

**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 :

Boukralfa Batoul

THEME :

**Le rôle du HOPG dans la désorption recombinative**

Soutenu le : 28/06/2021

Devant le jury composé de :

<b>M<sup>r</sup></b> . TERKI HASSAÏNE Mounir	MCA	Université de Mostaganem	Président
<b>M<sup>r</sup></b> . BOUATTOU Bezine	MAB	Université de Mostaganem	Examineur
<b>M<sup>r</sup></b> . BENTOUNES Jounayd	MCB	Université de Mostaganem	Encadrant

Année Universitaire 2020-2021

## Dédicaces

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable mère Fadila;*

*A l'homme, mon précieuse offre d'Allah, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Zoubir;*

*Je dédie ce travail également à mes chères sœurs Marwa, Mansouria, Kheira et Asma ainsi qu'un mes chères frères Mohamed et Mostafa. Qu'Allah les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes chères amies.*

## Remerciements

*A l'issue du cycle de ma formation je tiens à remercier Allah de m'avoir donné le courage pour accomplir ce travail.*

*Je remercie Mr. TERKI HASSAINE Mounir d'avoir accepté de présider le jury de soutenance. Que Mr. BOUATTOU Bezine, qui a accepté de juger ce travail, soit remercié.*

*Mes remerciements les plus sincères vont à Mr. BENTOUNES Jounayd pour ses conseils précieux, le suivi qu'il m'a prodigué, ainsi que pour sa disponibilité et ses encouragements qui m'ont permis de réaliser ce travail dans de meilleures conditions.*

*Ce mémoire n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de ma famille, en particulier Mes parents qui m'ont toujours encouragé moralement et physiquement que je tiens à remercier.*

*Enfin, j'exprime vivement mes remerciements, avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.*

## Résumé :

Le présent travail consiste en l'exploitation et l'analyse de résultats expérimentaux obtenus par l'équipe CRPMN (Centre de Recherche Plasma-Matériaux-Nanostructures) du laboratoire LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique & Cosmologie). Les mesures ont été réalisées dans le but de comprendre les mécanismes de production des ions négatifs d'hydrogène. D'intérêt pour la fusion thermonucléaire Contrôlée. Les sources d'ions actuelles de production en surface des ions négatifs,  $H^-$  représentent un risque, de part de leur utilisation du césium. Ce dernier, bien qu'il fasse baisser le travail de sortie de la surface, il pourrait aussi être une source de contamination. et l'origine d'une explosion. Les résultats présentés dans ce manuscrit sont une alternative de production d'ions  $H^-$  sans césium, notamment le réacteur ROSAE III conçu et développé au laboratoire LPSC de Grenoble.

Le HOPG qui est l'un des matériaux prometteurs a permis grâce à la désorption recombinative, d'augmenter la densité absolue d'ions négatifs  $H^-$  par un facteur 5.

**Mots clés:** fusion thermonucléaire, plasma d'hydrogène, ions négatifs  $H^-$ , attachement dissociatif, désorption recombinative.

## ملخص:

يتكون العمل الحالي من استغلال و تحليل النتائج التجريبية التي تحصل عليها فريق CRPMN من مختبر LPSC, تم إجراء القياسات من اجل فهم آليات إنتاج ايونات الهيدروجين السالبة ذات الأهمية في الاندماج النووي الحراري المتحكم فيه. مصادر الايونات الحالية للإنتاج السطحي للأيونات الهيدروجينية السالبة تمثل خطرا بسبب استخدامها للسيريزيوم، هذا الأخير على الرغم من انه يقلل من عمل الخروج من السطح الا انه قد يكون أيضا مصدرا للتلوث وأصل الانفجار. النتائج المعروضة في هذه المخطوطة هي بديل لإنتاج ايونات الهيدروجين بدون السيريزيوم ولاسيما مفاعل ROSAE III المصمم والمطور في مختبر LPSC في غرو نوبل (فرنسا).

بفضل الامتصاص المؤتلف جعلت HOPG والتي هي واحدة من المواد الواعدة، من زيادة الكثافة المطلقة للأيونات الهيدروجينية السالبة بمعامل 5.

**الكلمات المفتاحية:** الاندماج النووي الحراري, بلازما الهيدروجين,, الأيونات الهيدروجينية السالبة, التعلق الانفصامي الامتصاص المؤتلف.

## **Abstract:**

The present work consists of the exploitation and the analysis of experimental results obtained by the CRPMN team of the LPSC laboratory. The measurements were carried out in order to understand the mechanisms of production of negative hydrogen ions. Of interest in fusion thermonuclear Controlled. Current ion sources for the production of ions on the surface negative, represent a risk, due to their use of cesium. The latter, although he does lower the work output from the surface, it could also be a source of contamination. and the origin of an explosion. The results presented in this manuscript are an alternative to production of cesium-free ions, in particular the ROSAE III reactor designed and developed at LPSC laboratory in Grenoble.

The HOPG which is one of the promising materials made it possible thanks to the desorption recombinant, to increase the absolute density of negative ions by a factor of 5.

**Keywords:** thermonuclear fusion, hydrogen plasma, negative  $H^-$  ions, attachment dissociative, recombinant desorption.

## Liste des abréviations

Abréviation	Expression Complète
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
PMN	Plasma-Matériaux-Nanostructures
LPSC	Laboratoire de Physique Subatomique & Cosmologie, UMR 5821, 38026 Grenoble.
RF	Radio Fréquence.
ECR	Résonance Cyclotronique Electronique.
ROSAE	EcR hydrOgen plaSma for neutrAl bEam.
PIIM	Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires

# Sommaire

Introduction générale .....	1
Chapitre I: Généralités sur les plasmas .....	2
I.1 Introduction .....	3
<b>I.2 Classification de l'état de la matière du point de vue thermodynamique .....</b>	<b>3</b>
I.3 Définition du plasma .....	3
I.4 Grandeurs caractéristiques .....	3
I.4.1 Le degré d'ionisation .....	4
I.4.2. Les températures électronique et ionique.....	4
I.4.3 Potentiel plasma .....	5
I.4.4 Potentiel flottant .....	6
I.5 La longueur de Debye .....	6
I.6 Gaine électrostatique .....	7
I.7 Types de plasma .....	8
I.7.1 Plasma froid.....	10
I.7.2 Plasma chaud.....	10
I.8 Sources plasma .....	10
I.8.1 Plasma RF .....	11
I.8.1. Réacteur Hélicon.....	11
I.8.2 Plasma source ECR.....	12
I.9 Plasma d'Hydrogène .....	14
I.10 Conclusion .....	15
Chapitre II Ions négatifs d'hydrogène.....	16
II.1 Introduction .....	17
II.2 fusion : thermonucléaire .....	17
II.2.1 Injection de neutres (IDN) .....	18
II.3 L'ion négatif d'hydrogène .....	19



II.4 Mécanismes de production des faisceaux d'ions négatifs .....	19
II.4.1 La production en surface .....	20
II.4.2 La production en volume .....	21
II.4.2.1 Les processus E-V .....	21
II.4.2.2 Les processus e-V.....	21
II.4.2.3 Les processus V-V .....	22
II.4.2.4 Les processus de désorption recombinative .....	24
II.5 Les différents types de sources d'ions $H^-$ .....	25
II.5.1 Les source en surface .....	27
II.5.1.1 Les sources magnétrons .....	27
II.5.1.2 Les sources Penning .....	28
II.5.2 Les sources en volume .....	28
II.5.2.1 Source à filaments .....	28
II.5.2.2 les sources RF .....	29
II.5.2.3 La source ECR .....	29
II.6 Conclusion .....	30
Chapitre III: Dispositif expérimental .....	31
III.1 Introduction .....	32
III.2 Réacteur ROSAE-III .....	33
III.3 Diagnostics du plasma .....	34
III.3.1 Sonde de Langmuir .....	35
III.3.2 Spectroscopie d'émission optique dans le visible.....	36
III.3.3 Photo-détachement laser .....	37
III.3.3.1 Description .....	38
III.3.3.2 Mesure de la densité relative $n_i/n_e$ .....	39
III.4 Conclusion .....	40
Chapitre IV: Résultats et Interprétation .....	41

IV.1 Introduction .....	42
IV.2 Étude de l'effet de HOPG sur la production d'ions $H^-$ .....	42
IV.2.1 Etude comparative Inox-Pyrex .....	43
IV.2.1.1 Interprétations .....	44
IV.3 Interprétations du rôle du HOPG .....	46
IV.4 Discussion .....	48
IV.4 Conclusion .....	50
V. Conclusion générale.....	51

# Introduction Générale :

Les plasmas, qui sont des gaz ionisés, se trouvent au cœur du fonctionnement de la dernière génération de réacteur ITER (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor).

Les plasmas sont présents dans de nombreuses applications industrielles, parmi des secteurs, le domaine de l'énergie est considéré comme le moteur majeur de la recherche sur les plasmas. 35 pays qui sont engagés dans la construction d'un réacteur à fusion du type *Tokamak* appelé ITER qui est l'un des projets les plus ambitieux au monde dans le domaine de l'énergie. Il est le plus grand projet scientifique mondial actuel.

Les progrès dans ce domaine nous obligent nécessairement à connaître le plasma : ses propriétés et ses comportements. A cet effet, nous avons analysé et exploité dans ce mémoire, les mesures expérimentales menées par Jounayd BENTOUNES au niveau du laboratoire de physique subatomique et cosmologie (LPSC), l'équipe de physique des matériaux et nanostructures (PMN) de l'université de Grenoble, Alpes (France).

Dans ce manuscrit, nous restreindrons au plasma d'hydrogène type ECR, généré dans le réacteur ROSAE-III.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur une investigation d'un éventuel rôle du HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite), qui est un matériau à base de graphite (une variante de carbone), dans la production d'ions négatifs d'hydrogène, par un mécanisme appelé "Désorption recombinative. Le but étant de comprendre, les mécanismes de création des ions négatifs d'hydrogène, utilisé dans le chauffage du réacteur ITER, par la technique dite d'injection de neutre (NBI en anglais)

Ce mémoire est reparti en cinq chapitres :

Le chapitre I sera consacré à la présentation de quelques notions fondamentales sur la physique des plasmas, la définition des caractéristiques importantes, les types et ses sources.

Le chapitre II sera dédié à la génération des ions négatifs en volume et/ou surface, en plasma d'hydrogène.

Le chapitre III donnera une description détaillée du réacteur ROSAE-III , et nous présentons les différents moyens diagnostic, notamment photo-détachement Laser.

Le chapitre IV sera consacré à la présentation et discussion des résultats obtenus.

Enfin, nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale.

## Chapitre I

### Généralités sur les plasmas

Ce chapitre est une introduction générale, assez détaillée, à la physique des plasmas. Nous commençons par définir les grandeurs caractéristiques d'un plasma, la longueur de Debye et la gaine électrostatique. Ensuite, nous passons aux deux principaux types de sources plasmas : RF "radio fréquence" et ECR "résonance cyclotronique électronique", ou nous nous attardons un peu plus sur la description du réacteur ROSAE-III, avec lequel les résultats expérimentaux ont été obtenus. Enfin une description détaillée des différents diagnostics plasma utilisés sera présentée.

# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

---

## I.1 Introduction:

Le terme « plasma » a été introduit pour la première fois par I. Langmuir en 1928 lorsqu'il observait le comportement du gaz ionisé dans des tubes à décharge, il est suivant considéré comme le quatrième état de la matière que nous expliquons dans le paragraphe (Cf. f.I.2).

## I.2 Classification de l'état de la matière du point de vue thermodynamique:

Traditionnellement la matière est classée en trois états [1]:

- l'état solide ;
- l'état liquide ;
- l'état gazeux :

Cependant, lorsqu'on chauffe le gaz, sous l'effet de l'agitation thermique ses molécules s'ionisent, peuvent se fragmenter pour donner un ensemble composé d'électrons, d'ions, de fragments moléculaires et d'espèces neutres avec, dans certains cas, une luminescence. On obtient ainsi un gaz partiellement ionisé et globalement neutre. C'est ce qu'on appelle le plasma. Les quatre états de la matière sont illustrés sur la figure I-1.



Figure I-1 : Evolution de l'état de la matière avec la température

# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

---

## I.3 Définition d'un plasma:

Le plasma est le quatrième état de la matière et représente près de 99 % de l'univers. Il existe soit à l'état naturel (couronne solaire, Soleil, intérieur des étoiles,...), soit en laboratoire où il est généralement produit par des décharges électriques. Les plasmas sont des gaz contenant des atomes, des molécules et des ions dans l'état fondamental ou dans un état excité, des électrons et des photons qui proviennent de la désexcitation des états excités «figure I-2» [2].

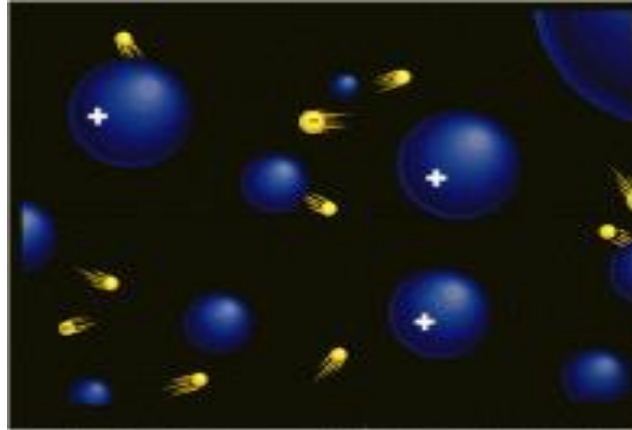


Figure I-2 : Electrons et Ions dans un plasma [2].

## I.4 Grandeurs caractéristiques:

Les plasmas sont caractérisés principalement par les paramètres suivants: Le degré d'ionisation, Les températures électronique et ionique, le potentiel flottant, le potentiel plasma et la longueur de Debye.

### I.4.1 Le degré d'ionisation:

Le degré d'ionisation d'un plasma est défini par :

$$\alpha = \frac{n_0}{n + n_0} \quad (\text{I-1})$$

Où  $n_0$  est la densité des électrons (ion positifs) et  $n$  est la densité des espèces neutres.

Si  $\alpha < 10^{-4}$ , alors le plasma est dit «faiblement» ionisé et si  $\alpha > 10^{-4}$ , alors il est dit «fortement» ionisé.

# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

---

Le mouvement des particules chargées peut être alors dominé par des collisions avec d'autres particules chargées si le plasma est « fortement ionisé » ou par collision avec des neutres s'il est « faiblement ionisé » [3].

## I.4.2 Les températures électronique et ionique:

Les énergies des électrons, ions et molécules excitées étant différentes [3], il n'existe pas de température thermodynamique pour le plasma comme on peut la définir pour un gaz neutre. La valeur des énergies des espèces présentes dans le plasma suit cependant une loi de distribution statistique qui peut être de type Maxwell-Boltzmann, que l'on peut ainsi définir comme la température statistique des différents éléments suivant l'équation [4] :

$$E_c = \left(\frac{1}{2}\right) m v = \left(\frac{3}{2}\right) k_B T \quad (I-2)$$

où  $E_c$  est l'énergie cinétique,  $m$  la masse de la particule,  $V$  la vitesse quadratique moyenne,  $T$  la température en Kelvin et  $K_B$  la constante de Boltzmann ( $1,38.10^{-23} \text{ J. } k^{-1}$ ).

On définit ainsi trois températures:

$T_e$ : pour les électrons;

$T_i$ : pour les ions ;

$T_n$  : pour les espèces neutres.

La masse des ions et des molécules étant beaucoup plus grande que celle des électrons, ont des températures faibles. Or, les électrons qui sont beaucoup plus légers, donc se déplacent rapidement. Ont une énergie plus grande et par conséquent une température beaucoup plus élevée ( $T_e \gg T_i$ )

## I.4.3 Potentiel plasma $V_p$ :

La distribution des charges dans l'ensemble du plasma donne lieu à une évolution spatiale du potentiel. La figure I-3 représente l'évolution spatiale du potentiel du plasma dans un espace inter-électrode. Cet espace se divise en trois parties : le plasma et les deux gaines électrostatiques (Cf. f.I.6). Dans les gaines, il y a une chute du potentiel et cette chute est variable dans le temps. Dans la région plasma (où il n'y a pas de régions de charge d'espace) règne un potentiel stationnaire dit potentiel plasma ( $V_p$ ) [4].

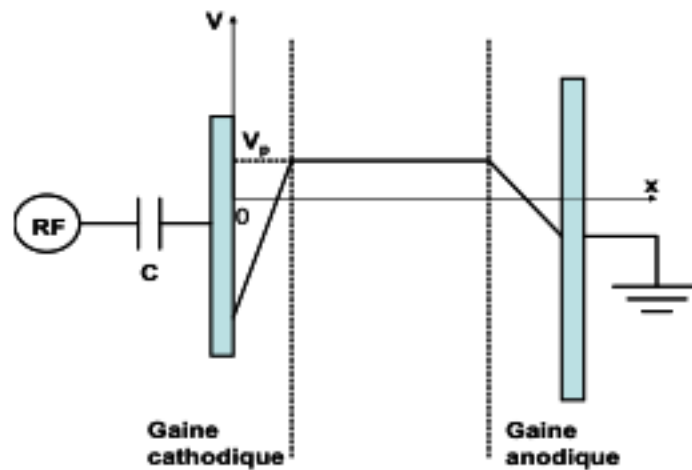


Figure I-3 : Evolution spatiale du potentiel du plasma dans l'espace inter-Electrode [4].

## I.4.4 Potentiel flottant $V_f$ :

Le potentiel flottant est le potentiel qu'atteindra un corps étranger électriquement isolant emmagé dans le plasma. Le potentiel flottant est toujours inférieur au potentiel du plasma, car les électrons sont plus rapides que les ions atteindront la surface plus rapidement, provoquant l'accumulation de charges négatives. En conséquence, une gaine se formera autour du corps, tendant à repousser les électrons et à attirer les ions jusqu'à ce qu'un équilibre soit établi entre le flux de ces deux substances [6].



# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

---

## I.5 La longueur de Debye:

Une charge immergée dans un plasma est entourée de charges de signe opposé qui tendent à écarter son champ coulombien. Cette influence a lieu pour toute distance inférieure à la longueur de Debye  $\lambda_D$  définie par l'Équation [7]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\xi_0 k_B T_e}{n_e q^2}} \quad (\text{I-3})$$

Cette longueur peut également être calculée lorsque les particules chargées négativement sont séparées en deux populations de températures différentes. Par exemple dans le cas de plasmas électronégatifs, contenant les densités d'électrons  $n_e$  de température  $T_e$ , d'ions négatifs  $n_n$  de température  $T_{i-}$  et d'ions positifs  $n_p$  de température  $T_{i+}$  et que l'on considère la quasi-neutralité avant perturbation  $n_p = n_e + n_n$ , la longueur de Debye en plasma électronégatif s'écrit alors :

$$\lambda_{D-} = \sqrt{\frac{\xi_0 K_B T_e}{n_e q^2}} \sqrt{\frac{1+\alpha}{1+\gamma\alpha}} = \lambda_D \cdot \sqrt{\frac{1+\alpha}{1+\gamma\alpha}} \quad (\text{I-4})$$

Avec  $\gamma = \frac{T_e}{T_{i-}}$ ;  $\alpha = \frac{n_n}{n_e}$  qui représente l'électronégativité du plasma.

Pour  $\alpha \gg 1$  le plasma est fortement électronégatif [8].

Il en résulte que la neutralité du plasma n'existe qu'à une échelle d'observation supérieure à  $\lambda_D$ . Cette notion est importante pour concevoir un réacteur plasma: la dimension L de l'enceinte doit être nettement supérieure à  $\lambda_D$  pour assurer la quasi neutralité du plasma.

## I.6 Gaine électrostatique:

La gaine électrostatique est une région aussi appelée « zone de charge d'espace » dont la taille est de l'ordre de quelques longueurs de Debye  $\lambda_D$  [8,9]. Dans cette zone, il existe un champ électrique très intense généré par différence de potentiel entre plasma et a paroi, qui va accélérer les électrons présent dans le plasma, entretenant ainsi l'excitation et l'ionisation du gaz dans une zone intermédiaire appelée pré gaine « zone d'ionisation ». De la même manière, les ions créés dans la pré gaine vont être accélérés du plasma vers les parois du réacteur par ce champ électrique.

# Chapitre I : Généralités sur les plasmas

Dès l'amorçage du plasma, les parois du réacteur vont être soumises aux flux thermiques  $\Gamma$  des différentes espèces (ions, électrons, neutres) présentes [9]:

$$\Gamma_k = \frac{1}{4} n_k \sqrt{\frac{8 k_B T_k}{\pi m_k}} \quad (\text{I-5})$$

La gaine de charge d'espace entourant le plasma est nécessairement positive (gaine ionique) pour pouvoir maintenir l'électro neutralité du plasma malgré la différence de mobilité des électrons (légers et rapides) et celles des ions positifs (lourds et lents). Le potentiel plasma  $V_P$  est positif par rapport aux parois ce qui tend à freiner l'évacuation des électrons et à accélérer celle des ions positifs. La valeur du  $V_P$  s'ajuste de telle sorte que les flux électronique et ionique perdus sur les parois soient égaux en moyenne dans le temps [10].

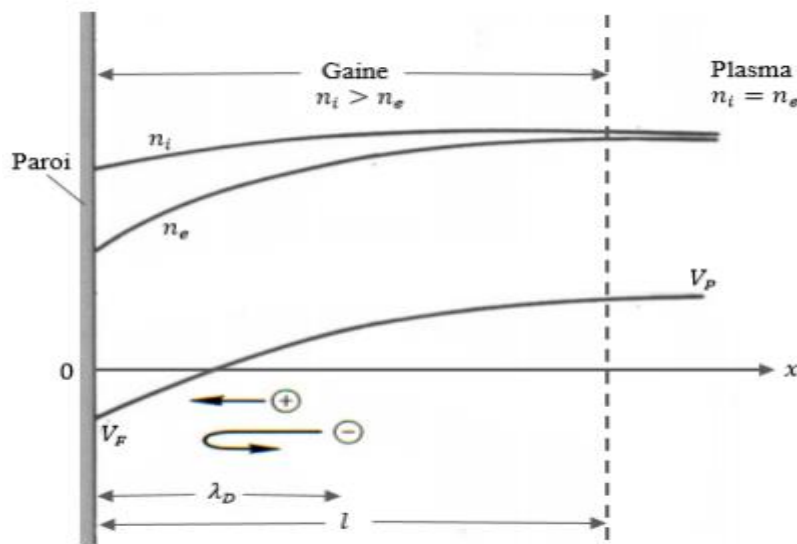


Figure I.4: schéma de la gaine électrostatique où on constate une différence de potentiel entre le plasma et la paroi. Ainsi : les espaces positives représentées par (+) sont attirées vers la paroi tant que les espaces négatives (-) sont repoussées.

La figure I.4 montre la distribution spatiale du potentiel électrostatique et de la densité de charge. Il montre l'existence de deux zones différentes: la gaine près de la paroi et le milieu plasma éloigné de la paroi. Dans la gaine, les densités d'électrons  $n_e$  et d'ions  $n_i$  sont différentes, ce qui signifie que la neutralité électrique n'est pas prise en compte. Nous observons que  $n_i > n_e$ , donc la gaine doit être positive (gaine ionique).

Concernant l'évolution du potentiel, il augmente d'une valeur négative sur la paroi qui est au potentiel flottant  $V_f$ , à la valeur positive correspondante au potentiel plasma  $V_P$ . L'épaisseur de la gaine  $l$  est de l'ordre de quelques longueurs de Debye  $\lambda_D$ , qui est donnée par la relation suivante [7]:

# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

---

$$l = \lambda_D \left[ \frac{e(V_P - V_f)}{k_B T_e} \right]^{\frac{3}{4}} \quad (\text{I-6})$$

La gaine est très importante dans les traitements par plasma puisque ses propriétés déterminent comment les particules du plasma interagissent avec la surface à traiter. En particulier, l'énergie et la direction des ions qui frappent la surface du substrat sont déterminées par leur passage à travers la gaine. Une différence de potentiel de l'ordre de dix à des centaines de Volts peut apparaître dans une gaine, ce qui donne aux ions des énergies cinétiques de l'ordre de dizaines à des centaines d'électron volts. Ces ions énergétiques bombardent la surface et effectuent de la pulvérisation et de l'activation chimique de surfaces en contact avec le plasma [10].

## I.7 Types de plasma:

Il existe deux types essentiels de plasmas, les plasmas « froids » et les plasmas « Chauds » .

### I.7.1 Plasma froid:

Un plasma froid est un plasma faiblement ionisée, où l'équilibre thermodynamique n'est pas atteint du fait que la température électronique est beaucoup plus grand que celle des ions et des neutres :

$$T_e \gg T_N \text{ Et } T_e > T_i > T_n$$

Les types de plasmas les plus utilisés induits électriquement sont la décharge en courant continu, créée par l'application d'un potentiel DC [11], la décharge radiofréquence RF qui utilise un champ électrique de fréquence radio  $\sim 13.56$  MHz [11] et la décharge micro-onde avec une fréquence de 2.45 GHz.

### I.7.2 Plasma chaud:

Le plasma chaud est un plasma fortement ionisé, où la température électronique avoisine celle des ions et des neutres. Les espèces présentes sont alors en équilibre thermique, telles que :

$$T_e \sim T_i \sim T_n$$

Les plasmas utilisés dans les réacteurs à fusion sont du type thermique. L'un des inconvénients des plasmas thermiques est leur caractère destructif par leur température élevée au contact des matériaux [12].

# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

## I.8 Sources Plasmas:

Il existe plusieurs types de sources plasmas souvent dénommées par leur abréviation anglo-saxonne (RF, ECR). Dans ce manuscrit, on se limite aux deux principales, utilisées fréquence par la communauté plasma, à savoir, les sources RF (radio fréquence) et ECR:

### I.8.1 La source RF:

Le plasma Radiofréquence (RF) est produit dans un réacteur fonctionnant avec une antenne RF à 13,56 MHz. Ce type de source offre de très bonnes performances et reste le plus largement utilisé dans de nombreux laboratoires de recherche [12].

Le domaine radiofréquence est intéressant car il se situe entre les deux fréquences propres du plasma (fréquences plasma ionique et électronique), de sorte que les électrons du plasma suivent les variations instantanées du champ électrique, alors que les ions ne suivent que le champ électrique moyen [6].

On distingue les réacteurs à couplage capacitif de ceux à couplage inductif. Il en existe même des réacteurs qui combinent entre les deux réacteurs du type hélicon [8].

Une représentation schématique simple de la configuration de ces types de réacteur est donnée en figure I .4, figure I. 5:

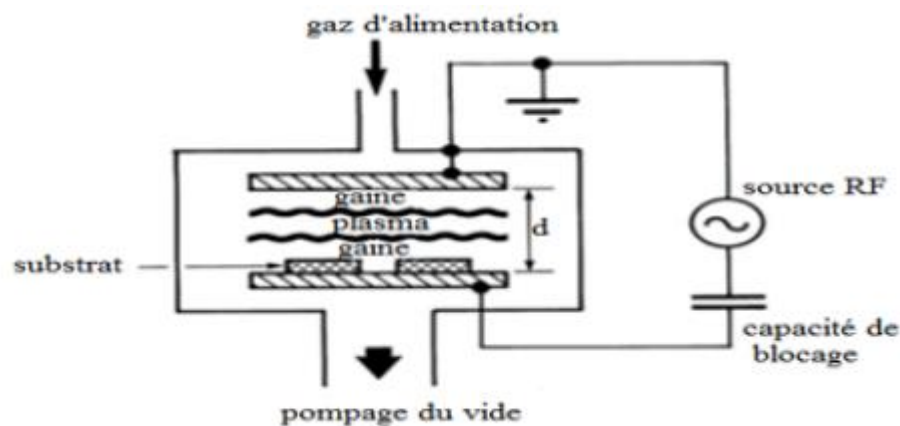


Figure I.4 – Schéma de principe d'une source RF à couplage capacitif avec des électrodes planes et parallèles [12].

# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

La configuration typique consiste en 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 (généralement  $f = 13,56\text{MHz}$ ), alors que l'autre est reliée à la masse électrique. Un condensateur de blocage sépare l'alimentation RF de l'électrode [8].

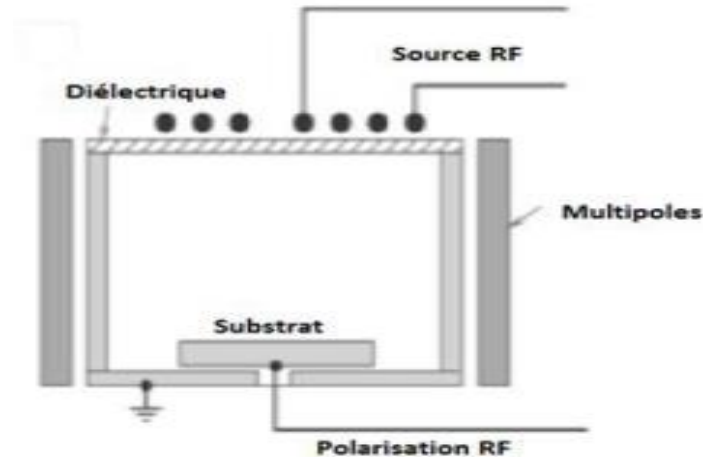


Figure I.5 – Schéma de principe d'une source RF à couplage inductif en géométrie planaire[8].

Dans ce type de configuration à couplage électrique indirect, les gaines de champ électrique sont fines et l'énergie des ions est peu élevée. La seconde électrode (électrode conductrice) peut être alimentée indépendamment de la première en autorisant le contrôle de l'énergie du bombardement ionique [9].

## I.8.1.1 Réacteur Hélicon :

Ce type de réacteurs permet de créer des plasmas à haute densité ( $n > 10^{12}\text{cm}^{-3}$ ) et à basse pression. Ce type de réacteur est utilisé par plusieurs équipes de recherche parmi lesquelles celle du Laboratoire de Physique des Plasmas de l'Ecole Polytechnique (LPP) du plateau de Saclay (Palaiseau) ou encore le réacteur PHISIS, acronyme signifiant **P**lasma **H**élicon to **I**rradiate **S**urfaces **I**n **S**itu [8], conçu et développé par l'équipe plasma-surface du laboratoire de la physique des interactions ioniques et moléculaire (PIIM) de l'université d'Aix-Marseille. Ce type de réacteur se compose généralement de deux parties, les chambres source et de diffusion, entourées de deux couples de bobines figure I.6 [9].

# Chapitre I : Généralités sur les plasmas

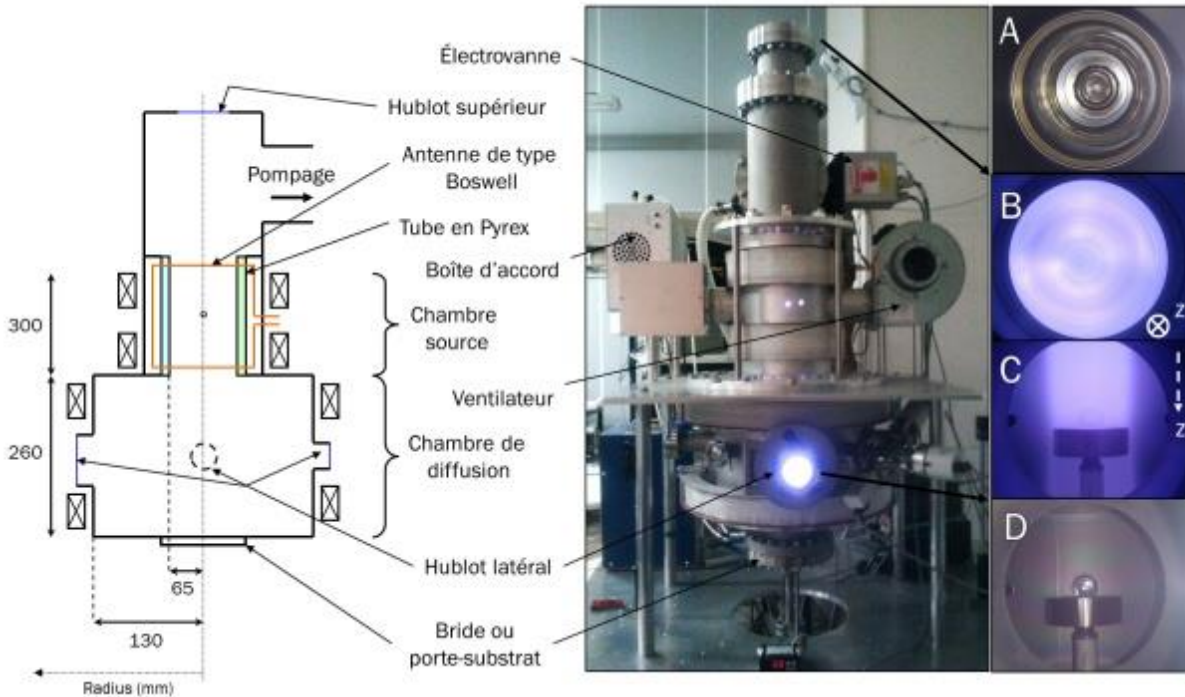


Figure I.6 – Schéma et photographie du réacteur hélicon [9]

La chambre source, lieu de création du plasma, est composée d'un tube en *pyrex*<sup>TM</sup> de 75 mm de rayon (dont 9 mm d'épaisseur) et de 300 mm de hauteur. Cet isolant électrique est un verre borosilicate qui a l'avantage d'être résistant aux forts flux d'ions énergétiques et de présenter un faible coefficient de dilatation thermique. Nous verrons en effet que, dans les conditions où les traitements par plasma sont effectués, la température du gaz peut atteindre des valeurs supérieures à 500°C [12]. De plus, dans un tel environnement, la silice s'est révélée être très résistante à l'irradiation ionique.

Le plasma créé dans la chambre source diffuse suivant les lignes de champ magnétique statique jusqu'à la chambre de diffusion. Cette dernière, région de traitement des substrats, est un cylindre creux d'acier inoxydable de 320 mm de diamètre et 260 mm de hauteur. Il comprend 4 hublots de 50 mm de diamètre en quartz situés à mi-hauteur et permettant de sonder le plasma de diffusion à l'aide des diagnostics optiques [13].

# Chapitre I : Généralités sur les plasmas

## I.8.2 Plasma source ECR:

Les plasmas ECR reposent sur le principe de la résonance cyclotronique électronique (ECR) qui se produit en présence d'un champ magnétique statique et d'une onde électromagnétique. L'apparition de ce phénomène dépend de la pulsation  $\omega_0$  de l'onde et de l'intensité  $B$  du champ magnétique.

Quand les conditions de résonance sont réunies, il se crée une région dans l'espace du champ magnétique de l'aimant une région appelée « zone ECR » où les électrons sont piégés autour des lignes de champ. Cette condition de résonance est satisfaite à l'égalité entre la pulsation de l'onde excitatrice et la pulsation de précession de Larmor  $\omega_L$  [14]:

$$\omega_0 = \omega_L = \frac{eB}{m} \quad (I.7)$$

$\omega_L$  : Fréquence cyclotronique (Pulsation de Larmor).

$m$ : Masse de l'électron au repos.

$e$ : Charge.

$B$ : Intensité locale du champ magnétique appliqué.

La précession de Larmor dépend de la force de Lorentz  $\vec{F}$  qu'exerce l'aimant sur un électron se trouvant sur une ligne de champ. Cette force perpendiculaire au mouvement de l'électron oblige ce dernier à décrire un mouvement circulaire autour de la ligne de champ (figure I.7(a)). En présence d'une onde électromagnétique dont la fréquence est égale à la fréquence de Larmor, la composante du champ électrique de l'onde pousse l'électron à quitter sa position. La conjonction des deux forces (électrique et magnétique) dans la zone ECR confère à l'électron un mouvement hélicoïdal autour de la ligne de champ (figure I.7(b))



Figure I.7: Principe de la résonance cyclotronique électronique (ECR) [15]



# Chapitre I :Généralités sur les plasmas

---

L'intérêt d'un tel mode de norçage réside dans la possibilité d'obtenir des plasmas à très basse pression quelque mTorr, en s'affranchissant des problèmes liés aux pertes vers les parois [14]. En effet, la présence du confinement magnétique augmente les probabilités de collisions électrons-lourds et favorise l'allumage et le maintien du plasma, même à des pressions très réduites [15].

Parmi les réacteurs existants fonctionnant avec la technologie ECR, on retrouve le réacteur ROSAE-III, ont été obtenus les résultats présentés dans ce manuscrit (détailler dans chapitre III).

## I.9 Plasma d'Hydrogène:

Le plasma d'hydrogène est un plasma utilisant de l'hydrogéné comme gaz d'amorçage. Pour produire ce plasma, il faut apporter une énergie électrique au gaz d'hydrogène qui seront en partie ionisé, ce qui donne lieu à plusieurs types d'espacés : atomes H à des états excites différents, des ions positifs tel que  $H^+$  ,  $H_2^+$  ,  $H_3^+$  , ions négatifs  $H^-$  ,molécules ro-vibrationnellement excitées et électrons, pour ou citer que les principales.

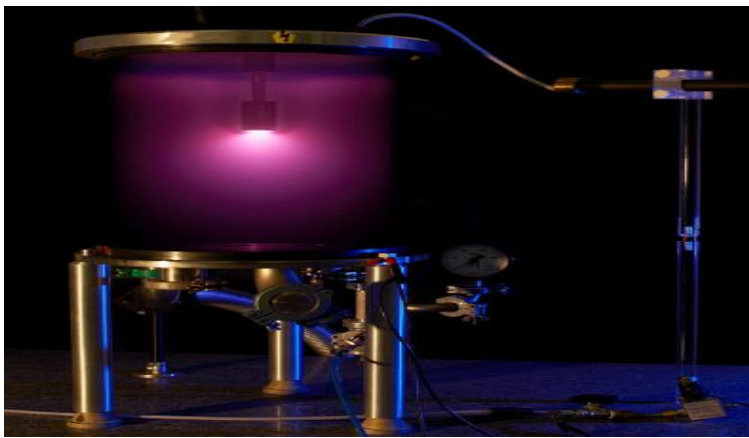


Figure I.9 : Image illustrant plasma d'hydrogène [14]

## I.10 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les paramètres fondamentaux d'un plasma, en les définissant un par un .Nous avons également passé en revue les différents types de plasma, en se focalisant sur le plasma ECR et RF. Une attention particulière à été prêtée au réacteur de type ECR, particulièrement le réacteur ROSAE-III, où une description détaillée à été donnée.



# Chapitre II

## Ions négatifs d'hydrogène

Ce chapitre nous allons d'abord présente les généralités sur les ions négatifs, en particulier l'ion  $H^-$ . La fusion thermonucléaire, les processus physiques fondamentaux de créations et de pertes des ions négatifs. Nous verrons ensuite comment ont été conçues les différentes sources d'ions négatifs à partir de ces différents processus.

# Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

## II.1 Introduction:

Un ion est un atome ou une molécule dans lequel le nombre d'électrons n'est pas égal à celui des protons. Contrairement aux atomes et molécules neutres, un ion représente une charge totale non nulle. L'ion négatif d'hydrogène  $H^-$ , n'est d'autre qu'un atome d'hydrogène H ionisé. Ce type d'ions a un large domaine d'application, parmi lesquels la fusion thermonucléaire contrôlée.

## II.2 Fusion thermonucléaire:

Une réaction nucléaire est à l'étude depuis les années d'après-guerre. La réaction inverse à la fission, la fusion nucléaire. De nombreux groupes de recherche travaillent sur ce sujet notamment à travers le projet international ITER (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor). Ce projet consiste à réaliser un réacteur de type *tokamak*<sup>1</sup> permettant de démontrer la faisabilité de la fusion thermonucléaire par confinement magnétique [17].

Cette réaction impose un apport énergétique important pour être initiée. Deux isotopes de l'hydrogène, le tritium et le deutérium, sous l'influence d'une contrainte extrême, vont fusionner pour former un atome d'hélium. Cette réaction s'accompagne d'un dégagement énergétique 5 fois plus important qu'une réaction de fission. La Figure II-1 représente cette réaction.

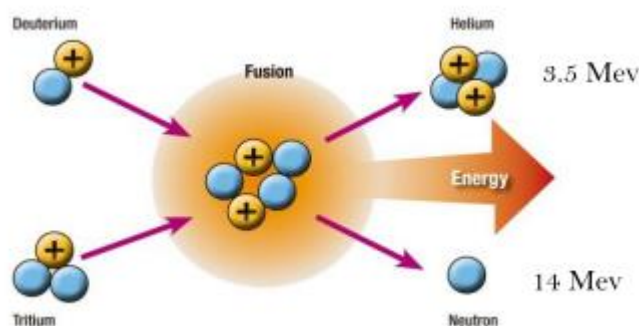


Figure II.1 Réaction de fusion nucléaire : un noyau de deutérium et un noyau de tritium fusionnent en un noyau d'hélium [17].

<sup>1</sup> Tokamak : Ce terme vient du russe « **T**Oroïdalnaïa **K**Amera **M**Agnethnymi **K**atushkami ».

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

L'objectif d'ITER est d'obtenir un facteur 10 entre l'énergie fournie pour lancer la réaction et l'énergie produite par cette réaction, soit un apport de 15MJ fournirait donc 150MJ. La fusion thermonucléaire ne crée pas de déchet radioactif non traitable. Le principe même de la réaction nécessite un apport continu en précurseurs (le tritium et le deutérium) pour que la réaction ait lieu évitant tout risque d'emballement lors de la réaction. Pour le moment ce projet se poursuit et devrait donner ses premiers résultats dans une dizaine d'années.

### II.2.1 Injection de neutres(IDN):

Pour pouvoir réaliser et maintenir des réactions de fusions au cœur du réacteur nucléaire (Tokamak), il faudrait le chauffer constamment. Il existe plusieurs techniques de chauffage, permis lequel le chauffage par injection de neutres IDN (en anglais NBI : **N**eutral **B**eam **I**njection ), qui est l'une des techniques les plus prometteuses, Elle consiste en la création d'ions négatifs d'hydrogène dans une source externe à plasma froid, les extraire, es accélérer (à 1Mev pour ITER ), les neutraliser avant de les injecter dans le réacteur à fusion. Les collisions redistribuent l'énergie, et le plasma de fusion sera ainsi chauffé.

Il est ainsi indispensable de comprendre les mécanismes de création des ions négatifs d'hydrogène d'intérêt pour la fusion thermonucléaire contrôlée.

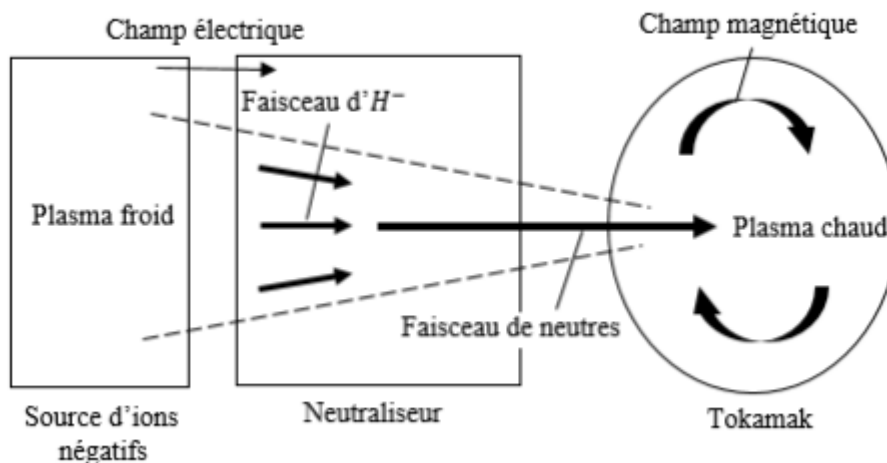


Figure II.2 : Schéma d'une ligne d'injection de neutres: les ions négatifs extraits de la source sont accélérés par un champ électrique intense.

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

---

### II.3 L'ion négatif d'hydrogène :

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers. L'existence de son ion négatif en tant que système lié a été démontrée théoriquement pour la première fois par Bethe en 1929 [18]. L'étude de l'ion  $H^-$  représente un cas très particulier et assez important pour l'étude des ions négatifs atomiques. Nous allons présenter les processus fondamentaux concernant les ions négatifs tels que les mécanismes de production et de perte de ces ions, puis nous verrons ensuite comment ont été élaborés les différentes sources d'ions négatifs à partir de ces processus.

### II.4 Mécanismes de production des faisceaux d'ions négatifs:

Les ions négatifs d'hydrogène peuvent être créés en surface et/ou volume. Nous détaillons en ce qui suit, les principaux mécanismes pour chaque mode de production:

#### II.4.1 La production en surface:

En 1972, Y. Belchenko utilise ce mode de production et réussit à former des ions négatifs sur une surface métallique en envoyant un flux d'atomes ou d'ions positifs sur ce métal [19].

Les ions positifs peuvent être neutralisés au voisinage de la surface à travers un processus de neutralisation résonnante dans un état excité, suivi d'une désexcitation Auger vers l'état fondamental [20]. Les atomes arrivant sur le métal peuvent ainsi être implantés dans la surface ou réfléchis dans une autre direction. Le flux incident peut également libérer par "sputtering"<sup>2</sup> l'hydrogène absorbé par le métal. Une fraction des atomes quittant la surface pourra être chargée négativement grâce à un échange de charge résonnant avec le métal. Ce processus d'ionisation est illustré figure II. 3, où l'on montre le diagramme d'énergie du métal ainsi que celui d'un atome d'hydrogène statique devant celui-ci [17]:

---

<sup>2</sup> Sputtering : est un phénomène dans lequel des particules sont arrachées à une cathode dans une atmosphère raréfiée

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

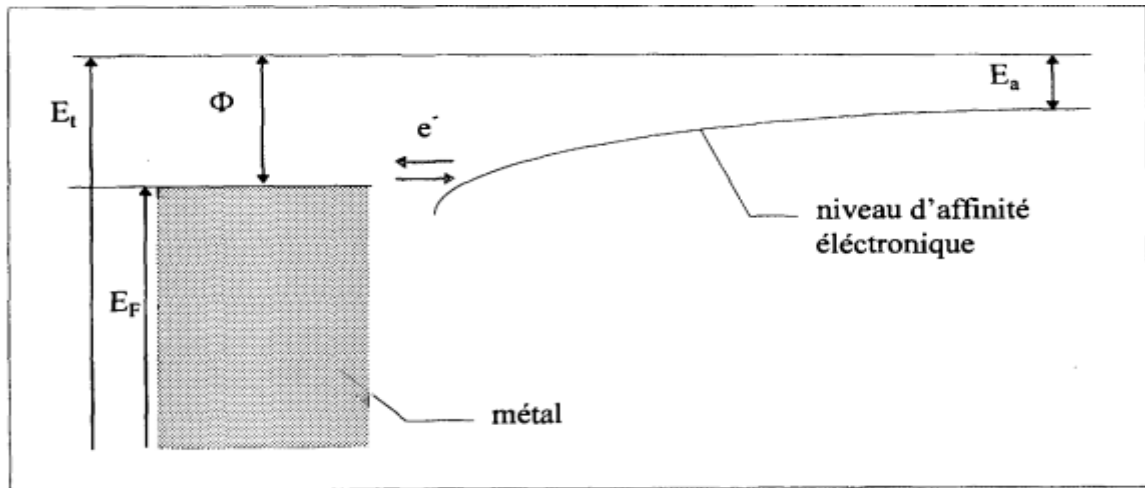


Figure II.3: Modification du niveau d'affinité électronique d'un ion  $H^-$  devant un métal [21]

Pour former un ion négatif  $H^-$ , un électron va devoir passer des bandes de conduction du métal à un niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène  $E_a = 0.75$  eV [17]. Afin de comprendre ce mécanisme, examinons d'abord la physique des électrons du métal. Ils sont régis par la statistique de Fermi-Dirac et peuplent les niveaux d'énergie du métal jusqu'à une valeur limite  $E = E_F$  appelée niveau de Fermi. Quand un électron quitte le métal, il apparaît une charge positive image qui exerce une force de rappel. Il existe donc une barrière de potentiel  $E_t$  que doit franchir l'électron pour quitter l'intérieur du métal. Par conséquent, il faut fournir une énergie minimale  $\varphi = E_t - E_F$  pour extraire un électron du métal vers l'infini. Cette grandeur  $\varphi$ , appelée travail de sortie, varie typiquement autour 4-5 eV selon les métaux [22].

Ainsi, l'électron doit traverser la barrière de potentiel  $\varphi - E_a$ . Il faut donc réduire cette valeur le plus possible afin d'avoir une chance de produire des ions négatifs. Une méthode consiste à faire absorber par le métal des atomes alcalins tels que le baryum ou le césium [22].

Une redistribution de la densité d'électrons à la surface provoque ainsi une baisse du travail de sortie. De plus, l'interaction attractive entre l'ion négatif et sa charge positive image dans le métal provoque un déplacement du niveau d'affinité vers le niveau de Fermi. Le niveau d'affinité peut même descendre en dessous du niveau de Fermi pour de très faibles distances atome-métal. L'interaction entre les différents niveaux d'énergie entraîne un élargissement du niveau d'affinité et permet ainsi le passage d'un électron du métal à l'atome d'hydrogène pour former un ion  $H^-$ . On dit aussi qu'il y a échange de charge résonnant. L'électron va osciller entre le métal et l'atome jusqu'à ce que l'atome soit suffisamment loin pour qu'il n'existe plus aucune interaction avec le métal. Il existe donc une certaine probabilité pour qu'un ion  $H^-$  stable soit formé dans cette opération [23].

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

---

Le problème dans l'utilisation du césium est que ce dernier peut s'échapper de la source et contaminer la ligne de chauffage, ce qui peut constituer une charge financière très importante pour sa décontamination. Sans citer le risque d'explosion que peut provoquer le césium, d'où l'importance de trouver une alternative à celui-ci, et utiliser des sources sans césium.

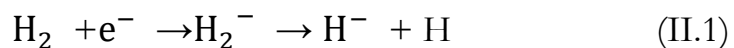
Ce qui fait que, depuis les années 80, des recherches ont été menées sur la substitution du césium par le **graphite pyrolytique hautement orienté (HOPG)** (ou le baryum, le carbone (C) et le diamant dopé au bore (BDD)).

### II.4.2 La production en volume:

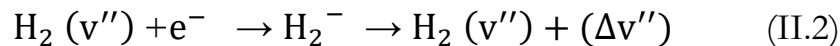
Le principal mécanisme de production des ions négatifs d'hydrogène en volume est l'attachement dissociatif (AD) [24]:

Les travaux théoriques sur l'AD (l'attachement dissociatif) ont commencé dans les années 1960. La théorie de résonance de l'AD, impliquant le concept d'un état intermédiaire d'ion négatif de résonance, a été formulée dans les articles fondamentaux de Bardsley et O'Malley [25]. La théorie de l'attachement dissociatif des électrons aux molécules d'hydrogène repose sur le modèle de la résonance ou de l'ion négatif temporaire. Ces termes désignent un état composé formé par l'interaction d'un électron incident avec une molécule cible, dans lequel l'électron incident est temporairement capturé dans le voisinage de la molécule.

La désintégration de cet état composé peut conduire à l'AD avec formation d'un ion négatif  $H^-$  et d'un atome neutre H:



Ou à l'excitation vibratoire de la molécule (désignée par excitation e-V):



Les travaux théoriques et expérimentaux ont montré que les sections efficaces de l'AD aux molécules de  $H_2$  excitées par les vibrations devaient augmenter de quatre ordres de grandeur de  $v'' = 0$  à  $v'' = 4$  [25].

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

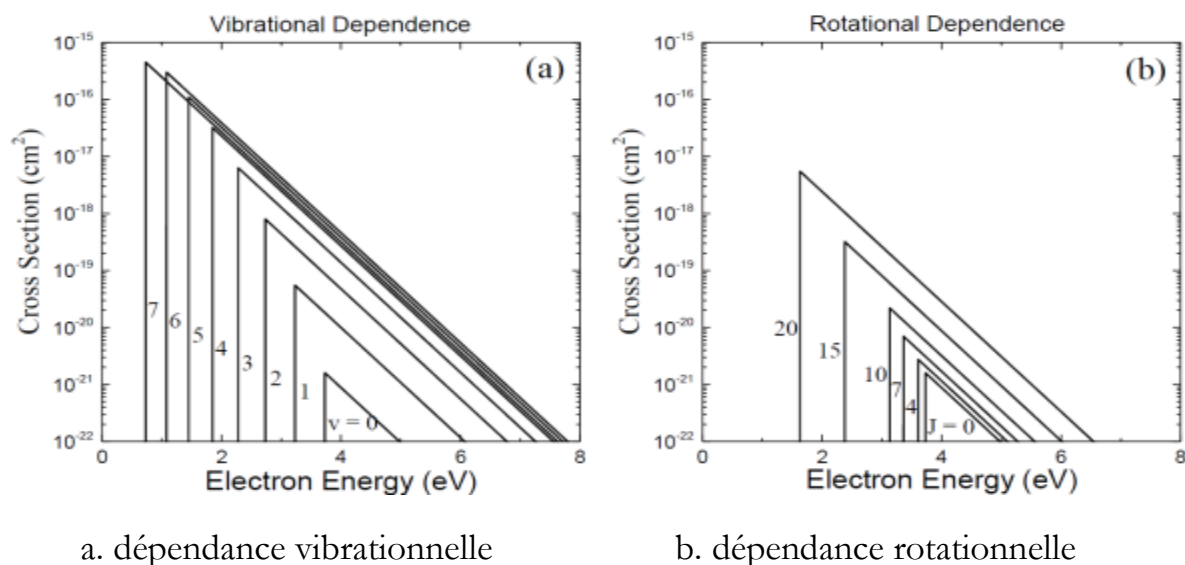


Figure II.4 État de la section efficace d'attachement dissociatif AD. Les valeurs de seuils énergétiques et les sommets de la section efficace sont issues [26].

Figure II.4 montre la comparaison directe de la dépendance de l'énergie de seuil par rapport à l'état interne pour les sections transversales d'attachement dissociatif dans  $H_2$  et  $D_2$ , déterminées dans le cadre de l'analyse de l'état interne.

Dissociatives dans  $H_2$  et  $D_2$  déterminées dans l'expérience de Allan et Wong avec les résultats du calcul théorique de Wadehra et Bardsley [25]. Cette figure montre que l'augmentation de la section efficace par excitation vibrationnelle est beaucoup plus importante que celle de l'excitation rotationnelle pour la même interne.

Par conséquent, pour mieux comprendre le fonctionnement de l'AD, il faudrait d'abord mettre en avant les processus de création des molécules ro-vibrationnellement excitées :

### II.4.2.1 Les processus E-V:

Dans ce type de réaction, ils se produisent en présence d'électrons dits "chauds", un électron énergétique excite la molécule d'hydrogène en la faisant passer de son état fondamental vers un état singulet (spin nul) électronique supérieur. Puis, par désexcitation radiative, cette molécule revient vers son état fondamental électronique dans un niveau vibrationnel plus grand que celui qu'elle avait au départ [17].

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

---

### II.4.2.2 Les processus e-V:

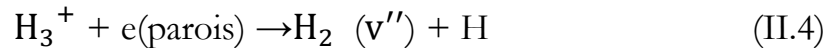
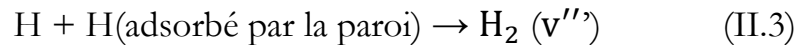
Cette réaction permet d'obtenir des molécules ro-vibrationnellement excitées par l'interaction d'un électron froid ( $\sim$  eV) avec une molécule d'hydrogène en l'excitant vers des niveaux vibrationnels supérieurs [17].

### II.4.2.3 Les processus V-V:

Le processus (V-V) (vibration-vibration) est transmis par vibration. En d'autres termes, une molécule avec une excitation ro-vibrationnelle plus faible transfère de l'énergie à une autre molécule avec une excitation plus élevée. Ce procédé est plus avantageux que la réaction inverse car il est exothermique [22].

### II.4.2.4 Les processus de désorption recombinative:

D'autres processus qui peuvent provoquer l'excitation des molécules d'hydrogène sont les interactions de différentes particules avec les parois.



Pour résumer la théorie présentée jusqu'à présent, la production des ions négatifs exige des molécules excitées à des niveaux ro-vibrationnels élevés et des électrons à basse température. Si on étudie la vitesse de réaction, pour chaque niveau vibrationnel, en fonction de la température des électrons, on observe l'existence de deux tendances différentes. Pour des niveaux vibrationnels élevés ( $\mathbf{v}'' \geq 9$ ), la vitesse de réaction diminue de façon continue, alors que pour les niveaux inférieurs ( $\mathbf{v}'' < 6$ ), elle augmente pour enfin se saturer à partir d'une température égale à 1 eV. Ce qui suggère que pour une meilleure efficacité, et un taux de réaction élevé, la température électronique devrait avoisiner 1eV, avec des niveaux ro-vibrationnels ( $\mathbf{v}'' \geq 5$ ) [17].

La Fig. II.5 présente en (a) les variations des taux de réaction de l'AD en fonction de la température électronique et en (b), en supposant des vibrations en distribution maxwellienne, elle indique les coefficients du taux de réaction de l'AD pour différentes températures vibratoires.



## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

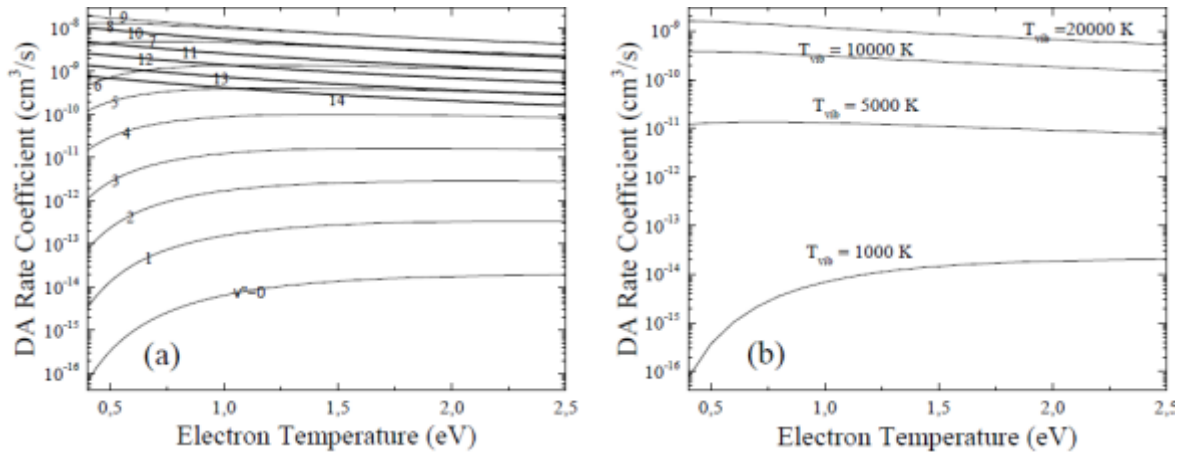


Figure II.5. Variations du taux de réaction de l'AD en fonction de la température électronique, pour différents états vibrationnels en a), et en fonction de la température électronique, pour différentes  $T_{\text{vib}}$  en b) [17].

### II.5 Les différents types de sources d'ions $\text{H}^-$ :

#### II.5.1 Les sources en surface:

##### II.5.1.1 Les sources magnétrons:

Le magnétron a été la première source d'ions où le courant  $\text{H}^-$  a été augmenté de manière significative par l'ajout de vapeur de césium. Ces travaux ont été réalisés par Gennadii Dimov[21]. La source magnétron présente une décharge en forme de piste délimitée à l'intérieur par la cathode et à l'extérieur par l'anode, comme le montre la figure II.6. L'anode et la cathode ne sont séparées que d'environ 1 mm, de sorte que la décharge a la forme d'un ruban enroulé autour de la cathode [22].

Les ions  $\text{H}^-$  sont produits sur la surface de la cathode et sont accélérés par le potentiel de la gaine de la cathode. Une région concave sur la surface de la cathode opposée au trou d'extraction peut donner un foyer initial au faisceau  $\text{H}^-$  extrait. Certains des ions  $\text{H}^-$  accélérés par la gaine de la cathode accélérés par la gaine cathodique subissent un échange de charge résonant avec des ions H thermique lent sur le chemin de l'extraction, ce qui entraîne une distribution de l'énergie du faisceau avec deux pics.

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

Le magnétron peut fournir des courants  $H^-$  élevés, jusqu'à 80 mA, et avoir des durées de vie très longues, supérieures à 6 mois, mais il ne fonctionnera qu'à des facteurs d'utilisation très faibles, jusqu'à 0,5 %. Ceci parce qu'il n'est pas possible de maintenir une couverture optimale de césium sur les surfaces de la cathode pendant la durée de la décharge .

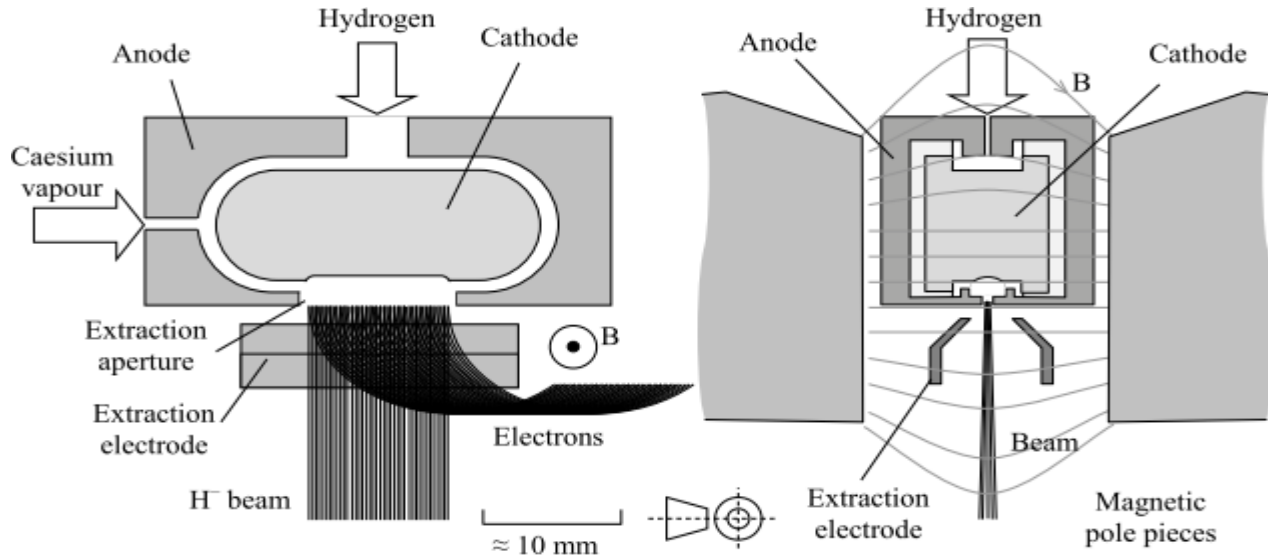


Figure II.6: Sectional schematic of a magnetron with slit extraction [22]

### II.5.1.2 Les sources Penning:

Comme dans le cas du magnétron, les ions  $H^-$  sont produits sur les surfaces de la cathode et accélérés par le potentiel de la gaine du plasma qui existe à côté de la cathode.

Le Penning est la source d'ions  $H^-$  avec des densités de courant d'extraction supérieures à  $1A\text{ cm}^{-2}$  possible. La durée de vie de la source Penning est limitée à quelques semaines à cause de la pulvérisation de la cathode par les ions césium. Ce type de source ne peut pas fonctionner sans vapeur de césium et nécessite que la surface des électrodes soit comprise entre 400 et 200 °C.

Cette source est actuellement en cours de développement au laboratoire Rutherford à Oxford par le présent auteur et son équipe, des impulsions de 35 mA, 1 ms, 50 Hz [22].

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

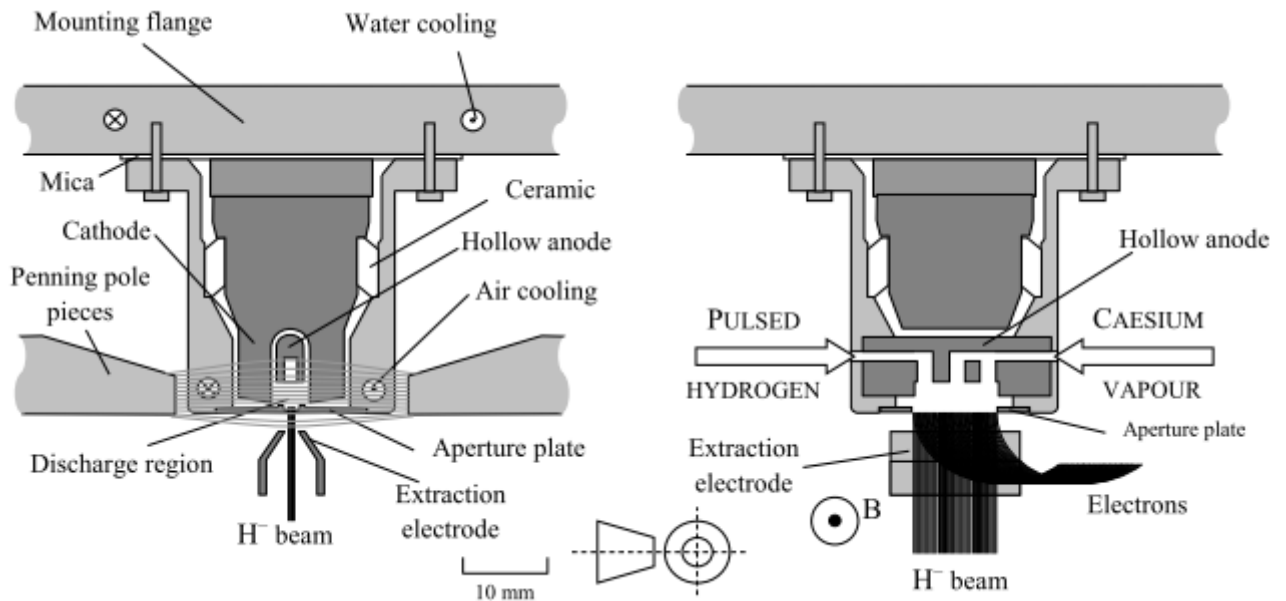


Figure. II.7: Sectional schematic of a Penning ion H<sup>-</sup> source [22]

Ces sources présentent deux inconvénients majeurs. Le premier vient de la forte énergie des ions négatifs dans le plasma ( $>100\text{eV}$ ). Cela engendre une grande énergie transverse à l'extraction et donc une mauvaise optique. Des divergences autour de 40 mrad ont été mesurées avec ce type de sources [22]. Le second inconvénient est dû à l'utilisation du césium qui pourrait s'introduire dans le tokamak et polluer ses parois. Ces problèmes ont amené la communauté scientifique à s'intéresser de plus près à la production en volume.

### II.5.2 Les sources en volume:

La démonstration du processus d'attachement dissociatif sur des molécules excitées a permis d'optimiser les sources pour une production en volume. Cependant, ce phénomène d'attachement dissociatif dépend de la température des électrons. Il nécessite à la fois des électrons de faible température des électrons.

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

### II.5.2.1 Source à filaments:

Ces sources utilisent des filaments chauffés pour émettre des électrons. Ces électrons sont accélérés par application d'une différence de potentiel entre le filament et le réacteur ( $\sim 50$  eV et 70W) [27].

Andrew Holmes et son équipe à Culham ont découvert que le courant maximal pouvant être extrait de ce type de source est d'environ 40 mA [28]; il est limité par la densité  $H^-$  maximale pouvant être obtenue dans la région d'extraction. Le courant  $H^-$  n'augmente pas au-delà d'un courant de décharge d'environ 200 A car les processus de destruction de  $H^-$  commencent à dominer [27].

Si l'on ajoute du césium à ce type de source, le courant  $H^-$  peut être doublé et atteindre 80 mA. Le césium n'augmente pas le volume de production de  $H^-$  au contraire, il facilite la production en surface, ce qui fait de cette source une source combinée de volume et de surface. De nombreuses études ont été réalisées sur ces sources, l'université de Francfort a créé une source avec trois filaments cathodiques et a utilisé du césium pour produire des courants  $H^-$  pulsés de 120 mA [27]. Cependant, l'émission et la persistance de ce faisceau n'ont jamais été mesurées et il est peu probable qu'un courant proche de celui-là puisse être transporté vers l'étape suivante d'un accélérateur opérationnel. La durée de vie de la source de l'université de Francfort limitée à 500 heures [28]

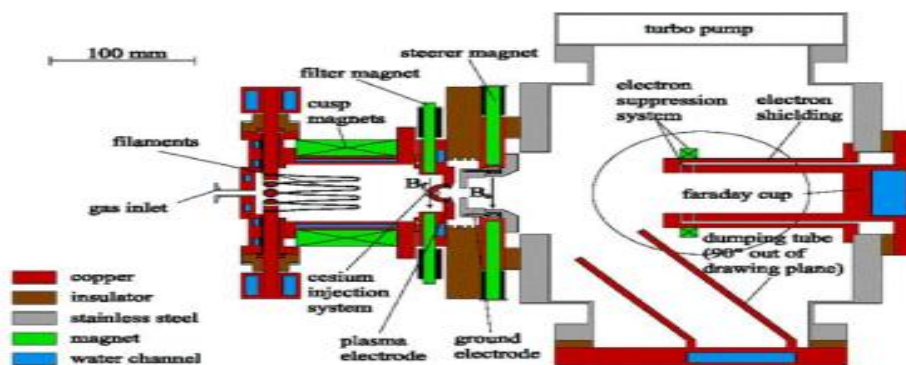


Figure II.8 Seconde Source à filaments, se trouvant à Francfort, est capable de produire des courants de 120 mA, d'une durée de 1,2 ms (répétition de 50 Hz) avec une extraction de 35 kV [27].

Leung et Bacal ont réalisé une source où le plasma était séparé en deux régions par un filtre magnétique [29]:

La zone où le plasma est produit par des filaments chauffés, La température des électrons ( $T_e$ ) dépend de la tension de polarisation entre les filaments et la chambre contenant le plasma (entre 50 et 70eV).

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

La zone d'extraction, qui contient un plasma froid,  $T_e$  proche de 1 eV, ce qui est favorable à la production d'ions négatifs par AD [17].

### I.5.2.2 Les sources RF:

Au début des années 1990, Ka-Ngo Leung et son équipe du Lawrence Berkeley Laboratory ont été les premiers à développer ce type de source avec une antenne de deux tours et demi à l'intérieur de la chambre à plasma. L'antenne était constituée d'un tube de cuivre de 4,7 mm de diamètre et revêtu de porcelaine (détailler chapitre 1) [12].

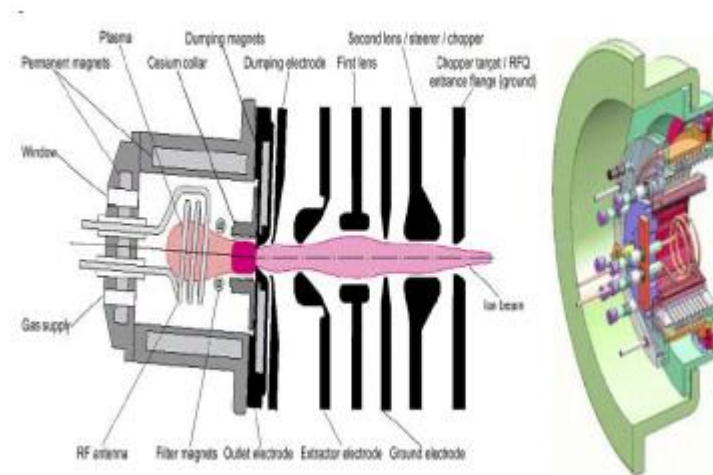


Figure II.9: Source RF du Laboratoire National Lawrence de Berkeley [17].

### II.5.2.3 La source ECR:

Les sources d'ions à résonance électronique cyclotronique (electron cyclotron resonance ion source, ECR ion source) sont des sources principalement utilisées pour la production d'ions en grande quantité.

L'avantage de ce type de source est que la production d'ions négatifs se fait principalement en volume par attachement dissociatif (AD), donc, pas besoin de césium. Le principe de fonctionnement de ces sources ECR est détaillé dans le chapitre I. A titre d'exemple, nous présentons à la Fig. II.10, un schéma d'une source d'ions  $H^-$  ECR développée au CEA Saclay [30].

## Chapitre II : Ions négatifs d'hydrogène

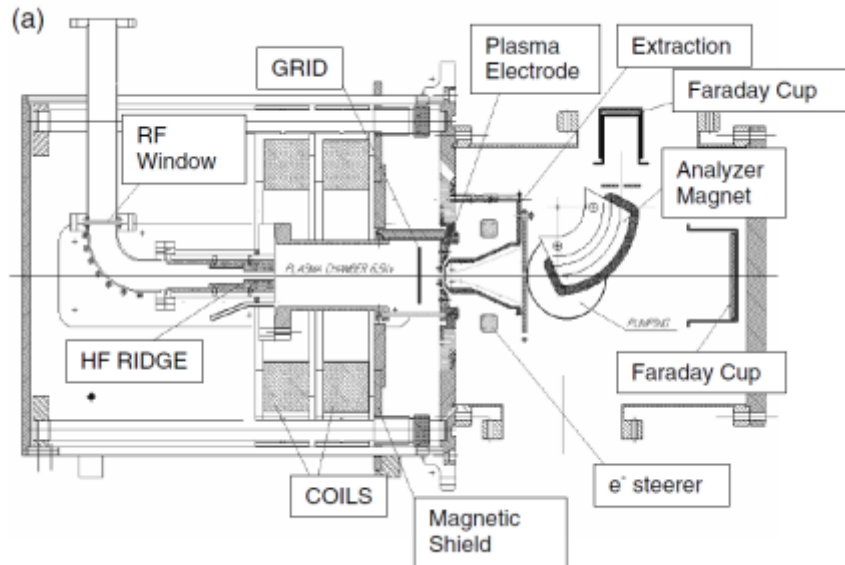


Figure II.10 Vue générale sur une source d'ions  $H^-$  ECR à Saclay [30].

### II.6 Conclusion:

Les ions négatifs d'hydrogène d'intérêt pour la fusion thermonucléaire contrôlée sont créés en volume et/ou surface. Nous avons passé en revue tous les mécanismes rentrants dans leurs créations dans ce chapitre. Nous avons mis particulièrement en accent le mécanisme de l'attachement dissociatif, qui dépend fortement de la désorption recombinative, qui le processus principal de notre étude. Nous avons achevé ce chapitre par des exemples sur les différentes sources d'ions négatifs existantes.

## **Chapitre III**

### **Dispositif expérimental**

Ce chapitre sera consacré à la présentation et la description détaillée du réacteur ROSAE-III développé au sein du laboratoire LPSC avec lequel la majorité des résultats ont été obtenus. Nous présenterons également les différents moyens de diagnostics entourant ROSAE-III à savoir : sonde de Langmuir, photo-détachement laser, émission optique dans le visible.

# Chapitre III :Dispositif expérimental

---

## III.1 Introduction:

Le dispositif expérimental nommé ROSAE-III (ecR hydrOgen plaSma for neutrAl bEam) est doté de moyen de diagnostics du plasma électriques (sondes de Langmuir), optiques (spectroscopie optique d'émission dans le visible) et photo-détachement laser permettant de déterminer paramètres fondamentaux du plasma définis dans le chapitre I, à savoir la température électronique, la densité électronique, la densité ionique, le potentiel flottant et le potentiel plasma, mais aussi d'autres paramètres tel que:la densité absolue des ions négatifs  $H^-$  et la densité relative des atomes H.une description détaillée de toutes ces technique et moyens de diagnostic sera présentée par la suite.

## III.2 REACTEUR ROSAE-III :

Réacteur ROSAE-III (ecR hydrOgen plaSma for neutrAl bEam) a été conçu par le centre de recherche plasma-matériaux-nanostructure (CRPMN) du laboratoire LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique & Cosmologie) de l'université de Grenoble.

Un schéma détaille du réacteur ROSAE-III est présenté en la figure III. 1. Il est composé d'une enceinte cylindrique en acier inoxydable de diamètre 152 mm et de hauteur 214 mm,le système de pompage primaire permet d'atteindre un vide dans l'enceinte de l'ordre de  $10^{-3}$  *mTorr*, un pompage secondaire par les pampes turbes permet d'atteindre un vide avoisinant  $10^{-6}$  *mTorr*.Les quatre sources dipolaires sont chacune équipées d'un adaptateur d'impédance, ce qui permet de réduire au minimum la puissance réfléchi, situées à l'extrémité de l'enceinte ,les sources sont refroidies par l'eau. Le gaz  $H_2$  est injecté dans l'enceinte à travers un débitmètre massique (Mass Flow ®) qui permet de contrôler son débit.La position A correspond à un emplacement proche de la région de couplage ECR, c'est-à-dire 9 mm en aval du bord le plus bas de l'aimant, 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 en raison de la diffusion et où les ions se forment. Au cours de cette étude, le plasma produit dans ROSAE-III pourrait faire face à deux surfaces différentes: l'acier inoxydable (Inox L304), ou verre borosilicate (Pyrex)[5]. En effet, la particularité de ROSAE-III, c'est qu'il peut héberger dans sa surface interne un cylindre en pyrex, de cette manière, le plasma pourrait faire face à une surface ayant un coefficient de recombinaison faible ( $\gamma \sim 0.004$  pour le pyrex) ou bien modéré ( $\gamma \sim 0.5$  pour l'inox)[16].



## Chapitre III :Dispositif expérimental

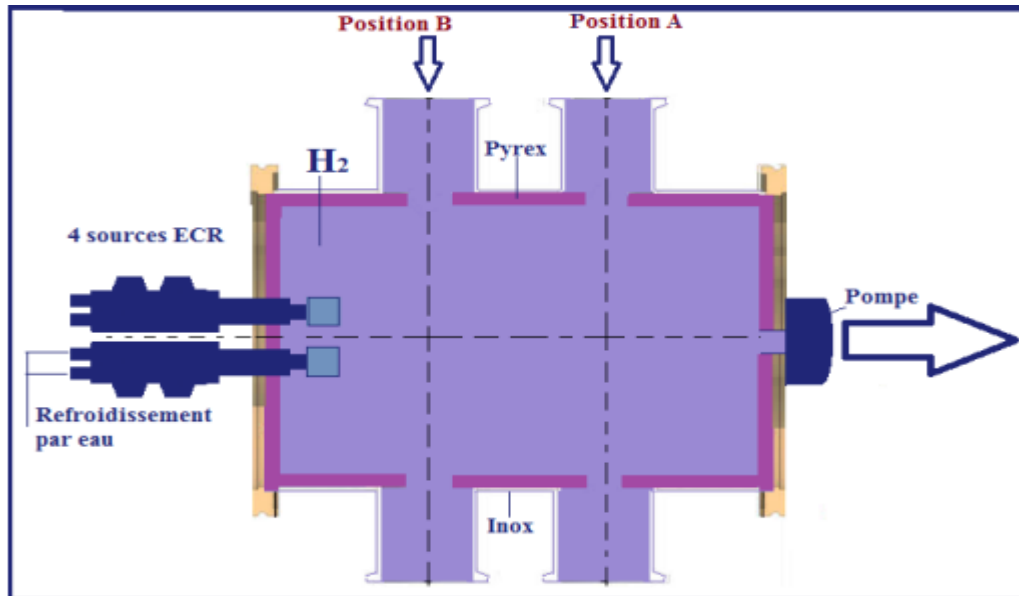


Figure III.1. Schéma du réacteur ROSAE

Les moyens de diagnostic décrits dans les paragraphes suivants, pourront être placés dans le position A (zone de création), ou dans le position B (zone de diffusion) du réacteur ROSAE-III

### III.3 DIAGNOSTICS DU PLASMA:

La caractérisation du plasma est faite par l'application de trois techniques : a) sonde de Langmuir pour mesurer la densité du plasma ainsi que la température électronique, b) Spectroscopie d'émission dans le visible pour la densité relative d'atomes H, c) photo-détachement laser pour la densité absolue des  $H^-$ .

#### III.3.1 Sonde de Langmuir:

Les sondes de Langmuir sont utilisées dans les plasmas pour déterminer ses paramètres fondamentaux. Le physicien Irving Langmuir a développé et présenté ces sondes au milieu des années 1920.

La sonde de Langmuir est le diagnostic électrique le plus répandu pour caractériser les électrons (et les ions) dans les plasmas froids. Son principe réside dans l'interprétation de la caractéristique courant-tension  $I(V)$  mesurée par un filament polarisé introduit dans le plasma, cette technique permet de déterminer l'intégralité des paramètres fondamentaux du plasma. A

# Chapitre III :Dispositif expérimental

suivant, les densités des électrons  $n_e$ , et des ions  $n_i$ , température des électrons  $T_e$ , potentiel plasma  $V_p$  et potentiel flottant  $V_f$ .

Une sonde de Langmuir est une tige conductrice, généralement, en tungstène (ou en molybdène, en platine, etc.) immergée dans le plasma à étudier. Elle est polarisée électriquement peut être plane, sphérique ou cylindrique (figure III.2). Cette dernière a été utilisé pour nos mesures.

Trois zones peuvent être distinguées dans la courbe  $I(V)$ , délimitées par deux points d'intérêt: le potentiel flottant ( $V_f$ ), pour lequel les courants électronique et ionique se compensent (donnant un courant total nul) et le potentiel plasma ( $V_p$ ). Lorsque le potentiel appliqué a la sonde  $V_s$  est très inférieur à  $V_f$  (zone A), le courant collecte  $I_s$  est essentiellement du aux ions positifs collectes (figure III.3).

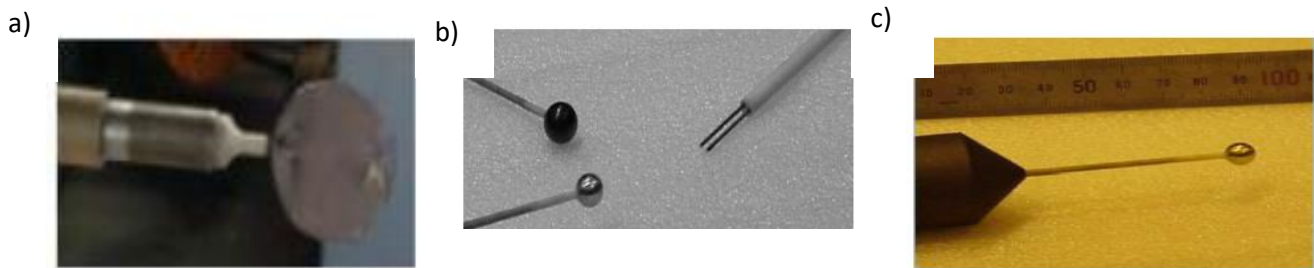


Figure III.2 : Exemples de forme de sonde électrostatique a)sonde plane ; b) cylindrique ; c) Sphérique [31].

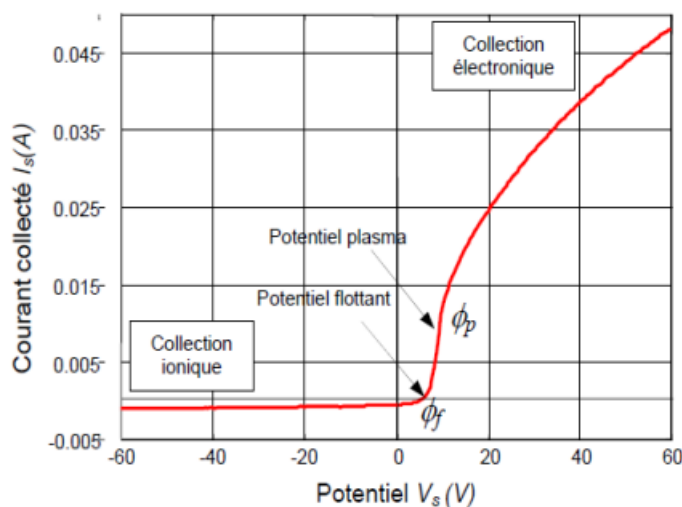


Figure III.3: Caractéristique type obtenue avec la sonde de Langmuir cylindrique [32].

# Chapitre III :Dispositif expérimental

## III.3.2 Spectroscopie d'émission optique dans le visible :

Parmi les différentes techniques de diagnostic du plasma, la spectroscopie d'émission optique (SEO) est la plus couramment utilisée car elle est non perturbatrice et permet souvent une détermination directe et en temps réel des espèces (neutres ou ioniques) excitées radiatives présentes dans le plasma.

La spectroscopie d'émission optique consiste à analyser l'intensité des rayonnements émis lors de la désexcitation radiative des espèces présentes dans le plasma. Étant donné que la lumière émise par le plasma dans tout le chemin optique de la source lumineuse au système de mesure n'a pas d'auto-absorption, en supposant que la pression est inférieure à 0,1 Torr, l'intensité de la raie spectrale  $I_{\lambda i}$  est donnée par la relation suivante :

$$I_{\lambda i} = R_{\lambda} n_i^* A_{ij} \Delta V \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \quad \text{(III-1)}$$

$R_{\lambda}$  est la réponse du système à la longueur d'onde considéré,  $n_i^*$  la densité d'espèces dans l'état excité  $i$ ,  $A_{ij}$ : Coefficient d'Einstein,  $\Delta V$  le volume de plasma observé sous l'angle solide  $\Delta \Omega$ .

La figure III.4 représente un spectre d'émission optique dans le visible typique du plasma d'hydrogène obtenu dans ROSAE III, dont la série de Balmer ( $H_{\alpha}$ ,  $H_{\beta}$  et  $H_{\gamma}$ ) Pour l'hydrogène moléculaire la bande Fulcher  $H_{fulcher}$  émet dans l'intervalle de longueurs d'ondes compris entre 619 - 632 nm. Cette bande est représentée dans la petite fenêtre, à droite de l'image de la figure.

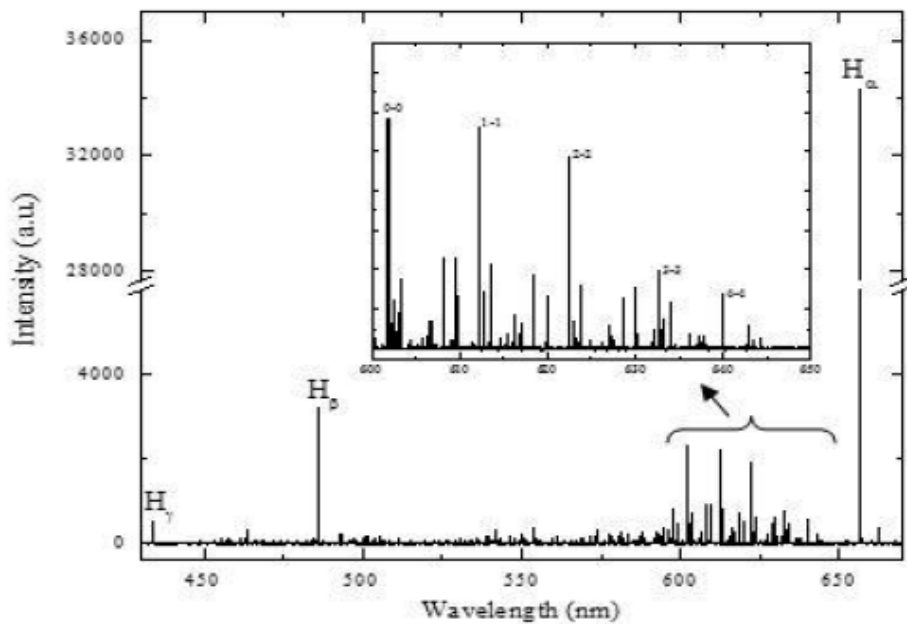


Figure III.4: Spectre typique d'émission optique dans le visible pour un plasma d'hydrogène [33].

## Chapitre III :Dispositif expérimental

Le montage expérimental utilisé est représenté à la figure III. 5, les spectres sont enregistrés à l'aide d'une fibre optique connectée à un spectromètre d'émission optique visible Horiba ® FHR1000. L'autre extrémité de la fibre contenant le collimateur est déposée ex-situ sur la fenêtre du réacteur ROSAE-III et n'apparaît pas dans le plasma. Le rôle du collimateur limite l'angle de captation de la lumière. Le spectromètre Horiba ® offre une combinaison unique de vitesse, de précision et de haute résolution. Il est équipé d'une caméra CCD *Syncerity Jobin-Yvon* 1024 x 256 Pixels pour mesurer le spectre global, comme le montre la figure III. 4 et un photomultiplicateur Hamamatsu R928 pour enregistrer des raies à haute résolution.

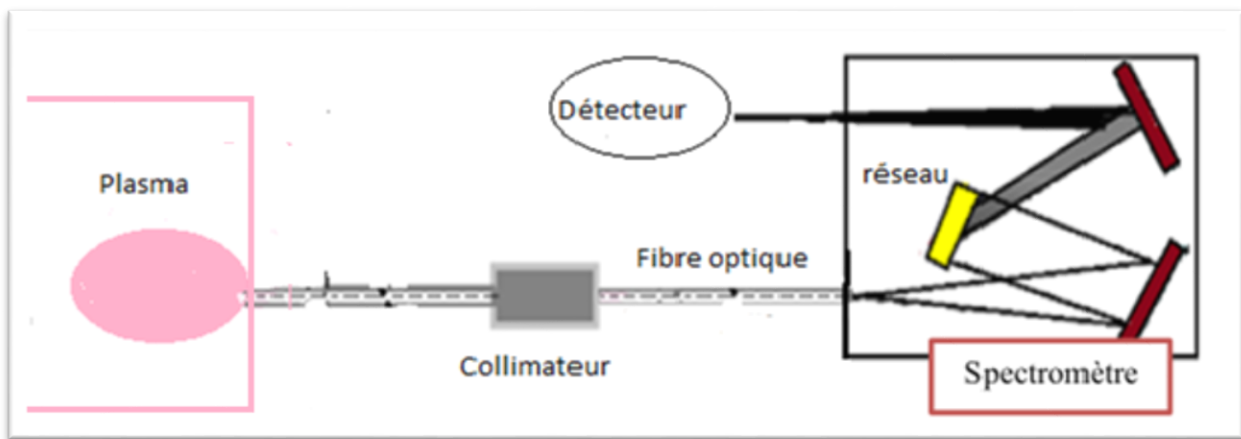


Figure III.5: Schéma de dispositif expérimental de la SEO.

### III.3.3 Photo-détachement laser:

La technique du photo-détachement laser a été utilisée dans notre réacteur pour déterminer la densité absolue des ions négatifs dans le plasma froid (plasma d'hydrogène).

Dans ce mémoire, nous précisons les conditions dans lesquelles la technique de photo-détachement permet d'obtenir la densité absolue d'ions négatifs  $n_i$ . Obtenue par le biais du rapport  $n_i/n_e$  suivant les travaux de M.Bacal.

#### III.3.3.1 Description:

Lors de l'interaction avec des ions négatifs, les photons peuvent être absorbés par les ions, les amenant à atteindre un niveau d'excitation supérieure. Afin de stabiliser les ions négatifs, l'excès d'énergie apporté par le photon est redistribué à l'électron dans le processus d'ionisation. Cela provoque sa libération dans le continuum avec une énergie cinétique égale à la différence entre l'énergie du photon et l'intervalle d'énergie entre le niveau d'énergie initial de l'ion négatif et le niveau d'énergie de l'atome neutre (voir Figure III. 6). Ensuite, les électrons émis ne laissent

# Chapitre III :Dispositif expérimental

qu'un atome neutre avec lequel il interagit à peine, le faisant passer en électrons libres, ce qui correspond au photo-détachement.

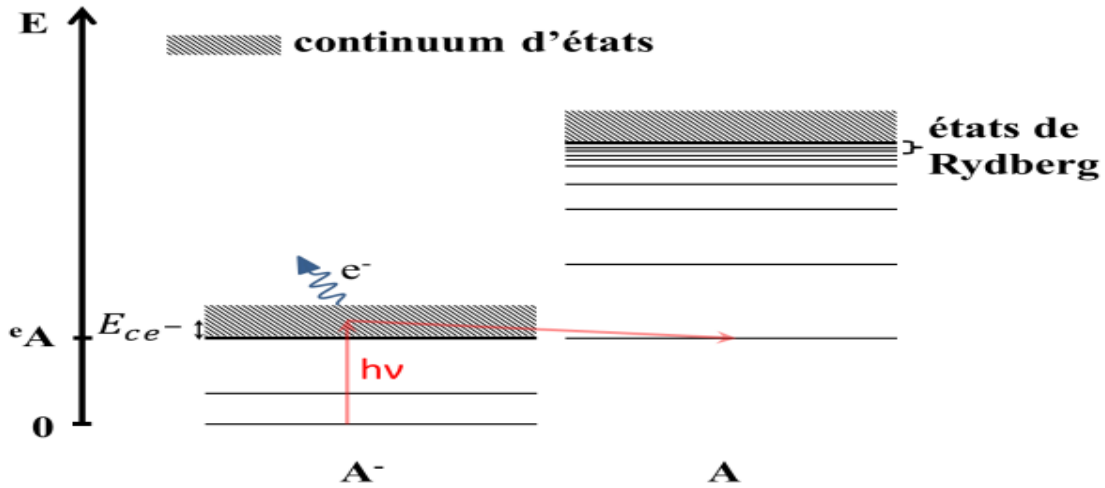


Figure III.6: Représentation schématique du processus de photo-détachement[34]

Les lasers sont la source de lumière la plus utilisée dans la technique du photo-détachement qui peut mesurer la densité et la vitesse des ions négatifs dans le plasma. Les outils de diagnostic utilisent des faisceaux laser pour étudier la formation de ces électrons libres.

Le laser utilisé dans notre expérience est un laser Brilliant Quantel, de type Nd:YAG, avec une longueur d'onde de travail de 1064 nm, une énergie d'émission maximale de 150 mJ, une largeur d'impulsion d'environ 6ns, une durée de 5ns et une fréquence de 50 Hz. La sonde de Langmuir cylindrique polarisée positivement est de +40V, ce qui est beaucoup plus élevé que le potentiel du plasma, elle capte donc le courant. Placé au centre du faisceau laser de 2,0mm de diamètre. Nous pouvons affirmer que le courant mesuré par la sonde est le signal nécessaire pour déterminer la densité d'ions négatifs. Pour ce faire, nous relierons le courant à la densité électronique et donc à la densité d'ions négatifs par cette équation:

$$\frac{\Delta I_e}{I_{e0}} = \frac{\Delta n_e}{n_{e0}} = \frac{n_-}{n_e} \left( 1 - e^{-\frac{E\sigma}{Sh\lambda}} \right) \tag{III-3}$$

où  $I_{e0}$  correspond au courant collecté par la sonde et  $\Delta I_e$  correspond au pic du spectre de photo détachement laser, où E est l'énergie du laser, S est la section efficace du faisceau laser au niveau de la position de la sonde électrostatique et  $\sigma$  est la section efficace de photodétachement des photons incidents d'énergie, une longueur d'onde constante du laser.l'équation (III.3) peut être simplifiée et exprimée de la façon suivante :

## Chapitre III :Dispositif expérimental

$$\frac{\Delta I_e}{I_{e0}} = \frac{n_-}{n_e} \quad (\text{III.4})$$

$n_e$  dû aux électrons photodétachés et est  $n_-$  la densité d'ion négative. Dans cette étude, l'attention se concentre exclusivement sur le rapport  $\Delta I_e / I_{e0}$ , nous présentons un signal typique de photo-détachement observé de variation du courant de sonde sur l'écran de l'oscilloscope en mode de tir continu de 5ns/pulse figure III.7

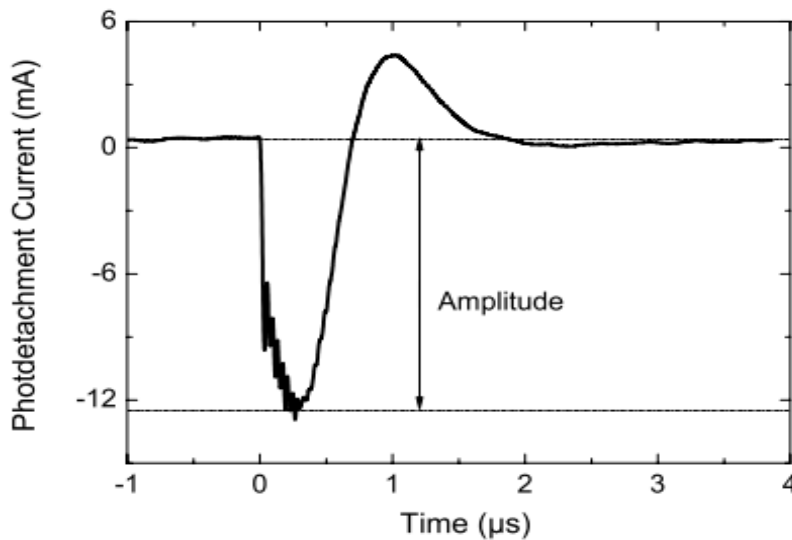


Figure III.7: Signal de photo-détachement montrant l'évolution temporelle du courant après l'impulsion laser, obtenu en ROSAE-III.

### III.3.2 Mesure de la densité relative $n_- / n_e$ :

Pour déterminer  $n_- / n_e$ , nous mesurons le courant électronique sur le plateau du signal de photo-détachement et le courant continu collecté par sonde. Bacal et al [35]. a montré que le rapport de ces deux courants est égal à  $n_- / n_e$  lorsque certaines conditions sont remplies:

- l'amplitude du signal de photo-détachement est indépendante du flux du laser;
- l'amplitude du signal de photo-détachement doit être indépendante du diamètre du faisceau laser [36].

Dans ces conditions, l'équation III.4 peut être utilisée pour calculer directement le rapport de la densité des espèces négatives sur la densité électronique ( $n_- / n_e$ ).

A partir de ce rapport, on en déduit la densité absolue des ion  $H^-$

# Chapitre III :Dispositif expérimental

---

## III.4 Conclusion:

Dans ce chapitre, le dispositif expérimental via lequel les résultats ont été obtenus a été présenté. Une description détaillée du réacteur ROSAE-III ainsi que les moyens de diagnostics ont été donnés. Les sondes électroniques, l'émission optique dans le visible et le photodétachement laser, permettent de déterminer respectivement les paramètres fondamentaux du plasma ( $n_e$ ,  $T_e$ ,  $V_p$  et  $V_f$ ), la densité relative des atomes H, et la densité absolue des ions négatifs  $H^-$ .

## **Chapitre IV**

### **Résultats et interprétations**

Dans cette partie du travail, nous exploiterons les résultats obtenus expérimentalement sur le réacteur ROSAE-III. Une interprétation détaillée des résultats sera donnée.



# Chapitre IV : Résultats et interprétations

## IV.1 Introduction:

Le réacteur ROSAE-III , comme déjà évoqué ,a la particularité d'orbiter dans sa surface interne un tube en verre borosilicaté ( $\gamma = 0.5$  ) ,de cette manière, le plasma pourrait faire face a un coefficient de recombinaison modéré, qui est le cas de l'inox ( $\gamma = 0.5$  ), le matériaux avec lequel le réacteur est conçu, ou un faible coefficient , qui est le cas de *pyrex*<sup>TM</sup> ( $\gamma = 0.004$ ).

Du coup, nous allons commencer notre étude par un comparaison inox/pyrex, une fois le choix de la couverture de la densité est fait, nous étudierons l'effet du matériaux (HOPG) sur la production des ions négatifs  $H^-$

## IV.2 Étude de l'effet de HOPG sur la production d'ions $H^-$ :

Avant d'analyser l'impact de matériau sur l'ion négatif  $H^-$ , il faut Choisix d'abord entre le Pyrex et l'acier inoxydable.

### IV.2.1 Etude comparative Inox-Pyrex:

Nous commençons par la densité et la température des électrons. Les données sont mesurées pour différentes puissances, à deux pressions de référence: 6 mTorr et 12 mTorr, en position B (zone de diffusion), pour les deux matériaux étudiés (inox/pyrex). Les résultats de la densité électronique sont exposés dans la figure IV.1

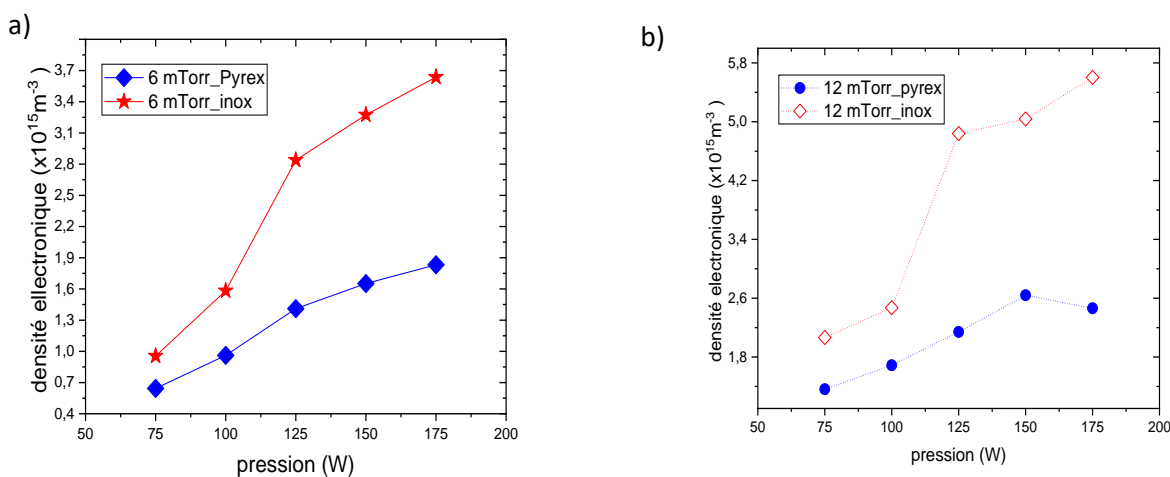


Figure IV.1: Variations de la densité d'  $e^-$  en fonction de la puissance pour les deux matériaux. Le Pyrex en bleu et l'inox en rouge, dans la gamme 75-175 W, à pressions : 6mTorr(a), 12mTorr(b).

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Nous constatons que quelque soit matériau faisant face au plasma. La densité électronique augmente en fonction de la puissance. L'inox génère plus d'électron que le pyrex, passant de  $10^{15}$  à  $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , pour une pression de 6mTorr. Alors que pour le même pression la densité pour le pyrex varie entre  $0.5 \times 10^{15}$  à  $1.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . la même constat est enregistré à 12 mTorr.

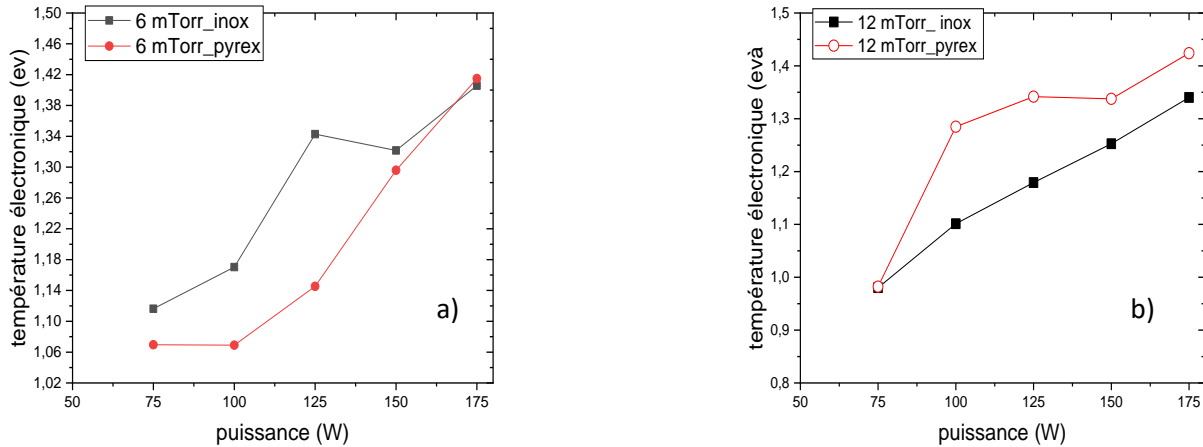


Figure IV.2: variations de la température d'  $e^-$  en fonction de la puissance pour les deux matériaux le Pyrex en rouge et l'inox en noir, dans la gamme 75-175 W, à pressions: 6 mTorr(a), 12mTorr(b).

La figure IV.2, donne les dépendances de la température des électrons en fonction de la puissance, sous les mêmes conditions expérimentales précédentes. Nous remarquons que pour les deux surface, la température électronique est plus élevée à 6mTorr qu'à 12mTorr, Néanmoins, pour les deux pression et matériaux la température augmente en fonction de la pression.

La Figure. IV.3 représentant évolution en fonction de la puissance du rapport  $H_\beta/H_f$ , pour les deux matériaux le Pyrex en noir et l'inox en rouge, dans la gamme de puissance 75-175 W.

Le rapport  $H_\beta/H_f$  passe de  $\sim 1.5$  à  $1.7$  pour l'inox, contre  $1.7$  à  $\sim 2.9$  pour le pyrex. Quelque soit la puissance injectée, le rapport  $H_\beta/H_f$  est plus élevée pour le pyrex.

# Chapitre IV : Résultats et interprétations

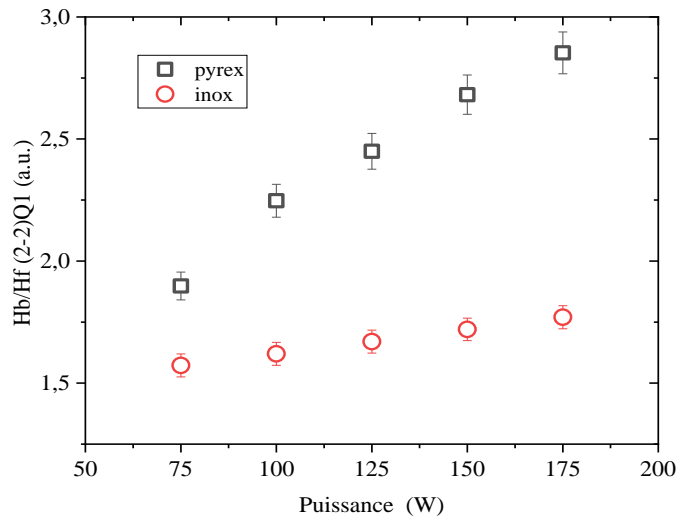


Figure IV.3 : Evolution en fonction de la puissance du rapport  $H\beta/H_f$

## IV.2.1.1 Interprétations:

La densité électronique augmente en fonction de la puissance. Ceci expliqué par la fois que cette dernière apporte de l'énergie au plasma et ionise davantage le gaz. Cependant, le pyrex qui est un verre faisant face au plasma, se met au potentiel flottant. En revanche, l'inox qui est un métal est au potentiel nul, ce qui a tendance à mettre les électrons sous une énergie potentielle de  $(V_P - V_f)$  ou bien  $(V_P - 0)$ . Cette dernière est plus importante ce qui pousse les électrons à se perdre plus sur les parois dans le cas de l'inox, c'est ce qui explique une densité plus forte pour le pyrex.

A propos de la température électronique, quand la pression du gaz est faible (6mTorr) il y a moins de collision, du coup les électrons perdent une densité plus longue qui fait augmenter leur énergie cinétique et par conséquent la température  $T_e$ . En revanche à 12mTorr les collisions sont plus importantes dans le gaz et les électrons perdent de leur énergie.

Pour le rapport  $H\beta/H_f$ , il a été constaté que ce rapport est plus important pour le pyrex. Ceci dit, il y a plus d'atomes dans le pyrex que dans l'inox. Ceci s'explique par le fait que le pyrex qui a un faible coefficient de recombinaison. Les atomes rebondissent sur sa surface. Or, l'inox qui a un coefficient de recombinaison modéré ( $\gamma = 0.5$ ) aura tendance à absorber les atomes H sur sa surface, et par conséquent nous enregistrons une densité de H plus faible pour ce dernier. Le constat est qu'il y a plus d'atomes dans le Pyrex que dans l'inox. En effet, le faible coefficient de recombinaison du Pyrex permet aux atomes de rebondir sur sa surface et de

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

gagner plus d'atomes dans le volume du plasma, contrairement à l'inox à coefficient de recombinaison moyen, faible densité. Un autre mécanisme explique également cette différence, à savoir la désorption recombinative [37].

Dans le but de mettre en évidence un éventuel effet du HOPG. Nous devons éliminer tout effet de la surface du réacteur. Du coup, suite aux résultats présentés dans cette première partie, nous choisissons le pyrex pour l'étude du matériau (HOPG). Ce choix est motivé par le fait que le pyrex par son faible coefficient de recombinaison, Rend peu probable le mécanisme de la désorption recombinative sur sa surface. Pour le coup, si jamais le HOPG joue un rôle, il sera vite mis en évidence.

### IV.3 Interprétation du rôle du HOPG :

Dans les mêmes conditions expérimentales, de pression et de puissance, nous étudions l'effet éventuel du HOPG (**H**ighly **O**riented **P**yrolytic **G**raphite) pour leurs effets sur la production des ions négatif.

Le graphite HOPG est place devant la source ECR sous forme d'anneau à 3.5 cm couvrant ainsi 13% de la surface totale du pyrex,

La mesure des paramètres du plasma par la sonde de Langmuir montre que sous Pyrex, pour les deux pressions (6-12mTorr) explorées, la densité électronique augmente la puissance injectée, passant de  $0.9 \times 10^{15} m^{-3}$  à  $3.7 \times 10^{15} m^{-3}$  respectivement de 75w à 175w pour une pression 6mTorr et à partir de  $1,6 \times 10^{15} m^{-3}$  à  $4,7 \times 10^{15} m^{-3}$  pour les mêmes puissances à 12mTorr, la densité augmentera également avec une couverture partielle en HOPG à 12mTorr, atteignant  $3,4 \times 10^{15} m^{-3}$  à 175W. Pour ce dernier, à 125w une saturation d'environ  $\sim 1,6 \times 10^{15} m^{-3}$ , et constatée à 6mTorr (figure IV.4)

# Chapitre IV : Résultats et interprétations

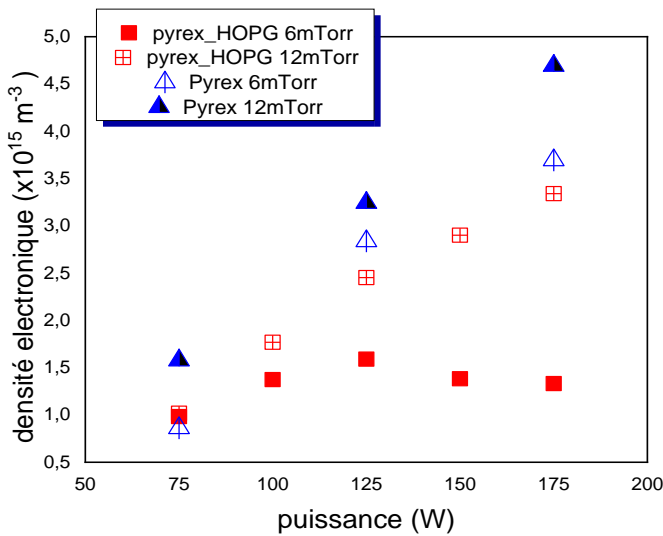
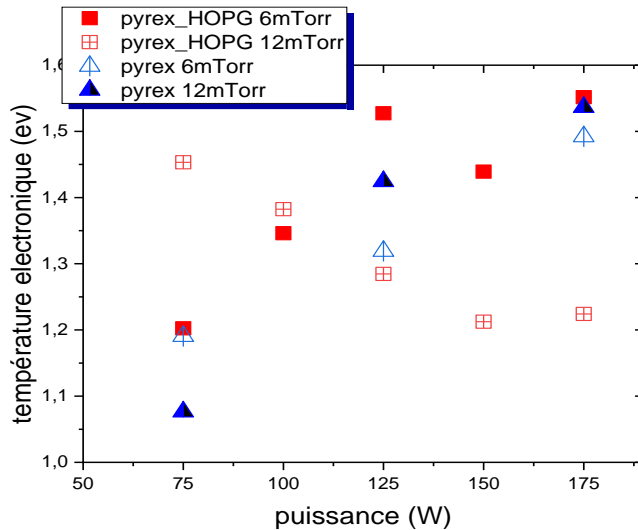


Figure IV.4 : Variations de la densité électronique avec la puissance injectée.

En bleu en pyrex, en rouge en pyrex-HOPG 6mTorr et 12mTorr (vide et plein respectivement).

Figure IV.5 : Evolutions de la température électronique avec la puissance injectée. En bleu en pyrex, en rouge en pyrex-HOPG 6mTorr et 12mTorr (vide et plein respectivement).



La Figure. IV.5 montre l'évolution de la température des électrons en fonction de la puissance injectée. Dans tous Pyrex, à 12 mTorr, la température électronique varie entre 1,08 et 1,54 eV, en fonction de la puissance. Pour une pression plus basse de 6mTorr, elle varie également de 1,20 à 1,55 eV. A 12mTorr, sous HOPG,  $T_e$  diminue en fonction de la puissance, de 1,45eV à 1,20eV. A 6mTorr, en plaçant HOPG avant la source ECR,  $T_e$  augmente, puis se stabilise à 1,52eV à 125W, mais une singularité est apparue à 150W, et une légère baisse a été notée ( $\sim 1,43$  eV).

Nous donnons dans la figure. IV.6 Le rapport de l'intensité  $H_\beta/H_f$  en fonction de la puissance injectée pour deux emplacements du HOPG (près des sources, et au fond du réacteur). Ce ratio est encore plus élevé, quelle que soit la pression et la puissance utilisées. Il passe de 1.25 à 1.85 avec un emplacement devant les sources et de 1.5 à  $\sim 2.0$  quand le HOPG est placé au

# Chapitre IV : Résultats et interprétations

fond du réacteur. Ce qui indique que la densité d'atomes H est plus élevée quand le HOPG est au fond.

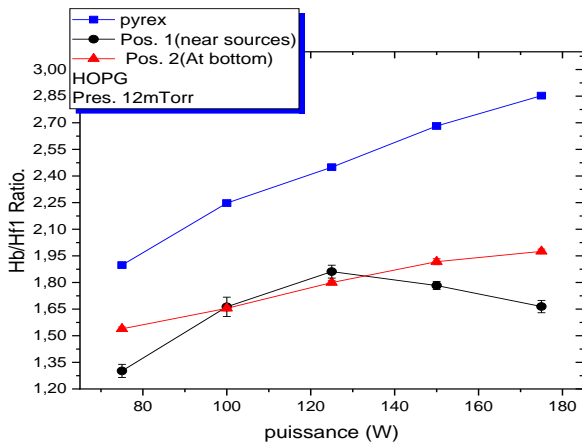


Figure IV.6: Variations du rapport des intensités  $H_{\beta}H_{\gamma}$  avec puissance injectée, à  $p= 12\text{mTorr}$

La Figure. IV.7 donne les variations de la densité absolue d'ions négatifs  $H^{-}$  en fonction de la puissance injectée pour 12mTorr,

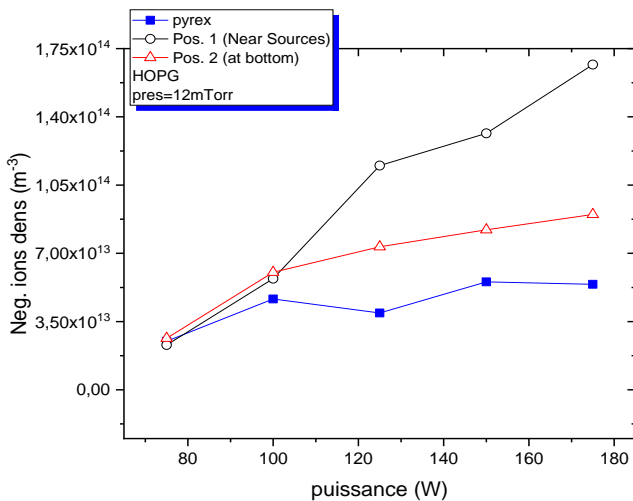


Figure. IV.7: Evaluation de la densité absolue d'ions négatifs  $H^{-}$  en fonction de la puissance injectée pour 12mTorr

Cette dernière figure montre l'évolution de la densité absolue des ions négatifs  $H^{-}$  d'hydrogène, obtenue par photo-détachement laser en fonction de la puissance. Elle montre qu'en présence du HOPG, la densité absolue des  $H^{-}$  augmente quelque soit la position où le HOPG est placé. Ceci dit, une densité supérieure est enregistrée quand le HOPG est placé dans la zone de création. Elle atteint pour cette position  $1,75 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ , ce qui prouve clairement que le HOPG a un effet direct ou indirect dans la production des ions négatifs d'hydrogène  $H^{-}$ .

# Chapitre IV : Résultats et interprétations

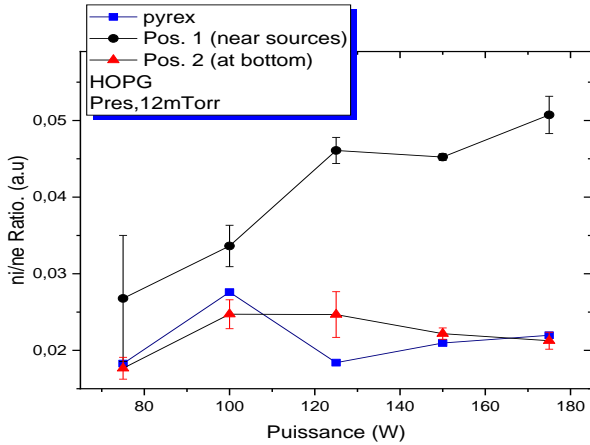
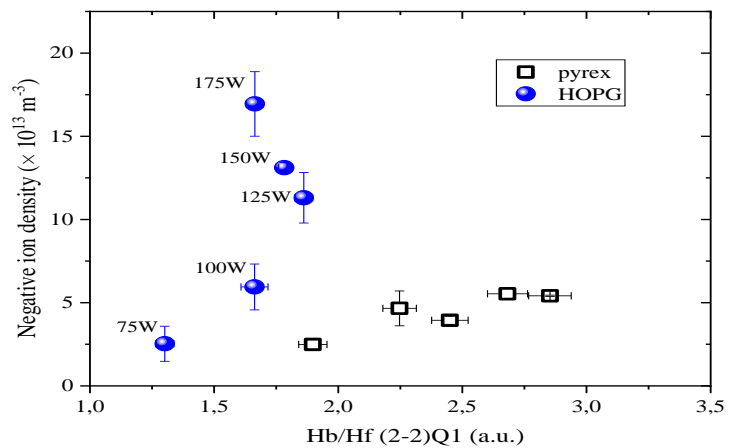


Figure IV.8: Evolutions du rapport des densités ( $n_{i-}/n_e$ ) avec la puissance injectée. En noir pos1 (près HOPG), en rouge pos 2 (en bas HOPG)  $p=12\text{mTorr}$ .

Le rapport des densités  $n_{i-}/n_e$  en fonction de la puissance est donné en figure IV.8. Ceci donne le rendement de la production des ions  $H^-$  en fonction de la quantité d'électron présenté dans le plasma. Il est clair que quelque soit la puissance injectée, le rendement est supérieure en présence du HOPG. Il l'est encore plus lorsque ce dernier est placé devant les sources, atteignant 0.05 à 175w.

La Figure IV.9 donne les Evolutions de la densité absolue des ions négatifs avec le rapport  $H_\beta H_f$ .

Figure IV.9: Evolutions de la densité absolue des ions négatifs avec le rapport  $H_\beta H_f$ , en noir l'enceinte en Pyrex, en bleu en HOPG. à 12 mTorr

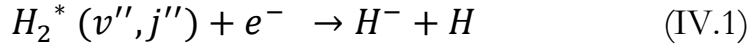


Ces résultats montrent que pour les couvertures, le rapport  $H_\beta H_f$  ne dépasse pas 2,2. Partiellement en HOPG, densité  $n_{i-}$  portée  $17 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ . Sous Pyrex le rapport  $H_\beta H_f$  La densité  $n_{i-}$  atteint 5 -Pas plus de  $5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ . Cela confirme dans une certaine mesure Il est incontestable que les atomes sont également recombinaison à la surface de HOPG, ce qui est bon pour la production ions négatifs.

# Chapitre IV : Résultats et interprétations

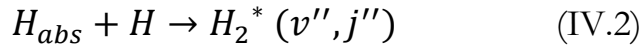
## IV.4 Discussion :

La présence du HOPG décroît la quantité d'électron dans le plasma, (figure .IV.4) par rapport à un couverture totale en pyrex. Cette diminution s'explique par le fait qu'un partie de ces électrons interagit avec les molécules ro-vibrationnellement excitées présentes dans le plasma en formant des ions  $H^-$  par attachement dissociatif (AD)



Ceci étant vrai, surtout que ces électrons sont dits froid ( $T_e \sim 1.5 \text{ eV}$ ) (figure IV.5).

Cependant, la densité relative d'atomes H (rapport  $H_\beta/H_f$  obtenue par la spectroscopie d'émission dans le visible), diminue plaçant le HOPG dans la reacteur, particulièrement quand ce dernier est devant les sources. Le HOPG qui donne un coefficient de recombinaison  $\gamma$  supérieur à celui du pyrex, aura tendance à absorbé les atomes sur sa surface, ce qui n'est pas le cas pour le pyrex. Néanmoins, la densité des H reste supérieure pour la deuxième emplacement de HOPG (au fond du réacteur) car celui -ci reste relativement assez éloigner pour qu'une aussi grande partie des atomes H soit absorbé sur sa surface, c'est ce qui explique les tendances de la figure IV.6. pour le coup, la densité absolue des ions négatifs  $H^-$  augment quelque soit la position du HOPG. Avec une augmentation significative quand ce dernier est dans la zone de création. Ceci montre clairement que le HOPG, a un rôle indirect dans la production des ions négatifs  $H^-$ . En effet, le HOPG absorbe des atomes H sur sa surface. Ces derniers, en se recombinant avec les atomes du plasma, forment des molécules ro-vibratinnellement excitées par la désorption recombinative.



Les molécules excitées résultats, forment a leur tour des ions négatifs d'hydrogène  $H^-$  par attachement dissociatif. Du coup, la figure IV.7 est une preuve indirect sur le rôle que joue le HOPG dans la production des ions négatifs  $H^-$ .

La preuve directe réside dans la mesure de la densité absolue des molécules ro-vibrationnellement excitées. Mais ceci ropuierit des moyens financés et techniques très importante, notamment un rayonnement puissant de type synchrotron. Ceci dit, des mesures similaires ont été réalisé sur le tungstène et le tantale dans [37].qui montrent clairement le rôle des matériaux dans les productions des ions négatifs  $H^-$ .

La figure IV.8 a montré que pour la même quantité d'électrons présents dans le plasma, rendement plus important est enregistré lorsque d'atomes H absorbés qui produisent des molécules ro-vibratinnellement excitées, qui est clairement mis en évidence dans la figure IV.9. Où an constate qui pour une densité similaire d'atome H, une densité absolue d'ions négatifs nettement plus supérieure est enregistré en présence du HOPG, attigent jusqu'à  $\sim 1.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , contre  $0.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , pour le pyrex , soit une augmentation d'un facteur 5.



# Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

## IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le pyrex qui par son faible coefficient de recombinaison ( $\gamma = 0.004$ ) a été choisi pour l'étude du rôle du HOPG pour éliminé tout effet de surface. Une fois pyrex pins comme référence, nous avons placé le HOPG dans deux position déférentes: devant les sources, et au fond du réacteur couvrant ainsi 13% de la surface totale. L'étude a montré que le HOPG contribue dans la production des molécules ro-vibrationnellement excitées par la description recombinaive. Ces dernières en interagissant avec les électrons froids du plasma se transforment en ions négatifs  $H^-$  par attachement dissociatif.

## V. Conclusion général:

Le développement de sources d'ions négatifs est primordial pour la fusion en plasma d'hydrogène, les ions négatifs  $H^-$  sont produits en surface et/ou volume. Les mécanismes de leur génération ont peu été étudiés dans la communauté plasma c'est pourquoi nous nous y intéressons.

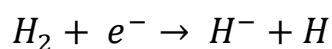
Dans le réacteur ITER, atteindre la température d'ignition des réactions de fusion thermonucléaire, le plasma de fusion (i.e. plasma chaud) est chauffé au moyen de l'injection de neutres (IDN): il s'agit d'injecter dans la machine de confinement magnétique (tokamak) un faisceau de particules neutres très énergétiques qui cèdent leur énergie au plasma par collisions, ce qui contribue à l'augmentation de la température. Ces particules sont issues de la neutralisation des ions négatifs créés dans une source de plasma froid extérieure. Cette technique de chauffage est donc composée de quatre parties principales: (1) une source d'ions négatifs, (2) un extracteur, (3) un accélérateur et (4) un neutraliser.

Une grande partie des sources d'ions existantes, produit des ions négatifs en surface, utilisant du césium pour baisser le travail de sortie. Cependant, celui-ci peut s'échapper de la source et contaminer la ligne d'injection de neutre. Par conséquent, il est primordial de trouver une alternative à sources opérant avec le césium.

D'où l'importance d'un travail de recherche qui consiste à produire des ions négatifs en volume, dans un plasma d'hydrogène sans césium, en tenant compte de la contribution de surface en graphite (HOPG). Cette étude est l'une des préoccupations majeures de l'équipe PMN du laboratoire LPSC. La compréhension des mécanismes de formation des ions négatifs et les paramètres influençant leurs productions, est indispensable.

A ce titre, certains concepts et définitions de base de la physique des plasmas et des caractéristiques importantes telles que la température électronique, la longueur de Debye, représentation de la gaine (potentiel plasma et potentiel flottant.) ont été données, une attention particulière à été prêtée aux réacteurs de type ECR, particulièrement le réacteur ROSAE-III.

Facteur de petite taille ROSAE-III est un (ecRhydrOgen plaSma for neutrAl bEam), dans lequel les ions négatifs  $H^-$  sont produits en volume (dans le cœur du plasma) par le mécanisme d'attachement dissociatif (AD), d'une molécule d'hydrogène excitée et un électron froid, donne un ion négatif et un atome d'hydrogène selon la réaction:



---

La particularité du réacteur ROSAE-III, est qu'il peut abriter à sa surface interne, un tube en verre borosilicate, de cette manière le plasma pourrait faire face à un coefficient de recombinaison modéré, qui est le cas de l'inox ( $\gamma = 0.5$ ) ou faible pour le pyrex ( $\gamma = 0.004$ )

Le premier résultat ont été montré que le pyrex annule tout effet de surface, ce qui à mené à la choisir comme référence, pour étudier le rôle du HOPG. Ce dernier, a été placé sous forme d'anneau de 3.5cm, en deux positions: devant les sources, dans la zone de production et dans le fond du réacteur, couvrant ainsi 13% de la surface totale. Les résultats ont été prometteurs, car le HOPG a permis d'analyser la densité absolue des ions négatifs d'un facteur 5.

En effet, le HOPG, par la désorption recombinative, a permis aux atomes absorbés sur sa surface, de se recombiner en molécules ro-vibrationnellement excitées, qui se transforment en ions négatifs par attachement dissociatif. Nous estimons que les résultats analyses et exploiter, sont très prometteurs, et peuvent être un alternative aux sources utilisant di césium.

---

## Références bibliographiques:

- [1] RAX, Jean-Marcel. Physique des plasmas : cours et applications. Dunod, pp.02, 2005.
- [2] LABERGE, Michael, "Simulation de profils de gravure et de dépôt à l'échelle du motif pour l'étude des procédés de microfabrication utilisant une source plasma de haute densité à basse pression", p2, 2013.
- [3] P. Savoini, "Introduction à la physique des plasmas," Laboratoire de Physique des plasmas, Polytechnique, Saclay, Palaiseau, 2009.
- [4] 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, pp.124, 2007.
- [5] P. Bradu, L'Univers des plasmas, Flammarion. pp. 242, 1999.
- [6] Maria CALAFAT, "Formation de poudres dans des décharges d'acétylène en Plasma Micro-onde. Multipolaire excité à la Résonance Cyclotronique Electronique Répartie. Etude des nanocomposites carbone-carbone et leurs applications". Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, p.27, 2008.
- [7] H. Bahouh, "Contribution à la modélisation d'une décharge continue d'un gaz moléculaire", Thèse de Magister, Université de Constantine, pp. 13-14, 2010.
- [8] J. Bentounes, "Production des ions négatifs en surface de graphite dans un plasma d'hydrogène et de deutérium", Mémoire de Magister, Université de Mostaganem, pp. 17-28, 2008.
- [9] J. A. Bittencourt, "Fundamentals of plasma physics", 3rd edition, National Institute for Space Research, Springer, pp. 279-288, 2004.
- [10] P. Chabert, J. L. Raimbault, "Plasmas froids radiofréquence", Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique, Palaiseau, p. 1, 2009.
- [11] S. Béchu, "Caractérisations électrostatique et optique du fonctionnement de sources plasma

---

micro-onde dipolaires. Application à la production de faisceaux d'électrons et d'ions  $H^-$ ," Thèse d'habilitation, LPSC, Université Grenoble-Alpes, p1, 2010.

[12] Despiau-pujo, Emilie. "Plasmas Radio-Fréquence Basse Pression : Des Sources Aux Procédés." : p1. 1947.

[13] "Technologie Des Réacteurs à Plasmas : Plasmas Inductifs et Capacitifs Basse Pression." p.6606., 2003.

[14] 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.64-87, 2018.

[15] P. Bradu, " Flash.X la lettre scientifique de l'école polytechnique N° 12, dossier: les plasmas", Palaiseau, France, p. 2, 2012.

[16] 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. 111-122, 2018.

[17] H. A. Bethe, "Berechnung der Elektronenaffinität des Wasserstoffs," Z. Phys., vol. 57, pp. 815–821, 1929.

[18] Y. I. Belchenko, G. I. Dimov, V. G. Dudnikov, and A. A. Ivanov, "Formation of negative ions in a gas discharge," Dokl. Akad, vol. 213, no. 6, pp. 1283–5, 1973.

[19] K. S. Woodcock, "The Emission of Negative Ions under the Bombardment of Positive Ions," Phys. Rev., vol. 38, no. 9, pp. 1696–1703, 1931.

[20] D. Riz, "Etude expérimentale de sources à fort courant d'ions négatifs D-," Université Pierre et Marie Curie, 1996.

[21] 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. 19-33, 2008..

[22] H. Andersen and P. Tykesson, "A pig sputter source for negative ions," IEEE Trans. Nucl.

---

Sci., vol. 22, pp. 1632–1636, 1975.

[23] J. M. Wadehra and J. N. Bardsley, “Vibrational- and Rotational-State Dependence of Dissociative Attachment in  $e$ - $H_2$  Collisions,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 41, no. 26, pp. 1795–1798, 1978.

[24] R. Celiberto, R. K. Janev, A. Laricchiuta, M. Capitelli, J.M. Wadehra and D.E. Atems, “Cross Section Data for Electron-Impact Inelastic Processes of Vibrationally Excited Molecules of Hydrogen and Its Isotopes”, *At. Data Nucl. Data Tables*, vol. 77, pp. 161–213. 2001.

[25] F. Naito, J. Kek, and J. Project, “the Jaeri / Kek Joint Project and Its Performance,” in *Proceedings of LINAC2002*, Gyeongju, Korea, 2002, pp. 566–570.

[26] K. N. Leung, K. W. Ehlers, and M. Bacal, “Extraction of volume-produced  $H^-$  ions from a multicusp source,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 54, no. 1, pp. 56–61, 1983.

[27] F. H. R. Gobin\*, K. Benmeziane, O. Delferrière, R. Ferdinand, “Recent results of the 2.45 GHz ECR source producing  $H^-$  ions at CEA/SACLAY,” *Rapport CEA*, 2014, France.

[28] F. H. R. Gobin\*, K. Benmeziane, O. Delferrière, R. Ferdinand, “Recent results of the 2.45 GHz ECR source producing  $H^-$  ions at CEA/SACLAY,” *Rapport CEA*, 2014, France.

[30] Y. I. Belchenko, G. I. Dimov, V. G. Dudnikov, and A. A. Ivanov, “Formation of negative ions in a gas discharge,” *Dokl. Akad.*, vol. 213, no. 6, pp. 1283–5, 1973.

[31] S. Béchu, A. Bès, L. Bonny, A. Lacoste, “Mesures des paramètres électrostatiques d’un plasma par sondes de Langmuir Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie,” in *Atelier Diagnostics Plasma – Orléans*, 2014.

[32] S. Béchu, “Caractérisations électrostatique et optique du fonctionnement de sources plasma micro-onde dipolaires. Application à la production de faisceaux d’électrons et d’ions  $H^-$ ,” *Thèse d’habilitation*, LPSC, Université Grenoble-Alpes, 2010.

[33] U. Fantz and B. Heger, “Spectroscopic diagnostics of the vibrational population in the ground state of  $H_2$  and  $D_2$  molecules,” *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 40, no. 12, p. 2023, 1998.

[34] M. Bacal, G. W. Hamilton, A. M. Bruneteau, H. J. Doucet, and J. Taillet, “Measurement of

---

$H^-$  density in plasma by photodetachment,” Rev. Sci. Instrum., vol. 50, no. 6, pp. 719–721, 1979.

[35] 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. 81, 2018.

[36] S. Bechu, S. Aleiferis, J. Bentounes, L. Gavilan, V. A. Shakhmatov, A. B\_és, P. Svarnas, S. Mazou\_re, N. de Oliveira, R. Engeln, and J. L. Lemaire, "Detection of rovibrationally excited molecular hydrogen in the electronic ground state via synchrotron radiation," Applied Physics Letters, vol. 111, p. 074103, aug 2017.

[37] J. Bentounes, S J L .Béchu, F. Biggins, A .Michau, L . Gavilan, J. Menu, L . Bonny, D. Fombaron, A .Bès, Y A. Lebedev, V . Shakhmatov, P. Svarnas, M T . Hassaine, J L . Lemaire and A . Lacoste "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. 13, 055015, 2018.