Mots clefs : Plasma ECR - ions négatifs d'hydrogène - injection des neutres - fusion thermonucléaire - ITER - rayonnement synchrotron - Tungstène (W).

Abstract

Given the need for energy in the world, scientists and researchers plan to find sources of production of negative ions. Progress in this area necessarily requires us to know the plasma. The production of negative ions is used in the heating of the fusion plasma in the ITER reactor by the neutral injection method. Negative hydrogen ions can be created in areas and / or in volume. The surface mechanisms require the injection of cesium which, by its contamination of the heating line, poses many problems. And the goal is to improve the production of negative ions without using cesium.

*In this work; The **ROSAE-III** source (ecR hydrOgen plaSma (ecR hydrOgen) for neutrAl beam was designed and manufactured by the PMN group within the LPSC laboratory. It has detection methods: electrostatic probes, laser photo-detachment, optical emission spectroscopy in visible and visible and absorption spectroscopy using synchrotron radiation in a special experimental setup (i.e. source **SCHEME-II**).*

Negative ions are produced in ROSAE-III, in volume, primarily, by dissociative attachment (AD), which requires cold electrons, and ro-vibrationally excited hydrogen molecules $H_2(\mathbf{v}'', J'')$.

*Our study concerns **Tungsten** (W), one of the most promising materials. In order to increase the production of negative ions, the material was placed in the plasma production area. The results of the measurements showed that the absolute density of the negative ions was multiplied by a factor of 2.5 from $1.97 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ to $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$.*

ملخص

نظراً للحاجة إلى الطاقة في العالم، يخطط العلماء والباحثون للعثور على مصادر الأيونات السالبة أكثر إنتاجية. يتطلب التقدم في هذا المجال بالضرورة معرفة البلازما. يستخدم إنتاج الأيونات السالبة في تسخين بلازما الاندماج في المفاعل **ITER** يتم تسخين البلازما الإندماجية عن طريق الحقن المحايد. يمكن تكوين أيونات الهيدروجين السالبة في مناطق و / أو في الحجم. تتطلب آليات السطح حقن السيزيوم الذي يسبب العديد من المشاكل بسبب تلوثه لخط التسخين ، والهدف هو تحسين إنتاج الأيونات السالبة دون استخدام السيزيوم.

في هذا العمل؛ تم تصميم وتصنيع مصدر **ROSAE-III** (ecr hydrOgen plaSma for neutrAl bEam) بواسطة مجموعة PMN في مختبر LPSC. ويتميز بطرق إستكشاف: المجسات الكهروستاتيكية ، والفصل الضوئي بالليزر ، والتحليل الطيفي للإنبعاثات الضوئية في المنطقة الطيفية المرئية والمرئية والتحليل الطيفي والامتصاص باستخدام إشعاع السنكروترون في إعداد تجريبي خاص (أي مصدر **SCHEME**) .

يتم إنتاج الأيونات السالبة في **ROSAE-III** ، في الحجم ، في المقام الأول ، عن طريق الارتباط الانفصامي (AD) ، والذي يتطلب إلكترونات باردة ، وجزيئات الهيدروجين المثار اهتزازياً تتعلق دراستنا بال تنغستن (W) ، وهي واحدة من أكثر المواد الواعدة. من أجل زيادة إنتاج الأيونات السالبة، تم وضع المادة في منطقة إنتاج البلازما. أظهرت النتائج القياسات بأنه تم ضرب الكثافة المطلقة للأيونات السالبة بمعامل 2.5 من 1.97×10^{15} م⁻³ إلى 5×10^{15} م⁻³.

الكلمات المفتاحية: بلازما **ECR** ، أيونات الهيدروجين السالبة ، حقن المحايد ، اندماج نووي حراري ، الإشعاع **Synchrotron** ، التنغستن .

Sommaire

Introduction générale	10
Chapitre I : La physique des plasmas	12
1.1. Introduction	13
1.2. Différents états de la matière	13
1.3. Définition d'un plasma	13
1.4. Paramètre caractéristiques d'un plasma	13
1.1.1. Densité électronique	14
1.1.2. Température électronique	14
1.1.3. Potentiel plasma	15
1.1.4. Potentiel flottant	15
1.2. Types de plasmas	16
1.2.1. Plasmas chauds	16
1.2.2. Plasmas froids	16
1.3. Gaine électrostatique	16
1.4. Plasma d'hydrogène	17
1.5. Source Plasma	17
1.5.1. Plasma RF	18
1.5.2. Plasma ECR	19
1.6. Plasmas ECR à micro-onde	19
1.7. Conclusion	21
Chapitre II: Production des ions négatifs d'hydrogène H^-	22
2.1. Introduction	22
2.2. Les ions négatifs H^-	22
2.3. L'utilisation des H^- dans la fusion thermonucléaire	22
2.4. Chauffage du Tokamak par injection de neutres	24
2.4.1. Le Projet ITER	24
2.4.2. Le Chauffage par injection de neutres IDN (ou NBI)	25
2.5. Mécanismes de création des ions négatifs d'hydrogène	26
2.5.1. Production en volume	26
2.5.2. Production en surface	27

2.6. Les sources d'ions négatifs existantes	27
2.6.1. Les sources en surface	27
2.6.2. Les sources en Volume	28
2.7. Conclusion	30
Chapitre III: Dispositif expérimental	31
3.1. Introduction	31
3.2. Description de ROSAE-III	31
3.3. Diagnostics plasma dans ROSAE-III	32
3.3.1. Sonde de Langmuir.....	32
3.3.2. Spectroscopie d'émission optique dans le visible	35
3.3.3. Spectroscopie d'émission optique dans le VUV	36
3.3.4. Photo-détachement Laser	37
3.4. densité absolue des molécules ro vibrationnellement excitées H ₂	38
3.5. La source SCHEME-II	39
3.6. Conclusion	41
Chapitre IV : Résultats et discussions	42
4.1. Introduction	42
4.2. Etude comparative Inox-Pyrex	42
4.3. Etude de l'effet du matériau tungstène W sur production des ions négative H ₂	45
4.4. La densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées H ₂ (ν'' , J'')	50
4.5. Conclusion	52
Conclusion générale	53
Référence bibliographiques	55

Introduction Générale

La production d'énergie est un enjeu majeur pour le futur. En effet, les scientifiques et les chercheurs envisagent de trouver des sources d'énergie plus productives et moins nocives. Il s'agit d'une production d'énergie sans émission de CO₂ et des combustibles pratiquement inépuisables. A cet égard, **La physique des plasmas** est les plus étudiées dans ce contexte.

Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est le plus grand projet scientifique actuel au monde. Plusieurs chercheurs accompagnent la construction de cette machine internationale. Le but est d'identifier les défis à relever pour mettre au point un réacteur comme le développement d'une source d'ions négatifs pour le système de chauffage par injection de neutres etc.....

L'équipe Plasma- Matériaux-Nanostructures (PMN) du Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC) de Grenoble (France) dont la mission est de mener des études sur les interactions du plasma d'hydrogène et des matériaux pour produire des ions négatifs H^- s'inscrit pleinement dans ce projet.

Le développement dans ce domaine nécessite souvent une connaissance du plasma et de ses techniques, propriétés et comportements associées. Pour cela, nous avons analysé les résultats expérimentaux menés par J.BENTOUNES au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC) de Grenoble (France).

L'objectif de ce mémoire est de montrer l'effet du matériau tungstène faisant face au plasma pour la production d'ions négatifs a partir attachement dissociative (AD) d'un électron froids sur des molécules vibrationnellement excitées $H_2(v'', J'')$.

Ce Mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente le contexte général des quelques connaissances fondamentales sur les plasmas. Cela permet une discussion aisée des résultats expérimentaux.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude quelques notions sur l'utilisation des H^- dans la fusion thermonucléaire notamment le projet ITER. Le chauffage par injection de neutres IDN (ou NBI) est expliqué, surtout les mécanismes de création des ions négatifs d'hydrogène (en volume et/ou en surface). Finalement, présentation des sources d'ions négatifs existantes.

- Le troisième chapitre expose et détaille le montage expérimental ROSAE-III et les techniques principalement utilisées dans ce travail : Sonde de Langmuir, spectroscopie d'émission optique (visible et de l'ultraviolet du vide), et la technique Photo-détachement laser. La détermination la densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées H_2 (ν'' , J'') est également expliquée. Nous utiliserons une seconde source nommée SCHEME-II, menée sur la ligne de lumière DESIRS du synchrotron SOLEIL.
 - Le quatrième chapitre se concentre sur la présentation et discussion des résultats obtenus. Notre étude tourne autour de l'effet du Matériau Tungstène (W) sur Production les ions négatifs d'hydrogène. Cet effet nécessite la détermination des principaux paramètres du plasma (densité, température électronique....) ainsi que l'étude de leurs variations.
- Enfin, une conclusion générale résumant l'ensemble des principaux résultats obtenus sera présentée.

Chapitre I

La physique des Plasmas

1.1. Introduction

Les physiciens **Langmuir** et **Tanks** sont les premiers à utiliser le terme **plasma** qui indique le gaz ionisé contenu dans un tube de décharge. **La physique des plasmas** est née en **20^e** siècle en étudiant les décharges dans les gaz. Cette discipline a connu un essor grandissant jusqu'à ce jour par rapport à son intérêt scientifique et industrielle.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par un aperçu sur les différents états de la matière. Ensuite, nous allons déterminer certaines notions fondamentales de la physique des plasmas telles que sa définition, ses types et ses paramètres caractéristiques et sa gaine électrostatique. Puis, nous mettrons en lumière deux types de sources plasma : RF (radio fréquence) et RCE (résonance cyclotronique électronique).

Enfin, nous clôturons le chapitre par les plasmas d'hydrogène à micro-onde ECR.

1.2. Différents états de la matière

D'un point de vue scientifique, la matière dans l'univers connu est souvent classée en quatre états : solide, liquide, gazeux et plasma. La différence entre les quatre états réside dans l'intensité de l'interconnexion entre les particules qui composent chaque état.

En chauffant une substance solide ou liquide, les atomes ou molécules acquièrent plus d'énergie cinétique thermique jusqu'à ce qu'ils soient capables de surmonter l'énergie potentielle de liaison. Cela conduit à des transitions de phase qui se produisent à température constante pour une pression donnée. La quantité d'énergie requise pour la transition de phase est appelée chaleur latente.

Si une énergie suffisante est fournie, un gaz moléculaire se dissociera progressivement en un gaz atomique à la suite de collisions entre les particules dont l'énergie cinétique thermique dépasse l'énergie de liaison moléculaire.

A des températures suffisamment élevées, une fraction croissante des atomes possédera suffisamment d'énergie cinétique pour surmonter, par collisions, l'énergie de liaison des électrons orbitaux les plus externes, et il en résulte un **gaz ionisé** ou un **plasma** [1].

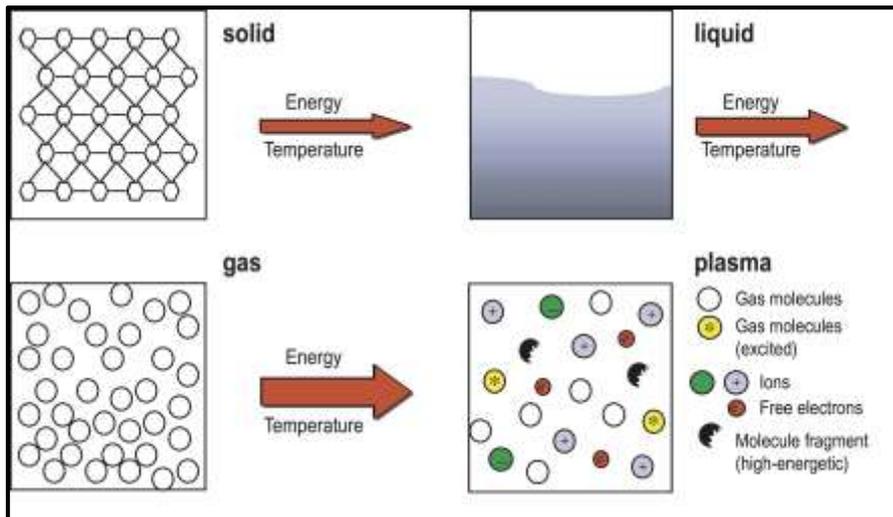


Figure (1.1).Les quatre états de la matière [2].

1.3. Définition d'un plasma

Le plasma est un gaz complètement ou partiellement ionisé, suffisamment dense mais électriquement neutre. Il est constitué de particules neutres (atomes, molécules, radicaux libres), d'ions positifs ou négatifs (particules ayant respectivement perdu ou capté des électrons) et d'électrons qui présentent un comportement collectif.

Ce quatrième état de la matière qui se trouve dans la nature comme les étoiles et les soleils et le milieu interstellaire constitue la majorité de l'univers (environ 99 %). On ne le rencontre pas sur notre terre à l'état naturel sauf dans les éclairs ou les aurores boréales. Mais, on peut le produire d'une manière artificielle en appliquant des champs électriques suffisamment puissants pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz.

Dans notre vie quotidienne, les plasmas ont de nombreuses applications (micro-électronique, écrans plats de nos téléviseurs ...), dont la plus courante est le tube néon [3].

1.4. Paramètres caractéristiques d'un plasma

Le plasma est caractérisé par les principaux paramètres suivants : la densité électronique, la température électronique, le potentiel plasma et le potentiel flottant.

1.4.1. Densité électronique n_e

La densité électronique est le nombre d'électrons présents dans le plasma par unité de volume. Parfois, elle est également utilisée pour des mesures de pourcentage des particules de gaz à l'état ionisé. Elle est souvent exprimée par (cm^{-3}) ou (m^{-3}).

Les plasmas sont caractérisés principalement par la condition de quasi-neutralité à l'échelle macroscopique. Cela signifie que les densités d'ions et d'électrons sont à peu près égales (dans ce cas, la densité d'ions négatifs est supposée négligeable) :

$$n_e \approx n_i \approx n_n \quad (\text{I.1})$$

Où :

n_e : la densité électronique.

n_i : La densité ionique.

n_n : la densité des neutres.

Le degré d'ionisation du plasma est désigné par le rapport α constituant le taux d'ionisation défini par :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_n} = \frac{Zn_i}{n_i + n_n} \quad (\text{I.2})$$

Il existe en général deux types distincts de plasma :

Les plasmas faiblement ionisés : les densités électronique ou ionique sont très faibles par rapport à la densité des neutres étant les espèces majoritaires.

Les plasmas fortement ionisés : la densité des neutres sont très faibles, donc on ne retrouve que des électrons et des ions.

Le taux α est une valeur qui varie entre 10^{-6} et 10^{-3} pour les plasmas faiblement ionisés et entre 10^{-2} et 1 pour les plasmas fortement ionisés [4].

1.4.2. La température électronique T_e

La température du plasma est définie comme étant la moyenne des énergies de translation des particules dans la décharge. Comme la masse des électrons est négligeable devant celle des espèces lourdes, ces deux populations sont souvent considérées comme étant deux systèmes avec un équilibre thermodynamique propre à chacun. Lorsqu'on parle de plasma, on parle de plusieurs : températures électronique T_e , ionique T_i et celle des neutres T_n qui peuvent être toutes différentes.

La température électronique est souvent considérée la plus importante pour déterminer et démontrer les phénomènes dans le plasma puisqu'ils sont les agents les plus actifs pour l'ionisation du gaz et la création de radicaux [5].

En physique des plasmas, on mesure l'énergie cinétique des électrons, qui suivent généralement une distribution de Boltzmann (à trois degrés de liberté), par leur température comme en physique statistique [6]

$$\langle E_e \rangle = \frac{3}{2} k_B T_e \quad (\text{I.3})$$

k_B est la constante de Boltzmann, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

En utilisant la relation ci-dessus, la température de l'électron est souvent exprimée en termes d'unité d'énergie électronvolt (eV). La règle de conversion s'écrit comme suit, qui peut être calculés par la relation $\langle E \rangle = k_B T$:

$$1\text{eV} = 1,1600 \cdot 10^4 \text{ K}$$

1.4.3. Le potentiel plasma V_p

Un plasma est caractérisé par un potentiel constant appelé potentiel plasma. Ce potentiel est positif par rapport aux parois de l'enceinte et sa valeur est la même partout dans le plasma du moment que ce dernier est homogène dans tout l'espace (l'enceinte) où il a été créé. Le potentiel plasma peut être déterminé expérimentalement à partir de la caractéristique courant- tension d'une sonde électrostatique de Langmuir. Il représente le point d'inflexion de cette caractéristique lors du passage de la branche électronique à la branche de saturation électronique [7].

1.4.4. Potentiel flottant V_f

Le potentiel flottant est le potentiel que va atteindre un corps étranger isolé électriquement plongé dans un plasma. Le potentiel flottant est toujours inférieur au potentiel plasma puisque les électrons plus rapides que les ions arriveront plus vite à la surface provoquant une accumulation de charges négatives (différence de mobilité entre les électrons et les ions). Une gaine va donc se former autour du corps qui va avoir tendance à repousser les électrons et à attirer les ions jusqu'à l'établissement d'un équilibre entre les flux de ces deux espèces [8].

1.5. Types de plasma

Il existe différents types de plasmas aux propriétés bien particulières. On peut catégoriser nos plasmas de nombreuses manières différentes mais la plus pertinente reste de diviser la famille des plasmas en plasmas **chauds** et plasmas **froids** [9].

1.5.1. Plasmas chauds

Les plasmas chauds sont des gaz totalement ionisés, formés uniquement d'ions et d'électrons, leur température peut atteindre plusieurs milliers de degrés. Les exemples de plasmas chauds sont les plasmas stellaires comme le soleil, les étoiles, etc. Sur terre, les plasmas chauds se retrouvent dans les réacteurs à fusion (plasmas des Tokamaks).

Ces plasmas sont en générale en équilibre thermodynamique. Les températures des électrons T_e et d'ions T_i et particules neutres sont égales ($T_i \approx T_e \approx T$).

1.5.2. Plasmas froids

Les plasmas froids dits hors équilibre sont des gaz faiblement ionisés. Ils ont des températures inférieures à quelques eV (c'est à dire à quelques dizaines de milliers de Kelvins). De plus, la température des ions et des neutres s'approche de la température ambiante ($T_i \approx T = 300 \text{ k}$) et plus beaucoup inférieure à celle des températures électroniques ($10^4 - 10^5 \text{ k}$). Les exemples de tels plasmas sont l'ionosphère, les décharges lumineuses (celles d'un tube au néon, d'une lampe à mercure, ...).

1.6. Gaine électrostatique

L'interaction d'un plasma avec une surface solide donne naissance à une région non neutre appelée **gaine électrostatique**. En général, elle est une interface abrupte entre le volume du plasma et les parois du réacteur, les électrodes ou toute autre surface présente dans le réacteur.

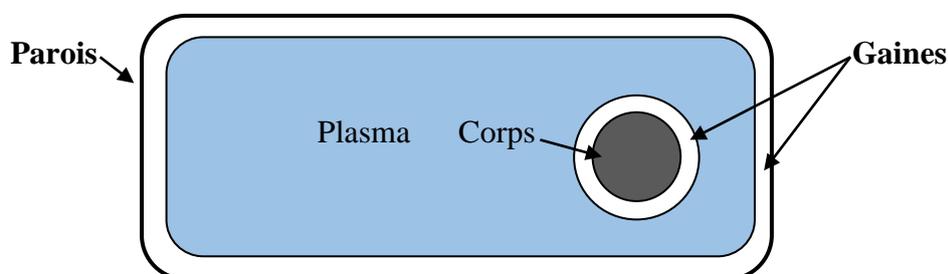


Figure (1.2). Schéma simplifié d'une gaine électrostatique.

La formation de la gaine dépend des fonctions de distribution des espèces chargées et des collisions ion-neutres. Lorsque l'on introduit un objet quelconque dans un plasma (par exemple une poussière), les espèces chargées sont créées en volume généralement au centre de l'enceinte diffusent dans l'ensemble du volume, puis elles sont perdues aux Parois. Les électrons les plus proches de la paroi de l'objet (plus mobiles que les autres espèces) seront attirés à sa surface. À mesure que les charges négatives s'accumulent, l'objet finira par se charger négativement alors que dans son entourage, les ions positifs, plus lourds, créent une charge positive. Il se crée alors un champ électrique entre l'objet et le plasma donnant naissance à une **gaine électrostatique** qui va constituer une barrière de potentiel pour les électrons. Finalement, le potentiel devient suffisamment négatif pour égaliser les deux flux. Dans ces conditions, il est égal au potentiel flottant et le cœur du plasma se charge au potentiel supérieur appelé potentiel plasma [1- 10].

1.7. Plasma hydrogène

Le plus simple des plasmas est celui de l'hydrogène. Pour obtenir un plasma hydrogène, il faut fournir suffisamment d'énergie au gaz (molécules H_2), qui sera divisé en grande partie en atomes, ions, ainsi d'électrons et de protons libres en concentrations égales (plasma globalement neutre).



Figure (1.3). Photographie d'un Plasma hydrogène

1.8. Source Plasma

Il existe plusieurs types de sources reposant sur des principes physiques différents. Pour tous ces réacteurs sont constitués quatre sous-systèmes principaux : le pompage, l'injection des gaz, le système de refroidissement et la source d'énergie de décharge. Mises à part les considérations géométriques des réacteurs, c'est le couplage de la puissance électrique au

plasma qui les différencie le plus [11]. Nous prêtons particulièrement attention aux sources de type ECR (Electron Cyclotron Résonance) et RF, dans ce manuscrit.

1.8.1. Plasma RF :

Ce type de source offre de très bonnes performances et reste le plus largement utilisé dans de nombreux laboratoires de recherche et fonctionnent avec une alimentation électrique sinusoïdale dont la fréquence est de 13,56 MHz (fondamentale). Le domaine radiofréquence est intéressant car il se situe entre les deux fréquences propres du plasma à savoir la fréquence plasma ionique et la fréquence plasma électronique de sorte que les électrons du plasma vont suivre les variations instantanées du champ électrique, alors que les ions ne suivront que le champ électrique moyen [12 - 13].

Il existe deux types de **réacteurs RF** : les réacteurs à couplage capacitif CCP (Capacitively Coupled Plasmas) et les réacteurs à couplage inductifs ICP (Inductively Coupled Plasmas).

Les réacteurs à couplage capacitif sont les plus simples (*Cf. figure 1.4*). Ils sont constitués d'un jeu de deux électrodes planes et parallèles séparées d'une distance de quelques centimètres. Un gaz neutre de faible pression remplit l'espace inter – électrode. L'une des électrodes est alimentée par un générateur de tension RF alors que l'autre est reliée à la masse électrique [14].

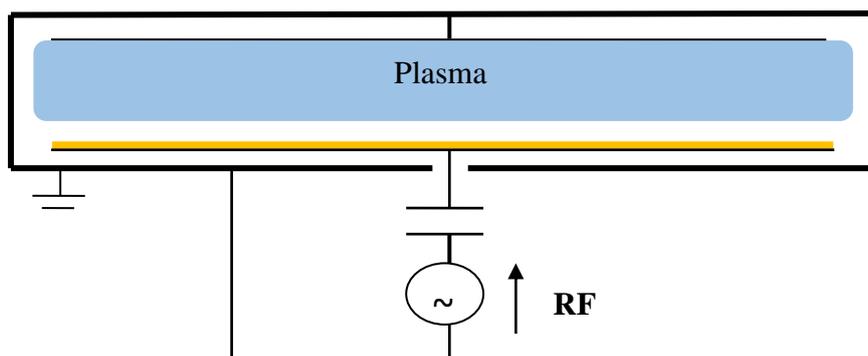


Figure (1.4) : schéma simplifié d'un réacteur à couplage capacitif.

Dans **les réacteurs à couplage inductif (ICP)**, les plasmas sont créés par une antenne externe à la manière d'un transformateur. Ils permettent d'obtenir de fortes densités à basse pression. L'antenne est enroulée autour d'un tube isolant : la source. C'est là qu'est créé le plasma par l'action du champ magnétique RF. Le substrat peut être placé dans une

chambre séparée située en dessous de la source à quelques dizaines de centimètres afin d'augmenter l'uniformité du plasma. L'énergie des ions peut être facilement contrôlée en polarisant le substrat par une alimentation RF ou DC indépendante de celle de la source [11].

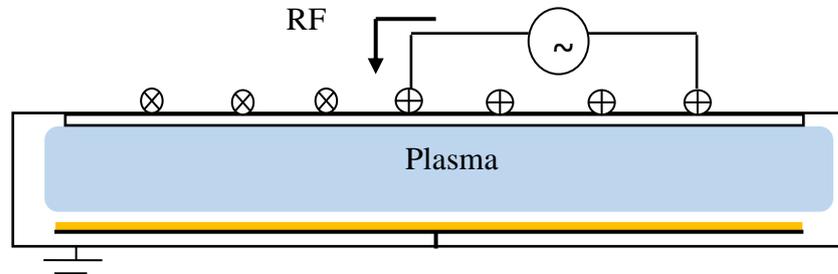


Figure (1.5) : schéma simplifié d'un réacteur à couplage inductif.

1.8.2. Plasma ECR à micro-onde

A basse pression, la puissance est perdue sur les parois et ce qui favorise la création d'électrons chauds au détriment de l'ionisation. L'utilisation d'un champ magnétique permet de pallier cette limitation (la pression doit être suffisamment faible pour que le libre parcours moyen des ions soit de l'ordre de grandeur de la dimension de la chambre). Un électron mobile interagissant avec un champ magnétique subit une force de Lorentz perpendiculaire à son mouvement. La force étant perpendiculaire à sa vitesse, l'électron décrit un cercle autour de la ligne de champ magnétique (**figure 1.6**), suivant un mouvement cyclotronique à la fréquence de précession de Larmor Ω :

$$\Omega = \frac{e B}{m_e} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

Ω : fréquence de Larmor.

m_e : La masse de l'électron.

e : La charge.

B : Intensité du champ magnétique appliqué.

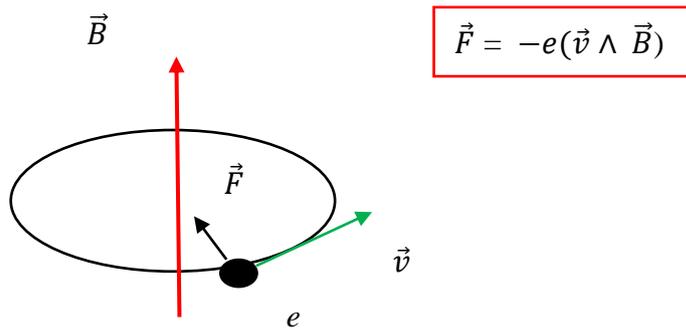


Figure (1.6). Mouvement cyclotronique d'un électron dans un champ magnétique.

Les sources RCE reposent sur le principe de la résonance cyclotronique électronique qui se produit en présence d'un champ magnétique statique (aimant permanent) et d'une onde électromagnétique [15]. Ce phénomène se produit lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique (ω) est égale à la fréquence de giration des électrons (Ω) dans le champ magnétique et entraîne un mouvement en spirale conique des électrons. À une fréquence de 2,45 GHz, la condition de résonance est atteinte lorsque $B = 0,0875$ T. Ainsi, les électrons gagnent une énergie considérable leur permettant d'ioniser les particules neutres du gaz.

Le schéma d'une source ECR est donné en **figure 1.7**. En général, la source plasma comprend un système magnétique qui permet de réaliser la condition de résonance cyclotronique électronique. Elle est constituée d'aimants pour confiner le plasma produit à l'aide d'un champ magnétique, un système d'injection de micro-onde (2.45 GHz), un orifice d'injection de gaz et enfin un extracteur des ions.

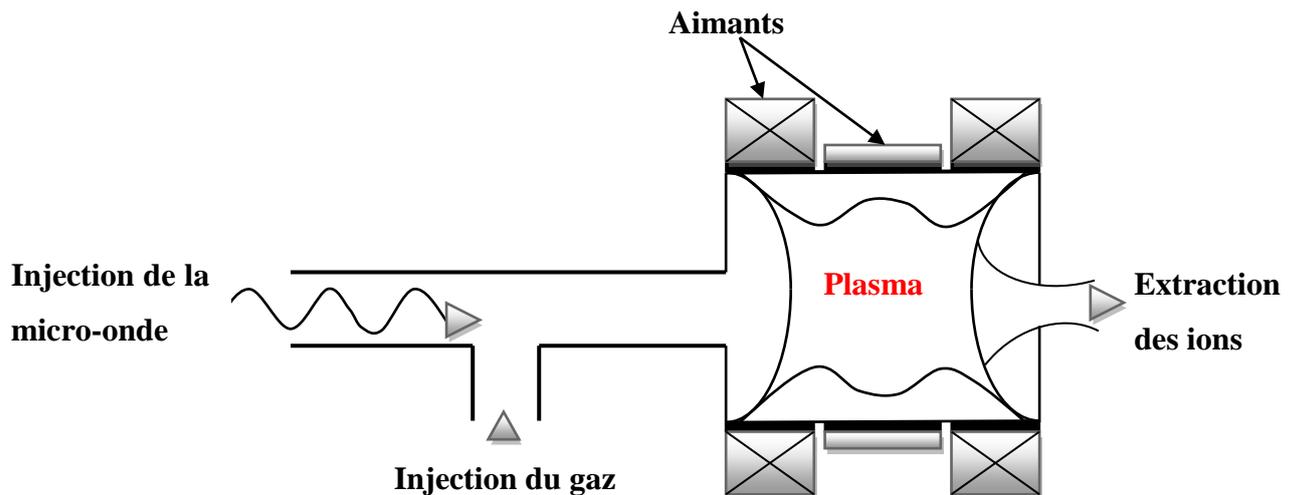


Figure (1.7). Représentation schématique d'une source ECR.

1.8.2.1. Plasma multi-dipolaire

Les sources multi-dipolaires permettent la production de plasmas uniformes et de grande taille à basse pression et à partir d'un réseau bidimensionnel de sources de plasma élémentaires indépendantes soutenues à l'ECR. Chaque source élémentaire est constituée de deux parties principales, à savoir : un aimant permanent à symétrie azimutale autour de son axe d'aimantation et un applicateur hyperfréquence constitué d'une ligne coaxiale, parallèle au vecteur d'aimantation, et ouvert sur le pôle arrière de l'aimant. L'aimant est complètement encapsulé et refroidi à l'eau. La puissance micro-ondes est transmise sans perte à la région de couplage ECR autour de l'aimant à l'aide de la ligne coaxiale. La distribution de sources élémentaires micro-onde indépendantes sont suivant un réseau bi-dimensionnel (sources planes) ou tri-dimensionnel (sources en volume).

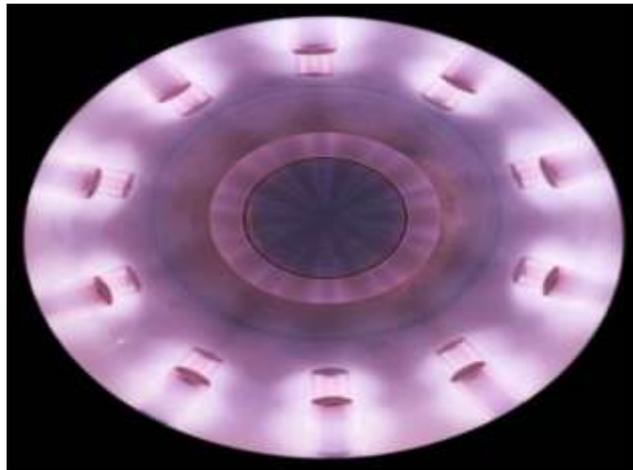


Figure (1.8). Photographie du réacteur multi-dipolaire composé 20 sources [16].

1.9. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un rappel des différents états de la matière. Nous avons cerné les notions fondamentales du plasma comme sa définition, ses types, ses quatre paramètres caractéristiques et de la formation de la gaine électrostatique. Nous avons également évoqué deux types de sources plasma : RF et RCE avec l'illustration d'exemples respectivement pour les deux (CCP, ICP).

Enfin, nous avons débattu les plasmas ECR à micro-ondes.

Chapitre II

Production des ions négatifs d'hydrogène H^-

2.1. Introduction

Les ions négatifs sont des atomes neutres avec un électron supplémentaire attaché. Ses applications sont nombreuses dans différentes branches de la physique.

Ce deuxième chapitre introduira la problématique du sujet en précisant quelques notions sur l'utilisation des H^- dans **la fusion thermonucléaire** et le chauffage par injection de neutres **IDN** (ou **NBI**: (*en anglais*) Neutral Beam Injection), dans le projet **ITER**. En outre, nous évoquons les mécanismes de création des ions négatifs d'hydrogène (en volume et/ou en surface). Finalement, nous présenterons les sources d'ions négatifs existantes.

2.2 Les ions négatifs H^-

L'un des éléments les plus abondants et les plus communs dans l'univers est l'hydrogène. En 1925, un ion négatif a été démontré pour la première fois comme un système théoriquement restreint par Bethe [17].

Lors de la formation d'un ion négatif, l'électron libre se rapprochant de l'atome interagit avec le nuage électronique entraînant la polarisation de l'édifice atomique, et induction d'un dipôle électrique. Le potentiel d'interaction généré par ce dipôle est responsable de la force qui lie l'électron libre à l'atome formant ainsi l'ion négatif. De la sorte, pour former un ion négatif H^- , un électron présent dans le métal de la surface de la paroi du réacteur va devoir passer des bandes [12].

Le paramètre qui caractérise l'ion négatif est l'affinité électronique E_A de l'ion négatif qui est une mesure de la stabilité et de la facilité de formation des ions ainsi que de la facilité de détachement. L'ion hydrogène a une affinité électronique avoisinant les 0,7542 eV.

L'affinité électronique E_A est définie comme la différence d'énergie de l'atome neutre E_0 et des états d'ions négatifs E_- donnée par :

$$E_A = E_0 - E_- \quad (\text{II.1})$$

E_A doit être positif pour la formation d'ions négatifs stables [18].

2.3. L'utilisation des H^- dans la fusion thermonucléaire

La **fusion nucléaire** (ou **thermonucléaire**) est la réaction dans laquelle deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd et plus stable. Cette réaction est à l'œuvre de manière naturelle dans le Soleil et la plupart des étoiles de l'univers dans

lesquelles sont créés tous les éléments chimiques autres que l'hydrogène et la majeure partie de l'hélium.

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut rapprocher suffisamment deux noyaux qui, puisqu'ils sont tous deux chargés positivement, ont une tendance naturelle à se repousser. Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière naturelle et arriver dans la zone très proche du noyau où se manifestent les forces nucléaires capables de l'emporter. La probabilité de passage de cette barrière peut être quantifiée par la « section efficace » de la réaction. La variation des sections efficaces de plusieurs réactions de fusion en fonction de l'énergie d'interaction (KeV) est indiquée sur **la Figure (2.1)**.

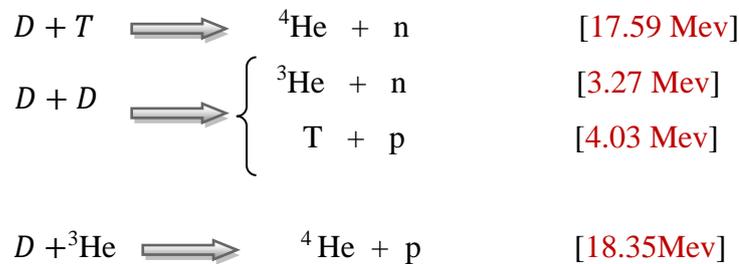
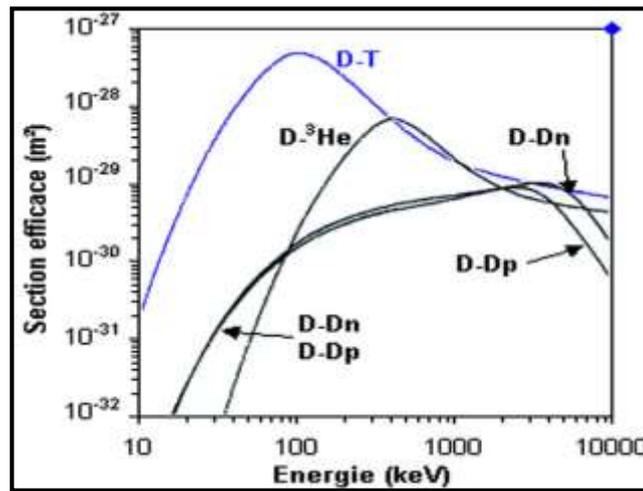


Figure (2.1). Sections efficaces des principales réactions de fusion pour des applications Energétiques.

La fusion exige des hautes températures, typiquement plus de 100 millions de degrés Celsius (soit 10 keV). A de telles températures, les électrons sont détachés des noyaux et l'on entre alors dans le quatrième état de la matière, l'état de **plasma**.

La réaction de fusion la plus accessible est la réaction impliquant le deutérium et le tritium, les deux isotopes de l'hydrogène. C'est sur cette réaction que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée.

Pour que l'énergie libérée par les réactions nucléaires soit supérieure à l'énergie consommée pour chauffer et ioniser les atomes et compenser les pertes, il faut soit obte

une durée de réaction relativement longue dans un plasma peu dense (fusion lente ou par confinement magnétique), soit réaliser une réaction très brève dans un plasma très dense (fusion rapide ou par confinement inertiel) [19].

2.4. Chauffage du Tokamak par injection de neutres

2.4.1. Le projet ITER

Le projet **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor) est une étape dans la démonstration de la faisabilité scientifique et technologique de l'utilisation de la fusion comme source d'énergie (Cf. **figure 2.2**). Le projet est né en Novembre 1985 sur proposition de l'URSS à la communauté internationale. Le programme **ITER** utilise le concept du confinement magnétique et ce sera la plus grande expérience de physique et le plus grand réacteur expérimental de fusion nucléaire de type **tokamak** (nom russe : *toroidalnaïa Kameranagnitnymi Katouchkami*, en français, chambre toroïdale avec bobines magnétiques).

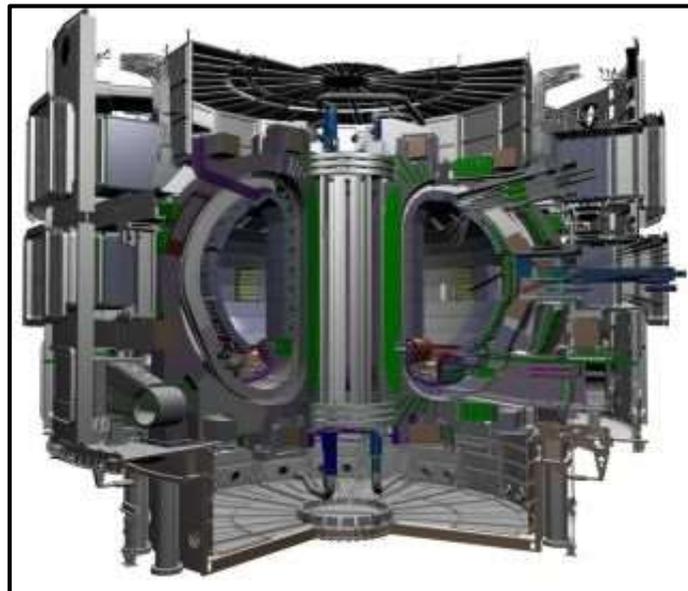


Figure 2.2. Schéma du réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER).

Pour la communauté scientifique internationale, les défis à relever pour mettre au point un réacteur thermonucléaire tel que le fait d'obtenir des températures suffisamment élevées pour permettre la fusion nucléaire, réside dans l'allongement du temps de fusion jusqu'à arriver à un fonctionnement en continu du réacteur ,et bien sûr l'obtention de plus d'énergie après fusion de ce qui est nécessaire pour produire **la fusion nucléaire**.

Dans les réacteurs à fusion, les matériaux de paroi qui font face au plasma vont subir des contraintes extrêmes et doivent être capables de les supporter. Les matériaux face au

plasma doivent présenter des caractéristiques d'érosion et de rétention des isotopes d'hydrogène compatibles avec le fonctionnement des réacteurs à fusion.

En effet, en plus des neutrons, des particules animées de quantité de mouvement significative bombardent les parois du réacteur malgré le confinement magnétique exercé. Ceci entraîne de l'érosion des éléments de la surface, soient poussières et impuretés, sont arrachées de la paroi, qui peut pénétrer dans le plasma et ainsi le refroidir. Il est donc important que le matériau soit résistant à l'érosion pour limiter les pertes de performance du réacteur.

De plus, les températures de fusion des matériaux de la chambre du réacteur doivent être élevées afin de pouvoir supporter des températures de fonctionnement pour **ITER**. En outre, les matériaux de la première paroi doivent également avoir une excellente conductivité thermique pour pouvoir transmettre au mieux l'énergie qu'ils reçoivent.

D'autre part, le taux de rétention des isotopes de l'hydrogène doit être faible. Le phénomène de rétention pose des problèmes de sécurité notamment vis-à-vis de la radioactivité du tritium [20].

2.4.2. Le Chauffage par injection de neutres IDN (ou NBI)

Le chauffage le plus couramment requise pour **ITER** est l'injection d'atomes neutres à haute énergie, dite injection de neutres (**IDN**), au cœur du plasma [12].

Sur **ITER**, la méthode consiste à accélérer des ions négatifs de deutérium (D^-) à haute énergie (1 MeV) et à les neutraliser avant leur entrée dans la chambre du Tokamak. Ces atomes neutres sont insensibles au champ magnétique de confinement et pénètrent le plasma sans déflexion quelles que soient les conditions physiques locales (densité et instabilités du plasma). La densité linéique du plasma est ajustée de façon à ce que ces neutres soient ionisés sous l'effet de collisions, en majorité au cœur du plasma, région où s'effectue le dépôt de puissance (le chauffage) et futur siège des réactions de fusion D-T.

Le chauffage du plasma résulte du transfert de ces ions rapides piégés le long des lignes de champ magnétique aux particules du plasma, conduisant notamment à renforcer la partie haute énergie de la fonction de distribution des ions du plasma [35].

La **figure 2.3** représente le principe d'une ligne d'**injection de neutres**. **Les ions négatifs** quittant la source seront accélérés par un champ électrique intense, puis le faisceau est neutralisé avant d'entrer dans le Tokamak. Ensuite, le faisceau neutre énergétique traverse le champ magnétique et pénètre dans le plasma nucléaire et lui transfère son énergie par le biais de collisions

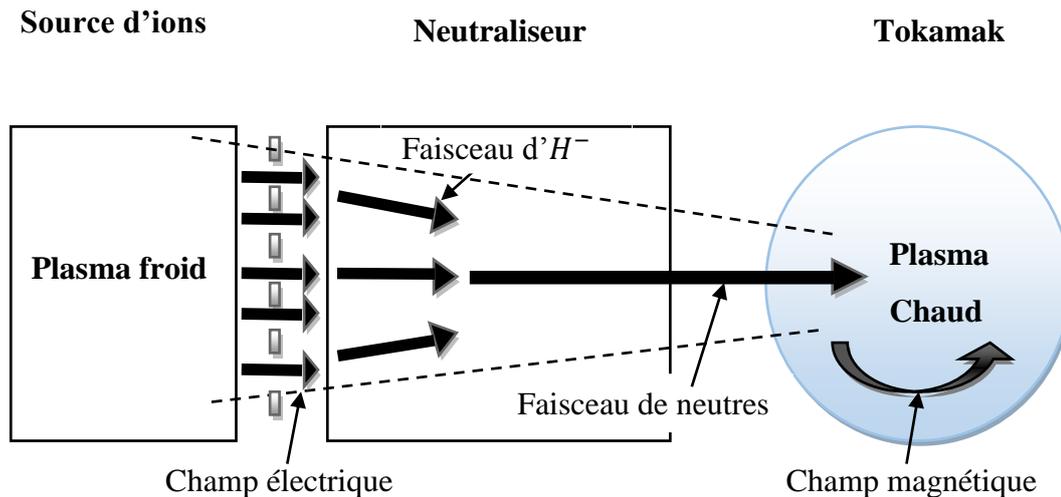


Figure 2.3. Principe de fonctionnement d'une ligne d'injection de neutres : la technique de chauffage se compose de trois parties principales : Source d'ions négatifs, un accélérateur, et un Neutraliseur.

2.5. Mécanismes de création des ions négatifs d'hydrogène

Il existe deux mécanismes pour produire des faisceaux intenses d'ions négatifs H^- ou D^- :

En 1972, Y. Belchenko utilisa une méthode et réussit à former des ions négatifs sur une surface métallique en envoyant un flux d'atomes ou d'ions positifs sur ce métal. Cette méthode est appelée "production en surface"[21].

Une autre méthode, présentée par M. Bacal en 1977, permet d'extraire les ions négatifs d'un plasma dans lequel ils sont formés via les collisions des électrons avec des molécules excitées. C'est la "production en volume"[22].

2.5.1. Production en volume

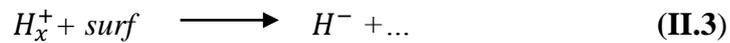
Dans les années 1970, selon Marthe Bacal, travaillant à l'Ecole Polytechnique, il est possible que les ions négatifs puissent être créés à partir de l'attachement dissociatif (AD) d'un électron sur des molécules vibrationnellement excitées : l'électron incident est temporairement capturé au voisinage de la molécule, formant un ion moléculaire négatif temporaire. La décomposition de cet ion peut conduire à la AD et à la formation d'un ion négatif et d'un atome neutre :



2.5.2. Production en surface

La production en surface repose sur le bombardement de particules énergétiques [4] :

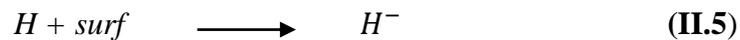
- La capture de deux électrons par un ion positif incident :



- La simple capture d'un électron par un atome énergétique incident :



- La pulvérisation d'un atome adsorbé sous forme d'un ion négatif :



2.6. Les sources d'ions négatifs existantes

Nous divisons ici les sources d'ions négatifs en deux catégories : les sources en surface et les sources en volume.

2.6.1. Les sources en surface

Les sources de plasma fonctionnant par des processus de surface sont classées en : plasma Penning et plasma magnétron.

Les sources d'ions magnétron et Penning ont une longue histoire qui remonte au début du 20e siècle. Leur utilisation pour la production d'ions négatifs a vraiment décollé dans la Russie soviétique des années 1970 avec l'introduction du césium [23].

- **Les sources Penning**

Les sources Penning ont une luminosité plus élevée que les autres sources. Elles sont utilisées au moyen d'une décharge avec une fenêtre d'anode coiffée de cathodes à chaque extrémité, le long du champ magnétique. L'extraction des ions se fait par une fente dans l'anode perpendiculaire au champ magnétique.

La source ISIS Penning, représentée schématiquement sur la figure 2.12 , qui produit régulièrement 35 mA d'ions H^- pendant une impulsion de 200 ms à 50 Hz pendant des périodes ininterrompues allant jusqu'à 50 jours, est considérée comme l'une des principales sources opérationnelles au monde [24].

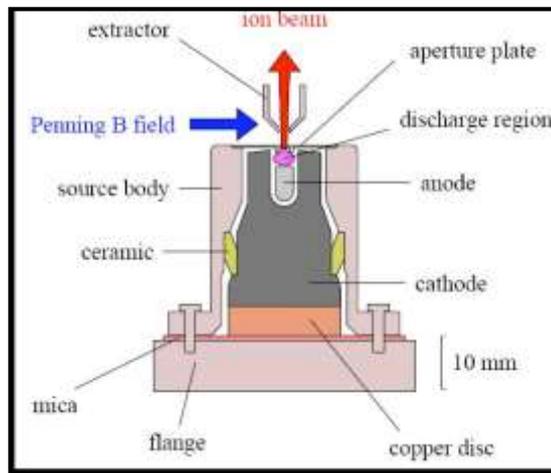


Figure 2.4. Un schéma de la source ISIS Penning.

- **Les sources magnétrons**

Les sources magnétrons sont composées d'une cathode cylindrique centrale entourée d'une anode. La tension de décharge est typiquement égale à 150 V et le courant 40 A. Un champ magnétique (= 0,17 T) est parallèle à l'axe de la cathode. L'hydrogène gazeux est introduit par le haut par une vanne de gaz pulsé.

La différence fondamentale entre les sources magnétron et Penning est que dans le magnétron, les ions H produits à la cathode sont directement extraits, tandis que dans la source Penning, la cathode n'a pas de ligne de visée.

En termes de durée de vie, ces sources sont plus performantes mais celles qui ont des avantages ont des inconvénients dont l'utilisation de césium qui peut être transféré à des panes entre les étages haute tension.

2.6.2. Les sources en volume

Au début des années 80, la mise en évidence du processus d'attachement dissociatif sur des molécules excitées a permis d'optimiser les sources pour la production en volume. Nous avons au par avant cité que **les ions H^-** plus facilement produits dans le plasma à basses températures électroniques (~ 1 eV) alors que les molécules H_2 étaient vibrationnellement excitées par des électrons énergétiques [22]. En 1977, M. Bacal a découvert la production en volume pour la génération des H^- .

- **Source à filaments**

Les premières sources de volume n'étaient pas césiées (i.e. elles fonctionnent sans césium) et avaient des filaments. Des courants allant jusqu'à 20 mA DC ont été atteints avec les petites sources et 45 mA avec les plus grosses. Des courants ont été atteints à partir de 25 mA DC et 90-100 mA à un facteur de marche de 6 %. La durée de vie de ces sources est limitée par celle du filament [25].

- **Les sources R F**

Le filament a d'abord été remplacé par une bobine d'antenne RF en 1991. La **figure. 2.5** montre la source de volume **Desy RF**. L'antenne chauffe la chambre à haute température et le filtre est construit avec deux rangées d'aimants permanents. La chambre basse température est située à l'intérieur d'un collier. Les antennes sont revêtues pour réduire la modulation plasmatique par la tension RF et la pulvérisation de pulvérisation. Avec les sources de volume RF inattendues, on atteint 35 mA ont été atteintes. Chez **Desy**, le collier était polarisé et revêtu de tantale, les courants de 80 mA ont été atteints de façon inattendue.

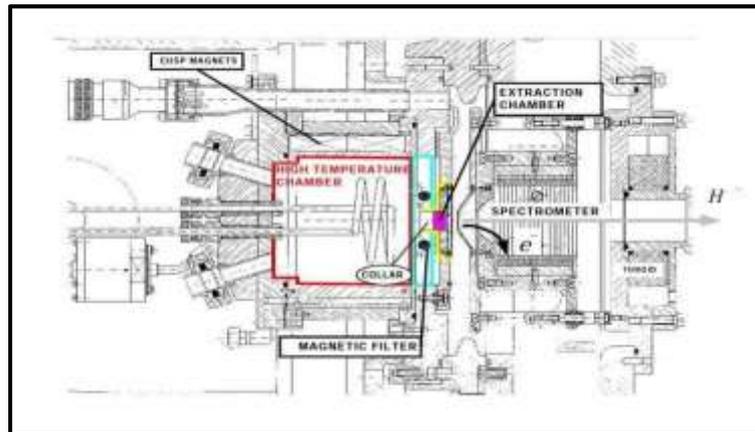


Figure 2.5. Source de volume RF.

Desy à la plus longue expérience dans l'exécution de ce type de source de volume .Les performances des antennes sont d'abord limitées. La durée de vie moyenne de seulement 41 jours est supérieure à celle d'un filament. Cependant 50% de toutes les antennes échouent au cours des 15 premiers jours. Cette imprévisibilité est un grave problème de fiabilité [25].

2.7. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire le tour en premier temps sur ce que c'est que les ions négatifs H^- et la fusion thermonucléaire est l'une des voies très prometteuses explorée aujourd'hui pour la production d'énergie de demain. Puis, nous avons parlé du projet ITER. Et nous avons expliqué le chauffage par injection de neutres IDN. Ensuite, nous avons mis en relief les mécanismes de production d'ions négatifs H^- qui se font en surface ou en volume. Les processus de surface reposent sur le bombardement de particules énergétiques et les processus en volume reposent sur l'attachement dissociatif.

Finalement, nous avons mentionné les sources des ions négatifs : les sources en surface (magnétron et Penning) et les sources en volume (filaments et RF).

Chapitre III

Dispositif expérimental

3.1. Introduction

La nouvelle structure expérimentale baptisée ROSAE-III (ecR hydrOgèn plaSma for neutrAlb Eam) et optimisée pour l'étude de la production d'ions H^- par mécanisme de volume a été conçue et développée au sein du laboratoire LPSC par le groupe PMN (Plasmas-Matériaux-Nanostructures).

Dans ce chapitre, nous allons effectuer la description de ROSAE-III qui utilise quatre sources de plasmas multi-dipolaires avec lequel les mesures seront effectuées.

Puis, nous allons mentionner les moyens diagnostics plasma utilisés: sonde de Langmuir, spectroscopie d'émission optique (visible et de l'ultraviolet du vide) en précisant le rôle de chaque diagnostic. Nous détaillerons par la suite la méthode Photo-détachement laser et expliquant comment déterminer la densité absolue des ions négatifs d'hydrogène à partir de cette technique.

Finalement, nous clôturons ce chapitre par la détermination de la densité absolue des molécules ro-vibrationnement excitées H_2 en utilisant le rayonnement synchrotron SOLEIL. Nous clôturons le chapitre par la présentation et la description de la source SCHEME-II.

3.2. Description de ROSAE-III

La figure 3.1 représente un schéma du montage expérimentale d'un réacteur ROSAE-III qui s'est constituée de l'enceinte d'un cylindrique en acier inoxydable(Inox) de diamètre 152 mm et de longueur 214 mm. Le système de pompage (primaire et secondaire) est directement connecté au coté gauche du cylindre pour maintenir la chambre sous vide poussé d'environ 10^{-6} mbar.

Un débitmètre massique (Mass Flow) est utilisé pour introduire de gaz (H_2 ou $H_2 + Ar$) pur, ce qui permet de contrôler son débit. Le gaz ionisé/excité par une source ECR [26].

A partir les quatre sources dipolaires, situées à une extrémité du cylindre métallique de ROSAE-III Le signal micro-onde est injecté au moyen d'un générateur à l'état solide (SAIREM) pour fournir une puissance maximale de 200 W.

La source ROSAE III est équipée des moyens de diagnostic et l'ensemble des mesures, notamment électrostatique, photo-détachement laser et optique (Visible et VUV) dont nous parlerons dans les paragraphes suivants.

Les positions « A » et « B » font référence à des positions d'observation ou de diagnostic pour étudier plasma en général.

Pour La position « A » est plus proche des sources ECR, à 9mm par rapport à leurs extrémités. Où de nombreuses espèces de plasma sont générées. La position « B », à 70 mm en aval de la position A, correspond à une région où les espèces arrivent principalement par diffusion, et où se forment des ions négatifs [26].

L'intérieur de la chambre recouvert d'acier inoxydable nous permet également d'ajouter une autre couche d'une épaisseur 5 mm qui sont en verre borosilicate (Pyrex™) (en rouge sur la Figure 3.1). Ces deux matériaux ont des coefficients de recombinaison différents [12].

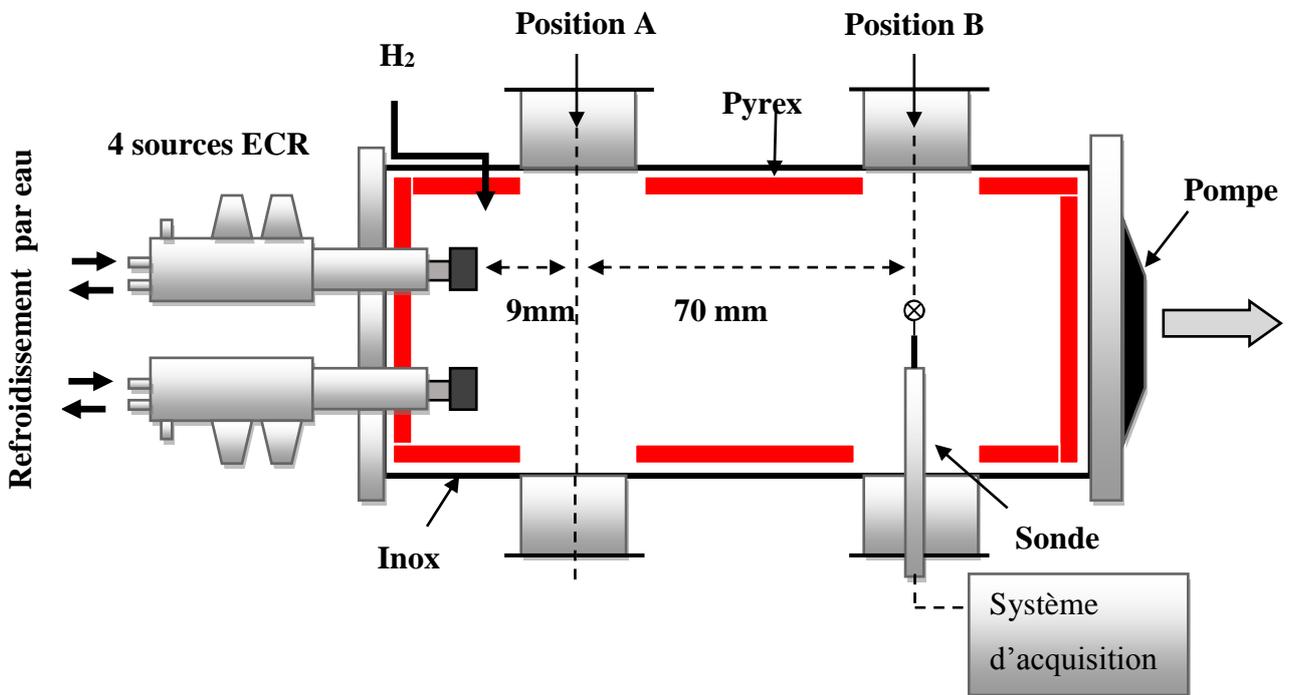


Figure (3.1).Schéma du réacteur ROSAE-III.

3.3. Diagnostics plasma dans ROSAE-III

La caractérisation d'un plasma consiste à déterminer, en utilisant des techniques de diagnostic appropriées, ses paramètres fondamentaux .Il existent plusieurs outils de diagnostic et nous nous concentrerons sur trois techniques principales :

3.3.1 Sonde de Langmuir

La sonde de Langmuir(ou électrostatique) est l'un des premiers moyens de diagnostics employés dans la caractérisation d'un plasma et demeure probablement la plus utilisée aujourd'hui. C'est un instrument qui est très utilisé dans les laboratoires. Cette

technique de diagnostic a été introduite et développée par le physicien Irving Langmuir dans les années 1920. Ce diagnostic du plasma permettant de mesurer les paramètres fondamentaux d'un plasma est : densités des électrons N_e , et des ions N_i , température des électrons T_e , potentiel plasma V_p et potentiel flottant V_f .

La sonde de Langmuir est une tige métallique de tungstène (ou Tantale, Molybdène, Acier inoxydable, Platine,...) sous forme cylindrique, plane ou sphérique (Cf. **figure 3.2**). Immergé dans le plasma qui collecte des courants les particules chargées en fonction de potentiels électriques appliquée sur la sonde [12].

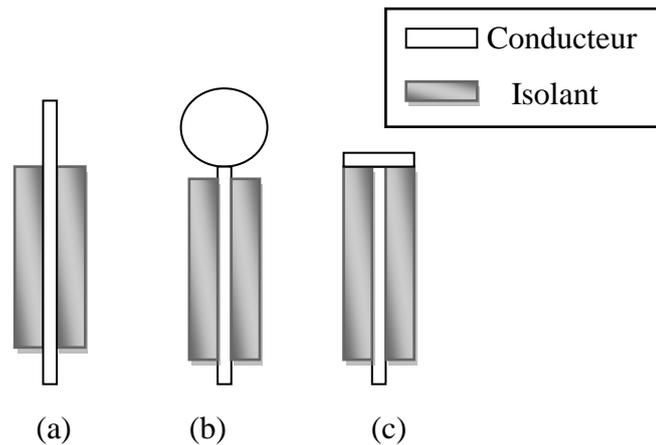


Figure (3.2).Les différentes géométries des sondes de Langmuir : (a)cylindrique ; (b) sphérique ; (c) plane.

La méthode des sondes de Langmuir consiste à appliquer une rampe de tension à la sonde et à mesurer le courant collecté en fonction de la polarisation. Ce qui nous permet de donner une courbe de $I_s(V_s)$ où le courant collecté par la sonde I_s est la somme algébrique des courants électroniques I_e et ioniques I_i et V_s . La tension continue appliquée à la sonde.

Lorsque la sonde est au contact direct avec le plasma, elle est entourée d'une gaine où la quasi-neutralité n'est plus vérifiée. La détermination des paramètres caractéristiques d'un plasma repose sur la théorie classique des sondes électrostatiques, et qui sont liés aux conditions suivantes :

- Le plasma est stationnaire et macroscopiquement neutre qui potentiel au voisinage de la sonde ;
- L'émission secondaire électronique est négligeable ;
- Pas de collisions dans la gaine, les dimensions de la sonde sont petites devant le libre parcours moyens des particules ;
- La sonde neutralise toutes les particules chargées qui arrivent à sa surface.

Détermination des paramètres caractéristiques d'un plasma :

Les principaux paramètres du plasma sont déterminés à partir de l'analyse de la réponse courant-tension (*cf.* **Figure 3.3**)

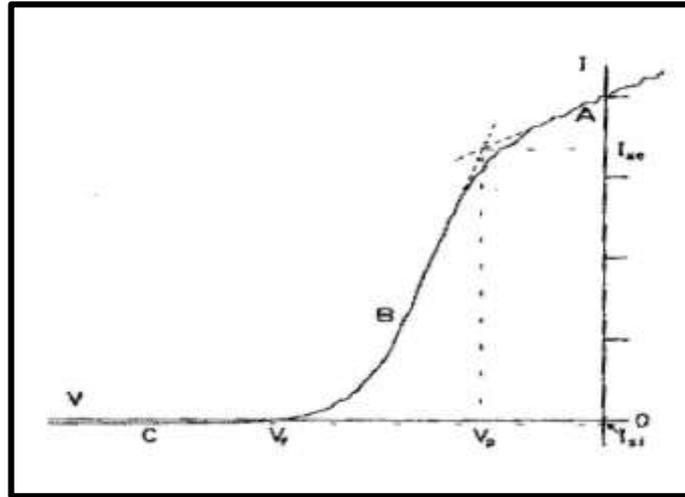


Figure (3.3). Exemple d'une caractéristique de sonde de Langmuir $I(V)$ [27].

➤ Potentiel flottant

A partir de la caractéristique $I_s(V_s)$, le potentiel flottant V_f est le point auquel la courbe $I_s(V_s)$ où le courant total à la sonde est nul ($I_s=0$). Où les contributions des courants ionique et électronique sont égales.

➤ Potentiel plasma

Le potentiel plasma correspond au point d'inflexion sur la caractéristique. On peut aussi le déterminer, par l'extrapolation en coordonnées Semi-logarithmique, de la partie linéaire de la caractéristique décrite par la relation (zone intermédiaire) et de l'asymptote de la caractéristique courant – tension en échelle semi-logarithmique [28].

➤ Température électronique

Pour déterminer ce paramètre, il suffit de tracer le logarithme du courant correspondant à la zone exponentielle de la caractéristique (la région B de la **figure 3.3**). On obtient la fonction linéaire dont l'équation est de la forme :

$$\ln|I_s| = \frac{eV_s}{K_B T_e} + C \quad (\text{III.1})$$

Où C est une constante.

Si on exprime température en électron volts, la pente de la fonction linéaire est égale exactement à $1/T_e$ [12].

➤ Densité électronique

On trace courant électronique au carré en fonction de la tension, pour ($V_s > V_p$), de la région A de la **figure 3.3**, nous découvrirons une droite décroissante. Dont on peut extraire la valeur de la densité électronique à partir de la pente.

Comme plasma est globalement neutre c-à-d la densité électronique est égale à la densité ionique.

3.3.2. Spectroscopie d'émission optique dans le visible

La SOE (Spectroscopie d'Emission Optique) est une technique de diagnostic du plasma qui est constitué de l'analyse de la lumière émise par le plasma. Les principaux avantages de cette technique est d'être non intrusive et permet une détermination directe et en temps réel des espèces (neutres ou ioniques) excitées radiatives présentes dans le plasma.

La spectroscopie d'émission optique est basée sur la détection de photons émis lors de désexcitation d'espèces dans le plasma. Comme les niveaux d'énergie sont quantifiés, les photons émis par désexcitation (d'un l'état excité à un l'état fondamentale) ont une énergie connue :

$$E = E_j - E_i = h \frac{c}{\lambda_{ij}} \quad (\text{III.2})$$

E_j : L'énergie d'un niveau supérieur. E_i : L'énergie du niveau inférieur. h : Constante de Boltzmann. c : La vitesse de lumière. λ_{ij} : La longueur de d'onde de photon émis.

La longueur d'onde λ_{ij} est lié la fréquence ν donner :

$$\nu = \frac{c}{\lambda_{ij}} \quad (\text{III.3})$$

L'intensité d'une raie spectrale $I_{\lambda i}$ dépend d'une transition entre un niveau i et un niveau j (avec E_{ji}) :

$$I_{\lambda i} = R_{\lambda} N_i A_{ij} \Delta V \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

R_{λ} : La réponse du système à la longueur d'onde λ_i .

N_i : La densité d'espèces dans l'état excité i .

A_{ij} : Le Coefficient d'Einstein.

ΔV : Le volume de plasma observé sous l'angle solide $\Delta \Omega$.

Un spectre d'émission typique du plasma H_2 est présenté à **la figure 3.4**. On peut distinguer la série Balmer de l'hydrogène atomique. Les raies spectrales de la série dans la figure sont indiquées comme $H_{\alpha}, H_{\beta}, H_{\gamma}$. Les valeurs des raies se situent respectivement

entre 656,18 - 656,40 nm (désexcitation du niveau $n=3$ à $n=2$) pour H_α , entre 486,05 - 486,25 nm (désexcitation du niveau $n=4$ à $n=2$) pour H_β et entre 433,95 - 434,15 nm (désexcitation du niveau $n=5$ à $n=2$) pour H_γ . Pour l'hydrogène moléculaire, la bande Fulcher H_{fulcher} émet par la transition triplet $d^3\Pi_u \rightarrow a^3\Sigma_g^+$. L'encart de la figure 1.13 se concentre sur la région de longueur d'onde de 619 à 632 nm.

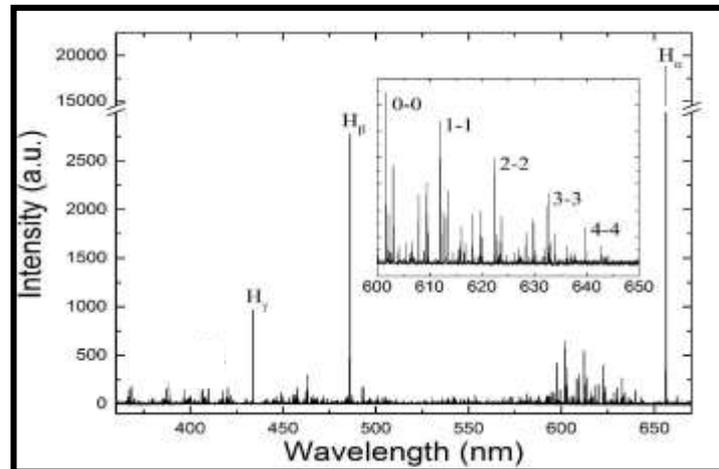


Figure (3.4). Spectre d'émission optique dans le visible la typique du plasma H2 [29].

3.3.3. Spectroscopie d'émission optique dans le VUV

Dans les plasmas à basse pression, les excitations par impact électronique sont le processus d'excitation dominant. Les transitions dans la gamme VUV deviennent très utiles comme diagnostic [30]. Étant des transitions du premier état excité, ils ont des sections efficaces d'excitation par impact électronique plus importantes que les états électroniques supérieurs [31]. Dans une approche initiale, les transitions en cascade à partir d'états supérieurs peuvent être ignorées. De plus, en raison de leur courte durée de vie, ils ont un taux d'émission de photons qui est proportionnel au taux d'excitation par impact électronique de l'état fondamental [30]. Ainsi, une interprétation tout à fait claire des spectres VUV peut se produire.

Un enregistrement typique du spectre d'émission en VUV pour l'atome hydrogène est présenté sur la **figure 3.5**. Trois composantes du spectre se distinguent facilement. Le premier composant est la raie Lyman- α à 121,6 nm qui est la première raie de la série Lyman. Il correspond au passage du premier état excité à l'état fondamental de l'atome d'hydrogène ($1s \leftarrow 2p$). Dans la gamme VUV, il y a aussi la bande Lyman (92-184 nm) et la bande Werner (84-158 nm). Des émissions intenses des bandes Lyman et Werner sont observées respectivement vers 160 nm et 120 nm. Ces deux bandes correspondent aux transitions des deux premiers singulets excités ($B^1\Sigma_u^+$ et $C^1\Pi_u$) à l'état fondamental de la molécule d'hydrogène ($X^1\Sigma_g^+$).

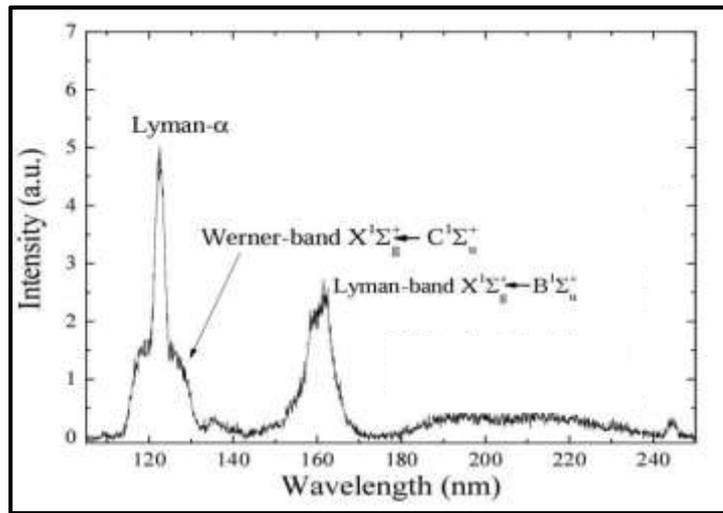


Figure (3.5). Spectre d'émission optique VUV typique du plasma H₂ [29].

3.3.4. Photo-détachement laser

La technique du photo-détachement laser est utilisée comme méthode pour mesurer ou déterminer la densité absolue d'ions négatifs dans les plasmas. La détection d'ions négatifs par photo-détachement est introduite pour la première fois en 1969 par Taillet.

Lorsqu'une réaction avec un ion négatif se produit, un photon peut être absorbé par l'ion le menant ainsi vers un niveau excité virtuel. Pour se stabiliser l'ion négatif, on redistribue l'énergie excédentaire apportée par le photon à un électron du cortège électronique.

Ceci entraîne sa libération vers le continuum avec une énergie cinétique égale à la différence entre l'énergie du photon et l'intervalle énergétique entre le niveau de départ de l'ion négatif et le niveau d'arrivée de l'atome neutre (Cf. **figure 3.6**). L'électron émis ne laisse alors derrière lui qu'un atome neutre avec lequel il n'interagit quasiment plus faisant de son mouvement celui d'un électron libre, c'est le **photo-détachement** [12].

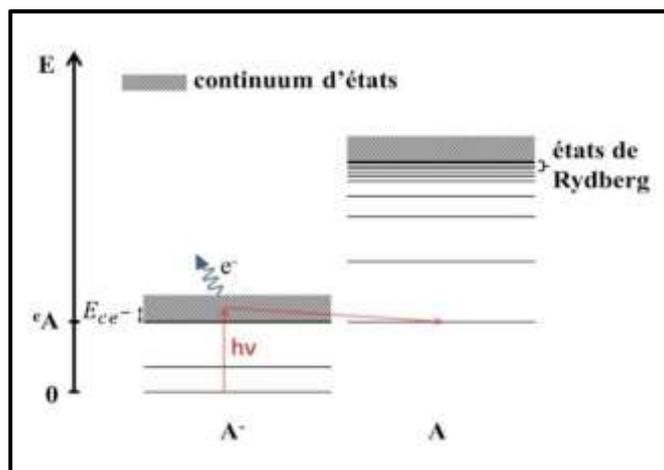
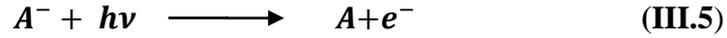


Figure (3.6). Représentation schématique du processus de photo-détachement.

La formule résume la technique de photo-détachement laser :



A cet égard, l'outil idéal est bien sûr un laser à cause de sa mono-chromaticité. De sa très bonne résolution spatiale et de sa grande densité d'énergie.

Si la densité d'énergie du laser est assez grande, presque tous les ions négatifs à l'intérieur de la zone d'interaction disparaissent suite au photo-détachement. A des énergies plus faibles. La densité d'ions négatifs détruits (Δ_-) par rapport à la densité initiale de ces ions (n_0), suit la relation:

$$\frac{\Delta_-}{n_0} = 1 - e^{-\left(\frac{E\sigma}{sh\nu}\right)} \quad (\text{III.6}).$$

Dans notre cas, nous avons choisi de détecter l'excès d'électrons à l'aide d'une sonde électrostatique plane. Polarisée positivement par rapport au potentiel du plasma afin d'obtenir un régime de saturation électronique. Ainsi, l'augmentation de densité électronique qui suit le photo-détachement est proportionnelle à l'augmentation du courant collecté par la sonde. Si I_e , est le courant d'électrons en régime stationnaire (avant le photo-détachement) et Δ_e le courant supplémentaire dû au photo-détachement, on obtiendra alors directement le rapport de la densité d'ions négatifs sur la densité électronique par la relation [32]:

$$\frac{n_-}{n_e} = \frac{\Delta_e}{I_e} \quad (\text{III.7}).$$

3.4. Détermination de la densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées H_2 , par un rayonnement synchrotron

Le synchrotron SOLEIL, inauguré ce 18 décembre 2006, situé sur le plateau de Saclay .C'est un accélérateur de particules qui produit un rayonnement synchrotron. Ce rayonnement est fourni par un anneau de stockage de 354 m de circonférence dans lequel des électrons de très haute énergie circulent quasiment à la vitesse de la lumière .C'est une source de troisième génération.

Au synchrotron SOLEIL, tout commence dans le Linac, un accélérateur linéaire d'électrons de 16 m de long. Son rôle est de produire un faisceau d'électrons pulsé (par bouffées de 300 nanosecondes [ns], trois fois par seconde, soit une fréquence de 3 hertz [Hz]), de l'accélérer quasiment à la vitesse de la lumière et de l'amener jusqu'à une énergie de 100 millions d'électronvolts (MeV).Puis, les paquets d'électrons sont injectés dans le booster pour être ensuite injectés dans l'anneau de stockage. Après accumulation, ils

produisent du rayonnement synchrotron dans les aimants de courbure (dipôles, en rouge) et les onduleurs.

Ce rayonnement est utilisé par un grand nombre de lignes de lumière, construites tangentiellement à l'orbite des électrons, pour des expériences scientifiques très variées. (cf. Figure 3.7)[33].

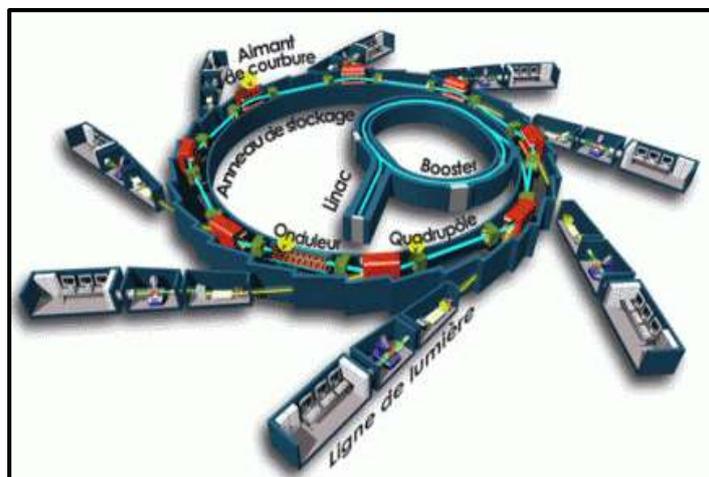


Figure (3.7). Schéma de principe d'une installation synchrotron.

La ligne DESIRS (Dichroïsme Et Spectroscopie avec le Rayonnement Synchrotron) couvre la gamme spectrale VUV de 5 à 40 eV. Avec une combinaison unique de très haute résolution, de pureté spectrale, de flux et de polarisation entièrement variable.

3.5. La source SCHEME-II

Cette source SCHEME-II (Source of exCited HydrogEn MolEcules) à été conçu et développé par l'équipe PMN du laboratoire LPSC pour l'étude les mécanismes de désorption recombinée des atomes dont l'objectif est la mesure les densités absolues des molécules ro-vibrationnels excités H₂, en utilisant le rayonnement synchrotron.

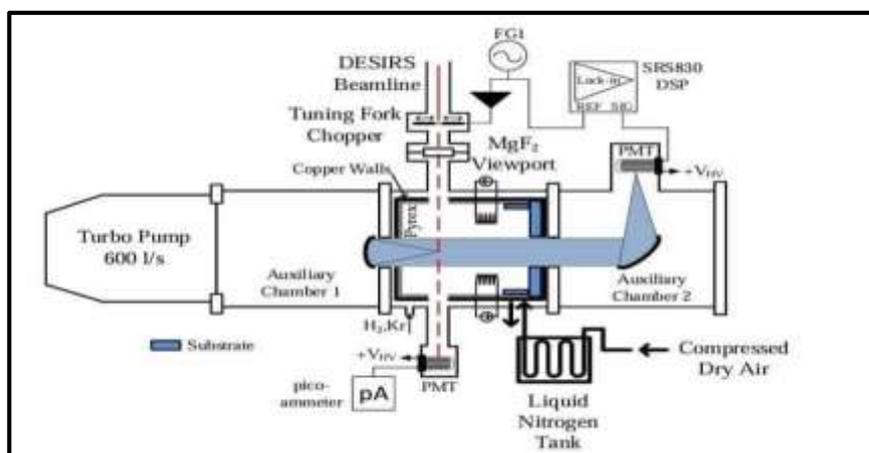


Figure (3.8). Schéma de la source SCHEME-II couplage la ligne DESIRS du Synchrotron Soleil [34].

La figure 3.8 représente le montage expérimental de la source, qui se compose de la chambre à vide, étant un cylindrique en PyrexTM d'un diamètre de 120mm, fermé des deux côtés et enfermé dans un cylindre cuivre et fermé par des fenêtres MgF₂.

Ce cylindre en cuivre est refroidi, un cylindre en Pyrex et cuivre est placé dans un troisième cylindre en acier inoxydable (160mm).en raison d'un coefficient de recombinaison différent, le pyrex est beaucoup plus faible que l'acier inoxydable et un atome H₂ (ν'' , J'') est absorbé et recombinaison à la surface pour former l'état fondamental excités.

Des trous, observables dans le verre PyrexTM et dans le tube de cuivre, sont placés trois fils de tungstène chauds dans la chambre et pour pompage également.

La ligne discontinue rouge fait référence à la ligne du faisceau synchrotron. Le faisceau pénètre soit dans un PMT VUV, soit dans un spectromètre VUV utilisant le même PMT.

Cette technique peut être encore difficile, mais grâce à la ligne DESIRS du synchrotron SOLEIL, elle offre de grandes possibilités dans le domaine de la spectroscopie VUV, en vue de déterminer le rôle des différents matériaux sur la production des molécules vibrationnellement excités par la désorption recombinative [12].

3.6. Conclusion

En conclusion, nous avons mis en évidence tous les dispositifs expérimentaux ainsi que tous les moyens de diagnostics, à partir desquels les résultats expérimentaux ont été réalisés.

Nous avons commencé ce chapitre par la description du réacteur ROSAE- III. Puis, nous avons également présenté les moyens diagnostics plasma dans ce réacteur, à savoir : sondes électrostatiques, Photodétachement laser, spectroscopie d'émission optique dans la région spectrale du visible et de l'ultraviolet du vide. Photodétachement laser, une technique qui permet de déterminer la densité absolue des ions négatifs d'hydrogène.

Enfin, le couplage de la source SCHEME-II à la ligne DESIRS du Synchrotron SOLEIL permet de mesurer la densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées, indispensables pour l'attachement dissociatif (AD).

Chapitre IV

Résultats et discussions

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, Nous présentons les discussions sur les résultats expérimentaux obtenus qui ont été réalisés sur le réacteur **ROSAE-III** par **J. BENTOUNES** sur la production d'ions négatifs H^- .

En commençant par étude comparative entre deux surfaces en contact avec le plasma de la source ROSAE-III à savoir le verre de borosilicate (Pyrex TM) et l'acier inoxydable (inox). Ensuite, effectuez une étude systématique du rôle que joue le tungstène (W) de surface par rapport pour la production des ions négatifs dans le volume du plasma. Nous présenterons une synthèse des résultats expérimentaux obtenus en termes de variations de l'ensemble de ces paramètres en fonctions de la puissance injectée.

Après cette confirmation, nous clôturons ce chapitre par l'expérience avec la source nommée SCHEME, menée sur la ligne de lumière DESIRS du synchrotron SOLEIL. Pour déterminer, par absorption VUV, la densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées H_2 (ν'' , J'').

4.2. Etude comparative Inox-Pyrex :

Nous commençons cette partie par l'étude entre les deux matériaux en contact avec le plasma de la source ROSAE-III, à savoir le verre de borosilicate (Pyrex) et l'acier inoxydable (inox), ayant des coefficients de recombinaison différents ($\gamma_H = 0.004$ et 0.5).

➤ Variations de la densité et la température électroniques

Nous traçons les courbes de densité et de température électronique en fonction de la puissance injectée pour voir comment ces deux paramètres se comportent lorsque la puissance change. Les figures **4.1** et **4.2** donnent respectivement les variations de densités et de température électronique en fonction de la puissance dont la gamme allant de 75 W à 175 W avec un pas de 25 W, à deux pressions de référence: 6 *mTorr* et 12 *mTorr* et bien sûr pour les deux matériaux à étudiés.

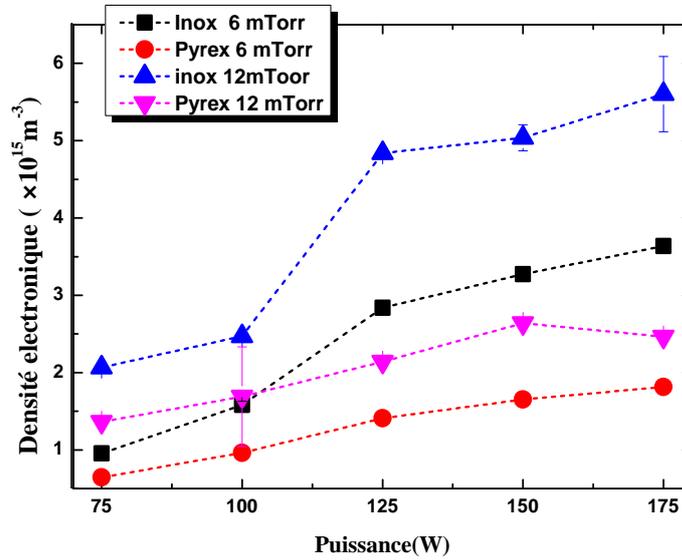


Figure 4.1. Variations de la densité électronique en fonction de la puissance pour les deux matériaux (inox et PyrexTM). Position de travail est B et deux pressions différent.

La première observation est toutes variations s'accroissent en fonction de la puissance. Là où l'on note la tendance de densité électronique du pyrexTM est similaire à celle observée dans l'inox. Concernant les matériaux, notons que l'inox donne une valeur de densité plus élevée quelle que soit la pression et la puissance.

Ceci peut s'expliquer par le fait que les ions hydrogène dans le plasma sont accélérés par la gaine électrostatique. Et ce pyrexTM contient l'élément O, qui est un élément électronégatif, qui peut être lié aux électrons en formant de O^- selon l'équation suivante : $O^+ + e^- \rightarrow O^-$. ce qui a conduit à une diminution de la densité électronique [12].

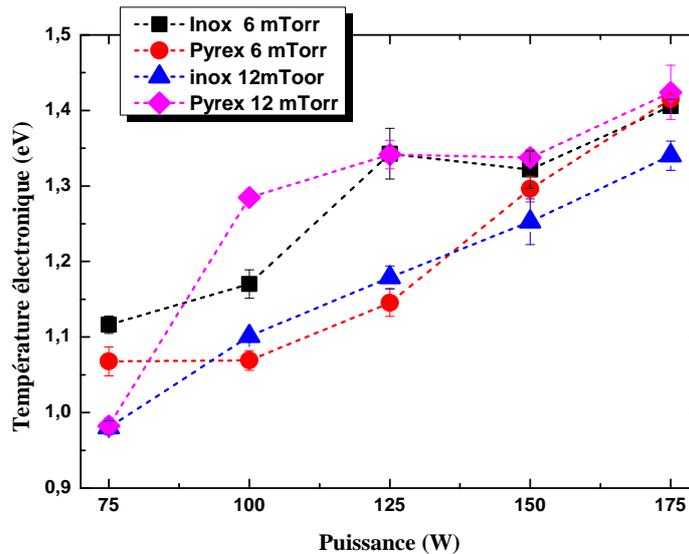


Figure 4.2. Variations de la température électronique en fonction de la puissance pour les deux matériaux (inox et PyrexTM). Position de travail est B et deux pressions différent.

De La figure 4.2, qui donne les variations de la température électronique en fonction de la puissance injectée, la température électronique est plus élevée et plus chauds pour une paroi en l'acier inoxydable (inox) à 6mToor. Mais à 12 mToor, une inversion a été observée dans les tendances : la température des électrons étant plus élevée par rapport à la paroi PyrexTM. C'est pourquoi, nous disons que même si nous changeons le matériau des surfaces intérieur de la pièce, il y aura peu d'effet sur les valeurs de température électronique.

➤ Le choix de la couverture de chambre

La figure (4.3) donne les rapports de densités ($H\beta/H\alpha$) en fonction de la puissance dont la gamme allant de 75 W à 175 W avec un pas de 25 W. Ces mesures donnent la densité relative de H atome présents dans l'enceinte du plasma ROSAE-III en surveillant le rapport $H\beta/H\alpha$ Q1 (2-2).

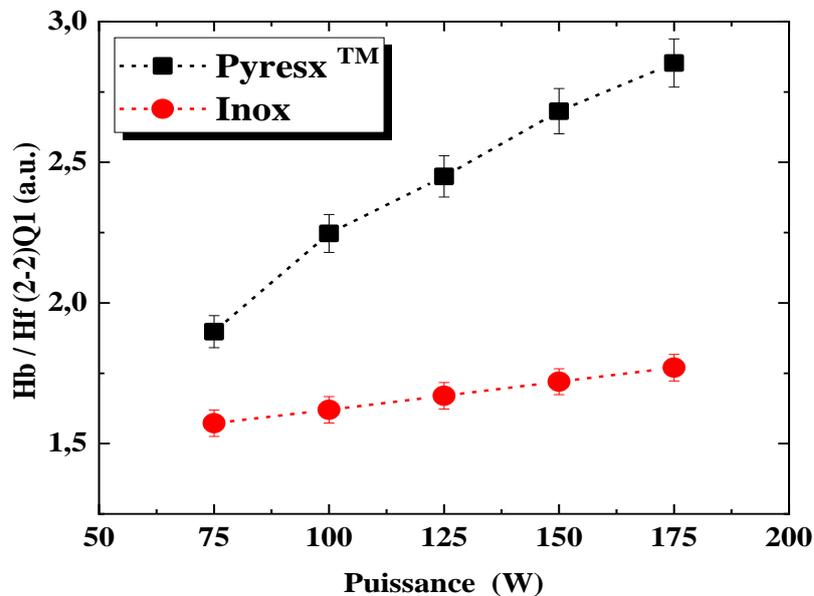


Figure 4.3. Variations des rapports des intensités des raies d'émission $H\beta/H\alpha$. Position B.

D'après la figure (4.3), la première remarque est que lorsque la paroi interne de ROSAE-III est recouverte de PyrexTM, la densité d'atomes H dans le plasma est plus élevée. Nous remarquons également que la dissociation augmente lorsque la chambre du plasma est recouverte avec le matériau en PyrexTM de 1,9 à 2,9. Inox se comporte différemment, une augmentation n'a lieu qu'entre 125 et 175 W. Entre 75 et 100 W, aucune augmentation particulière n'est perceptible. Ce qui semble indiquer que la surface d'Inox adsorbe les atomes d'hydrogène.

En effet, le Pyrex, avec son faible coefficient de recombinaison, rend minimale l'absorption des atomes à sa surface et on obtient plus d'atomes dans le volume du plasma, ce qui est le contraire de l'acier inoxydable qui, avec un coefficient de recombinaison modéré, empêche les atomes de rebondir et de s'adsorber davantage à sa surface que ceux du pyrex.

A travers de cette comparaison, il devient évident que nos résultats ont indiqué que la surface interne du verre de borosilicate (Pyrex™) par son coefficient de recombinaison ($\gamma_H = 0.004$) qui est la plus performante et annule tout effet de surface, ce qui nous amène à la choisir comme référence.

4.3. Etude de l'effet du matériau tungstène (w) sur production d'ions négative

Le matériau Tungstène (W) sera placé devant la source ECR (Position A). Il est sous forme de feuille de faible épaisseur 200 μm à 500 μm de 35 mm de large et de longueur égale au périmètre du tube Pyrex™ (\varnothing 120mm), ce qui représente 13% de la surface totale du Pyrex™ [12].

➤ Variations de la densité et la température électroniques

La figure 4.4 donne la densité électronique en fonction de la puissance dont la gamme allant de 75 W à 175 W avec un pas de 25 W à la Position B, pour deux pressions (6-12 Torr), et bien sur deux matériaux (Pyrex-tungstène).

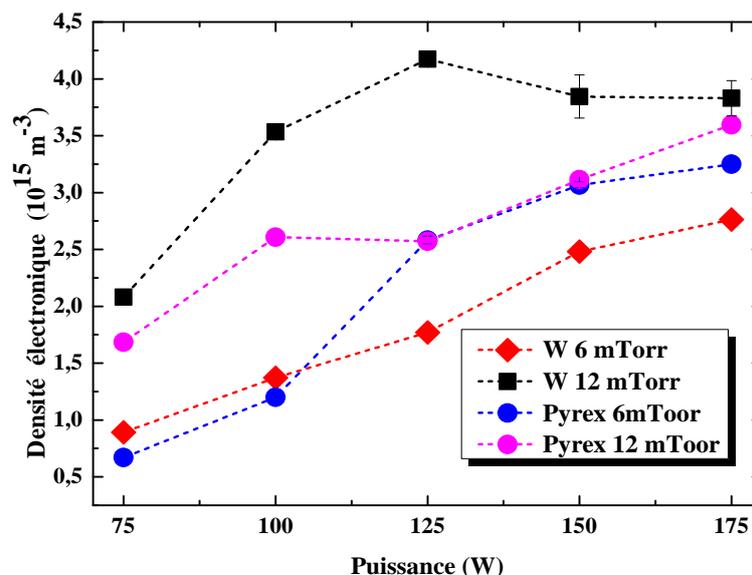


Figure 4.4. Variations de la densité électronique en fonction de la puissance (W).

Nous observons que la densité électronique présente dans le plasma obtenue par la sonde de Langmuir augmente en fonction de la puissance de 75 W à 175 W. Cette augmentation est monotone à la pression 6 mTorr lorsque le tungstène est une couverture partielle ou retiré. Et à la pression 12 mTorr, nous remarquons une augmentation principalement monotone du tungstène. A 6 mTorr, la densité augmente d'une valeur de $0.67 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ pour atteindre $3.24 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ entre deux matériaux. A 12 mTorr, le différent maximal entre les deux conditions de matériaux est atteint à 125 W. A 175 W, les valeurs de n_e allant de $2.76 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ à $3.82 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, quelle que soit la nature du matériau (à cette même condition).

Cette augmentation observée indique que la diffusion des particules a été modifiée par l'utilisation de matériau tungstène.

Concernant la température électronique, la figure 4.5 donne les dépendances de la température électronique en fonction de la puissance. Pour PyrexTM, à 6 mTorr, la température électronique varie de 1.2 eV à 1.45 eV en fonction de Puissance. A 12 mTorr, la T_e varie de 1.20 eV à 1.36 eV. Pour tungstène, à 6 mTorr, Elle passe aussi varie de 1.24 eV à 1.35 eV. A 12 mTorr, T_e augmente et atteint 1.5 eV à 150 W, puis diminue à 1,35 eV à 175 W.

Selon le résultat, après avoir couverture partielle le matériau W n'affecte ou peu affecte les valeurs de la température électronique.

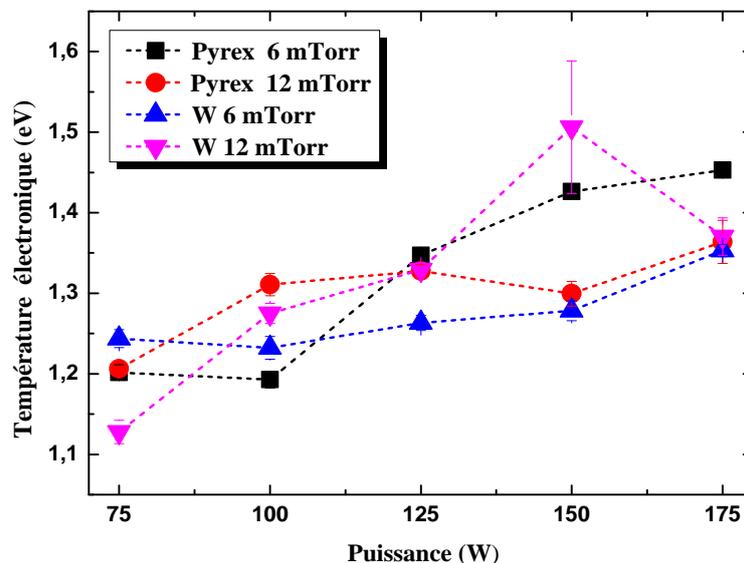


Figure 4.5. Variations de la Température électronique en fonction de la puissance, à deux pressions de référence: 6 mTorr et 12 mTorr pour les deux matériaux

➤ Variations du potentiel plasma et flottant

Nous étudions dans ce paragraphe est présenté respectivement Les variations des potentiels plasmas et flottant en fonction de la puissance injectée, dans les mêmes conditions expérimentales précédente (6mToor -12mToor, Position B). Le potentiel plasma et flottant on été obtenus immédiatement de la caractéristique $I_s(V_s)$ recueillie par une sonde électrostatique

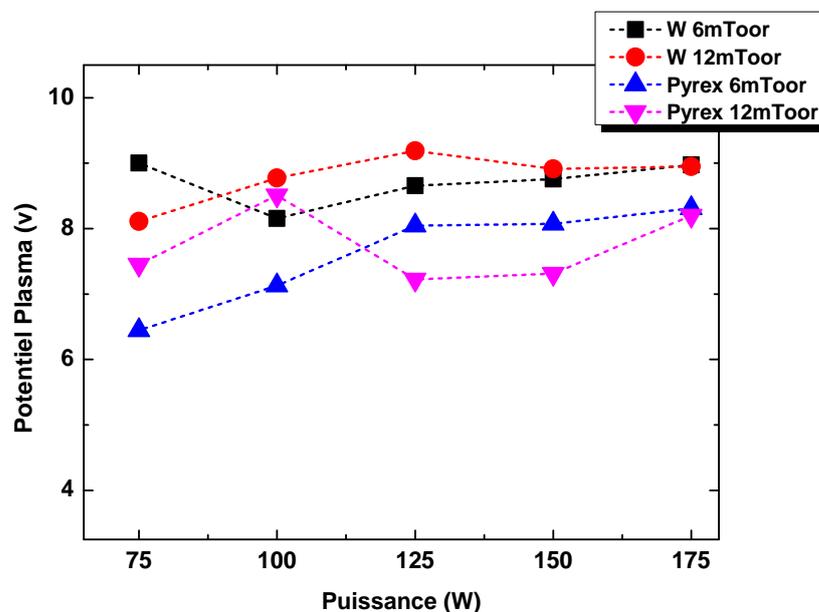


Figure 4.6. Variations du Potentiel Plasma en fonction de la puissance (W) pour les deux matériaux (Pyrex –W).

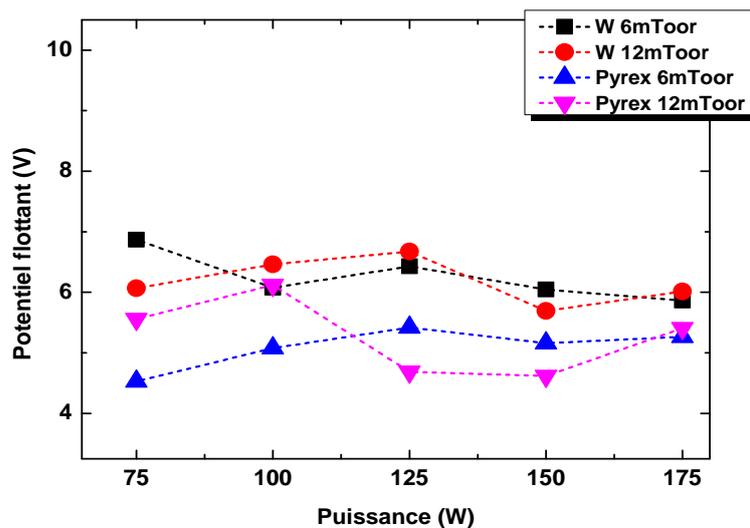


Figure 4.7. Variations du Potentiel flottant en fonction de la puissance (W) pour les deux matériaux (Pyrex –W).

Selon les résultats obtenus, le potentiel Plasma et le Potentiel flottant montre variations similaires en fonction la puissance, indépendamment de la pression et de la nature du matériau. Avec la différence entre le potentiel plasma et le potentiel flottant $V_p - V_f$ reste constant et proche 2V.

L'utilisation du diagnostic photodétachement nous a permis d'effectuer divers mesures de densité d'ions négatifs, en position B et dans différentes conditions expérimentales. Les résultats sont présentés en figure 4.8.

A partir de figure, on constate immédiatement que, la dépendance de la photo détachement en fonction de la puissance absorbée, fortement affectée par la présence de matériau tungstène, alors qu'elle reste quasiment constante avec une couverture en PyrexTM. Et dès que nous dépassons une puissance de 75 W, nous remarquons la différence. Le maximal est atteint pour la condition 125W/12mTorr.

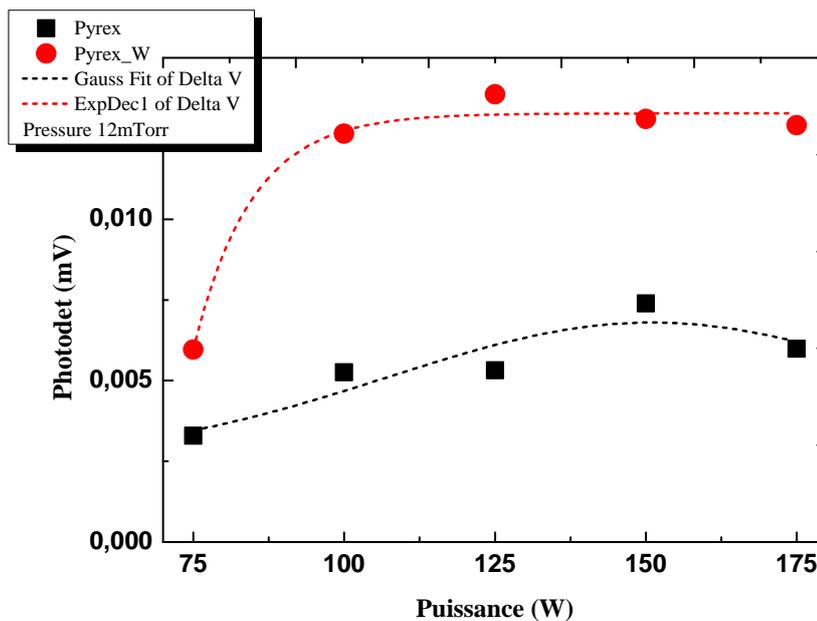


Figure 4.8. Variations de photo-détachement en fonction de la puissance, est dans les deux cas considérés : PyrexTM, Pyrex + W. $p=12\text{mTorr}$.

Cette tendance est confirmée par la mesure de la densité des ions négatifs en fonction de la puissance injectée présente dans le plasma selon la figure 4.9.

La figure 4.9 donne Les variations de la densité absolue des ions négatifs en fonction de la puissance à la position B.

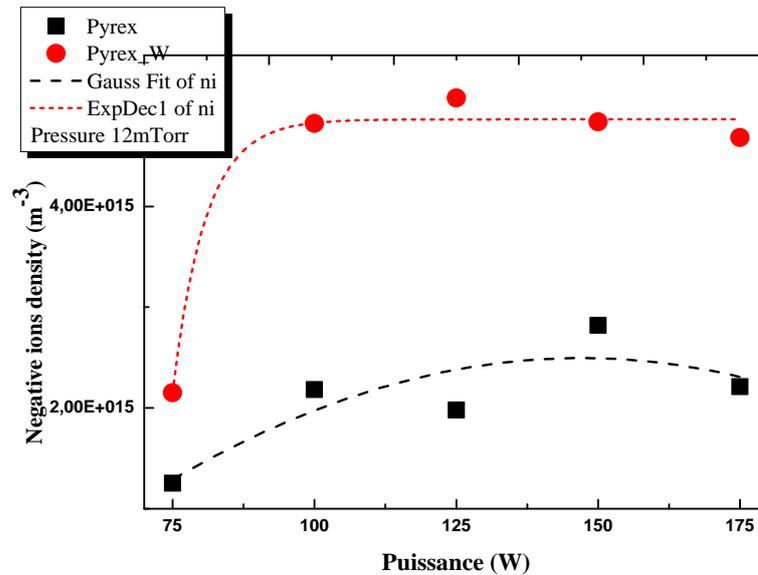


Figure 4.9 Variations de la densité absolue des ions négatifs en fonction de la puissance, est dans les deux cas considérés : Pyrex TM, Pyrex + W.

D'après les résultats présentés à la **Figure 4.9**, nous notons que la densité absolue des ions négatifs H^- plus importante en présence de matériau tungstène placé devant les sources ECR par rapport à la couverture complète de pyrex TM à une pression $12mTorr$. La valeur maximale de densité obtenue à est $125\text{ W}/12mTorr$. on retrouve un facteur 2.5 entre le cas du tungstène $\sim 5 \times 10^{15}\text{ m}^{-3}$ contre $1.97 \times 10^{15}\text{ m}^{-3}$ pour le Pyrex TM.

En effet, l'utilisation de tungstène comme matériau partielle de la surface du Pyrex TM faisant face au plasma a augmenté la densité d'ions négatifs. Ces résultats indiquent que l'effet de surface joue un rôle clé dans la production d'ions négatifs.

Pour déterminer n_i/n_e nous mesurons le courant électronique sur le plateau du signal de photo-détachement et le courant continu collecté par la sonde.

La **Figure 4.10** donne les rapports des densités n_i/n_e pour chaque matériau, en fonction de la puissance micro-ondes injectée, et la pression étudiée (12 mTorr).

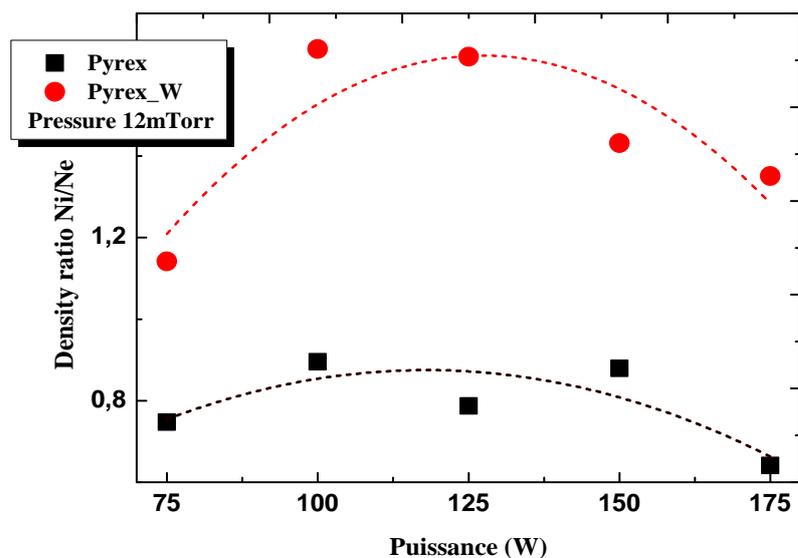


Figure (4.10). Variations du rapport des densités ionique sur densité électronique (n_i/n_e) en fonction de la puissance, pour les deux matériaux étudiés (PyrexTM – tungstène).

Le rapport des densités n_i/n_e en fonction de la puissance injectée à la position B selon la figure (4.10), confirme les variations obtenus pour la densité absolue d'ions négatifs H^- . Ce rapport est indépendant de la densité plasma. Ce qui nous fait parler l'efficacité de production d'ions négatifs par le processus (collisions avec des électrons froids, se transforment en ions négatifs) attachement dissociatif (AD).

A partir de la figure, on constate immédiatement que, pour les mêmes conditions, la quantité d'ions négatifs est plus élevée avec un matériau de tungstène que la surface tout PyrexTM complet. Cependant, l'écart reste constant même lorsqu'il atteint 175W, où nous remarquons un plus grand écart dans le rapport.

Comme d'être montré dans la figure (4.8), le tungstène est également efficace pour améliorer la densité des ions négatifs par attachement dissociatif (AD).

4.4. La densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées obtenues dans la source SCHEME-II

Le matériau de la paroi de l'enceinte peut avoir la capacité de produire plus de molécules ro-vibrationnellement excitées par désorption recombinative. Pour démontrer ce fait, nous concluons ce chapitre par une étude de l'effet d'un matériau tungstène (W) sur la production des molécules H_2 (v'' , J'').

Dans le but de confirmer la mesure des intensités absolues de ces molécules ro-vibrationnelles par absorption. Ces mesures ont été réalisées lors d'une campagne expérimentale effectuée au synchrotron SOLEIL de la ligne de lumière DESIRS, et sont présentées dans la Figure 4.10.

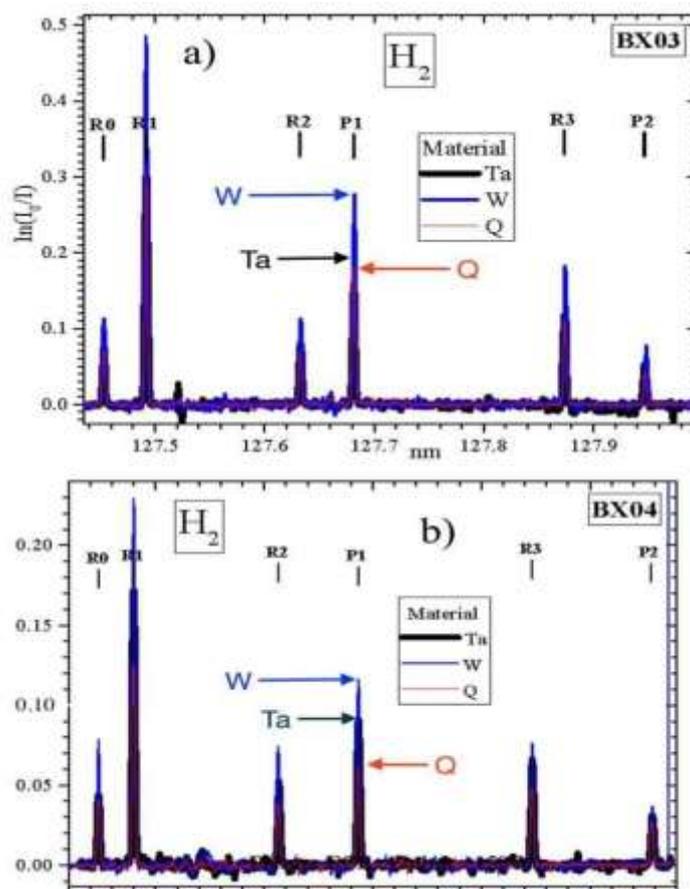


Figure (4.9). Absorbance de l'état excité ro-vibrationnellement BX03 (a) et BX04 (b) de la molécule H_2 dans son état fondamental. En rouge, le PyrexTM seul, le bleu pour le tungstène ; position B, $p=12\text{mTorr}$ [26].

La **Figure 4.10** montre le pic d'absorption pour toutes les transitions rotationnelles au niveau vibratoire BX03 et BX04. Pour le BX03(a) Nous notons que La plus grande augmentation d'absorption molécules ro-vibrationnellement est tungstène en comparaison avec le cas où le PyrexTM est seul devant au plasma. La transition BX04(b) observée a souligné des tendances similaires, qui étaient même renforcées par rapport à BX03. Ainsi, ces mesures d'absorption VUV donnent une confirmation partielle d'un effet significatif de la désorption recombinée sur les surfaces métalliques, ce qui pourrait expliquer l'augmentation des ions négatifs observée avec le photodétachement laser.

Ces résultats indiquent que lorsque le matériau est en tungstène face au plasma, on s'attend à une augmentation des molécules ro-vibrationnellement excitées par désorption recombinative. Ce qui pourrait expliquer l'augmentation des ions négatifs.

4.5. Conclusion

En guise de la conclusion de ce chapitre, Le changement de la chambre du réacteur **ROSAE-III** nous a permis une caractérisation de la production des ions négatifs à partir de molécules ro-vibrationnellement excitées, créées par la désorption recombinative à la surface du matériau.

Nous avons approché les deux configurations Pyrex-inox pour le matériau face au plasma pour faire comparaison. Nos résultats ont indiqué que pyrex est plus efficace en termes de formation d'atomes.

Ensuite, l'étude le matériau tungstène (W) permet à produire plus de d'ions négatifs ont supposés être créés principalement en volume, par l'attachement dissociatif (AD), après leurs collisions avec des électrons froids ($T_e \approx 1\text{eV}$) et molécules ro- vibrationnellement excitées $\text{H}_2(\nu'', J'')$.

Enfin, après l'expérience avec la source SCHEME, qui a été réalisée sur une ligne de lumière DESIRS du synchrotron SOLEIL.les résultats des mesures par VUV ont montré une augmentation de l'intensité des molécules ro-vibrationnellement excitées (ν'', J'') .

Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire s'inscrit dans ambitions des chercheurs physiciens et des scientifiques afin de trouver un moyen pour encore augmenter plus les ions négatifs produits.

Il s'agit de la présentation et de l'analyse des mesures effectuées placées d'un matériau tungstène (W) faisant face au plasma en utilisant des sources multi-dipolaires micro-ondes (2.45 GHz) fonctionnant à la Résonance Cyclotronique Electronique (ECR). Ces mesures ont eu lieu dans le laboratoire LPSC.

Ainsi, dans le présent mémoire, dans le but choisir une référence, une comparaison entre deux matériaux différents faisant face au plasma a été réalisée à savoir l'acier inoxydable qui a un coefficient de recombinaison ($\gamma_H = 0.5$) modéré, et du verre borosilicate (pyrex) qui a un faible coefficient d recombinaisons ($\gamma_H = 0.004$).

Dans les premiers résultats, des mesures ont montré que l'utilisation d'une paroi en inox donne une densité électronique est plus élevée. A la mesure 175/12mToor, les densités électroniques donnent respectivement $5.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ (inox) et $2.46 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ (pyrex).

En ce qui concerne la température électronique, nous avons trouvé qu'elle est peu affectée par le type de surface.

A partir des deuxièmes résultats à la lumière de cette comparaison, nous avons trouvé que la densité d'atomes H est plus importante dans le cas du pyrex que de l'inox. Ceci a été expliqué par le fait que les atomes pour la surface du pyrex rebondissent contrairement au l'inox.

Ensuite, partant de l'étude comparative des deux matériaux suivants : PyrexTM / tungstène, seule 13% de la paroi de PyrexTM placée à l'intérieur du réacteur ROSAE-III a été couverte par le matériau tungstène.

Les résultats ont montré que le matériau tungstène donne une densité électronique plus importante en fonction de la puissance micro-onde. Cette différence indique que l'utilisation tungstène a été modifiée par la densité électronique (125W/12 mToor).

Concernant la température électronique T_e , nous avons trouvé qu'elle est peu affectée par le type de surface et de même pour les potentiels plasmas V_p et flottant V_f .

Ensuite, Les mesures de photo détachement ont dévoilé que l'utilisation d'un matériau tungstène enrichissait notablement en des ions négatifs de pour une pression de 12 mTorr. Nous avons ensuite donné une variation de la densité absolue des ions négatifs d'après ce qu'a confirmé ce fait. Ainsi, la densité absolue des ions négatifs a été multipliée par un

facteur 2.5 pour la même densité d'électrons froids présents dans le plasma, passant de $1.67 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ à $5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ en utilisant le tungstène.

Nous avons aussi pu montrer que, concernant le rapport n_i/n_e donnant la densité relative, le mécanisme final de production de H^- se conserve i.e. les ions H^- sont produits par (AD).

Afin d'examiner le rôle du matériau tungstène qui a produit ces molécules excitées H_2 , nous avons réalisé des mesures avec la source SCHEME-II en la plaçant dans la ligne de lumière DESIRS du synchrotron SOLEIL.

Les mesures d'absorption VUV ont indiqué une augmentation significative des densités relatives des molécules.

D'après toutes les analyses comparatives, l'utilisation le matériau tungstène (W) permet à produire plus de molécules ro- vibrationnellement excitées par désorption recombinative. Donc, une aptitude à la création d'ions négatifs par l'attachement dissociatif (AD), après leurs collisions avec des électrons froids.

Enfin, nous pouvons dire que l'objectif envisagé par ce mémoire est largement atteint. et nous souhaitons que ce travail donne lieu à une continuité dans le domaine de la modélisation future et dans les sources sans Cs déjà existantes, qui pourraient facilement être modifiées avec une couverture en tungstène pour améliorer la production d'ions négatifs.

Références bibliographiques

- [1] J.A. Bittencourt, "Fundamentals of Plasma Physics", 3rd ed, National Institute for Space Research, Springer, pp.1-2, 2004.
- [2] https://www.plasmatreteat.fr/technologie_plasma/qu-est-ce-que_plasma.html.
- [3] WWW-fusion-magnétique.cea.fr/fusion/physique/plasma.htm.
- [4] J. Bentounes, "Production des ions négatifs en surface de graphite dans un plasma d'hydrogène et de deutérium ", Thèse de Magister, Université de Mostaganem, pp.16, 2008.
- [5] F. Zahéra, "Effet des conditions initiales sur la propagation d'une décharge haute pression ", Thèse de Magister, pp.16 -17, 2012.
- [6] C. Sarra-Bournet, "Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux," Revue D, vol.53, n°04, p.124, 2007.
- [7] M. Nouicer Ilyès dit Abdelouahab, "Etude de l'effet de la composition d'une couche mince et de ses conditions d'élaboration par plasma froid à partir de vapeurs organosiliciées sur les propriétés de surface d'un film polymérique", Thèse de doctorat, p.21, 2017.
- [8] M. Calafat, "Formation de poudres dans des décharges d'acétylène en Plasma micro-onde multipolaire excité à la résonance cyclotronique électronique répartie. Etude des nanocomposites carbone-carbone et leurs applications", Thèse de Doctorat, p.27, 2008
- [9] Brahim Loann, "La physique des plasma ", les différents types des plasmas –physique & Réussite ,2016.
- [10] A.KAIS, " Développement, caractérisation et optimisation d'une source plasma pour le traitement biologique dans le domaine agroalimentaire", Thèse de Doctorat, p.54, 2019.
- [11] Philippe LEFAUCHEUX, "Technologie des réacteurs à plasmas : Plasmas inductifs et capacitifs basse pression", Bonascre, pp.1, 2003.
- [12] J. Bentounes, "Etude expérimentale de la production d'un courant d'ions négatifs appliquée à la fusion thermonucléaire contrôlée par utilisation de techniques spectroscopiques et confrontation des résultats expérimentaux à un modèle numérique", Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, LPSC, pp. 48-50, 2018.
- [13] BOUDGHENE STAMBOULI Arslane, "Étude des conditions physiques d'une décharge DF-CCP pour l'obtention de couches minces", thèse de doctorat, p.23, 2018.
- [14] P.chabert, N. Braithwaite, " PHYSICS OF RADIO-FREQUENCY PLASMAS", Cambridge, p. 15, 2011.
- [15] A. KAIS, "Développement, caractérisation et optimisation d'une source plasma pour le traitement biologique dans le domaine agroalimentaire", thèse de doctorat, UNIVERSITE Toulouse, p.30, 2019.
- [16] "Plasmas multi-dipolaires –LPSC Grenoble ", laboratoire de physique subatomique & cosmologie, Université Grenoble Alpes, 2021.
- [17] E. L attouf, "Étude expérimentale de la formation de l'ion d'hydrogène négatif lors de collisions entre un ion positif et une cible atomique ou moléculaire ," Doctorat de l'Université de Cae Basse –Normandie , p.30,2013.
- [18] G. D. Alton, "Negative Ion Formation Processes: a General Review", p.2, 2008.

- [19] D. Ecoles, A. Intermines, and C. Adresses, "Les perspectives de la fusion thermonucléaire," p.27, 2003.
- [20] M. SIDIBE, "Étude du comportement du tungstène sous irradiation : Applications aux réacteurs de fusion," thèse de doctorat, pp.18, 2014.
- [21] Y. I. Belchenko, G. I. Dimov, and V. G. Dudnikov, "A powerful injector of neutrals with à surface-plasma source of negative ions," *Nucl. Fusion*, vol. 14, no. 1, p. 113, 1974.
- [22] David Riz, "Étude expérimentale de sources à fort courant d'ions négatifs D^- / H^- . Analyse fondée sur la simulation du transport des ions dans le plasma de la source," thèse de doctorat, pp.14-17, 1996.
- [23] D.C. Faircloth, "Negative Ion Sources: Magnétron and Penning," Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, vol. 26, p.1.
- [24] D.C. Faircloth et al, " Electromagnetic modeling of the extraction region of the ISIS H \bar{A} ion source," *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, vol.75, no. 5, p. 1735, 2004.
- [25] J. Peters and D. Elektronen-synchrotron, "HIGH BRIGHTNESS / HIGH CURRENT," pp. 1031–1035, 1971.
- [26] J. Bentounes *et al.*, "Effects of the plasma-facing materials on the negative ion H - Density in an ECR (2.45 GHz) plasma," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 27, no. 5, p. 55015, 2018.
- [27] I. H. HUTCHINSON: Principales of Plasma Diagnostics, Second edition, Massachusetts Institute of Technology, USA, pp.57, 2002.
- [28] BOUSBIA BRAHIM Abir, "Diagnostic des plasmas par la sonde électrostatique de Langmuir", mémoire de master, pp.24, 2013.
- [29] Spyridon ALEIFERIS, "Étude expérimentale de la production d'ions négatifs H- par des plasmas à la résonance cyclotron électronique ", thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, pp.49, 2016.
- [30] J. Komppula and O. Tarvainen, "VUV diagnostic of electron impact processes in low temperature molecular hydrogen plasma," Jyvaskyla. Finland, p.24, 2015.
- [31] R.K. Janev et al, "Collision Processes in Low-Temperature Hydrogen Plasmas," 2003. [32] Olivier PAUNA, Centre de Physique des Plasmas et de leurs Applications de Toulouse, Thèse de doctorat, pp.53.2 000.
- [33] Marie-Emmanuelle Couprie, "Le rayonnement synchrotron, une source de lumière dédiée à la recherche," *Reflets du Physique* n° 34 – 35, p.21.
- [34] S. Béchu *et al.*, "Detection of rovibrationally excited molecular hydrogen in the electronic ground state via synchrotron radiation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 7, 2017.
- [35] J. Boeuf, G. Fubiani, and G. Hagelaar, "Les sources d'ions négatifs pour le chauffage par injection d'atomes à haute énergie."