

# Production d'ions négatifs en surface. Application à la fusion magnétique contrôlée

G. Cartry, A. Ahmad, M. Carrère, J.M. Layet

<sup>1</sup> *Université d'Aix –Marseille; CNRS UMR 6633 ; Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM), Centre de St Jérôme, service 241, 13397 Marseille Cedex 20*  
mél: [gilles.cartry@univ-amu.fr](mailto:gilles.cartry@univ-amu.fr)

## Introduction

Ce travail se place dans le contexte de la fusion thermonucléaire contrôlée et des projets ITER et DEMO qui ont pour but de démontrer sa faisabilité. Dans les dispositifs de fusion tels qu'ITER et DEMO (1<sup>er</sup> réacteur de Fusion produisant 1GW électrique couplé au réseau), le chauffage du plasma est en grande partie assuré par l'injection de faisceaux d'atomes de deutérium neutres (D) énergétiques (1-2 MeV), créés à partir de faisceaux intenses d'ions négatifs D<sup>-</sup> extraits d'une source plasma à basse pression et accélérés à de grandes énergies. La seule solution connue à ce jour pour produire les faisceaux intenses (20mA/cm<sup>2</sup>) requis pour ITER ou DEMO est d'injecter du césium sous forme vapeur dans la source d'ions négatifs. Le dépôt du césium sur les parois de la source augmente notablement la production d'ions négatifs en surface grâce à l'abaissement du travail de sortie du matériau. Bien que très efficace cette solution possède de nombreux défauts comme la diffusion du césium dans l'accélérateur de particules, la consommation élevée de césium et la stabilité du procédé sur des temps longs. Ces défauts engendreront une maintenance contraignante et régulière de l'injecteur de neutres constitué de la source d'ions négatifs, de l'accélérateur et du neutraliseur. Afin de réduire la périodicité de la maintenance, il faut minimiser ou annuler l'utilisation du césium. Dans ce but nous étudions la production d'ions négatifs en plasma d'hydrogène sans césium. Notre objectif est de comprendre les mécanismes de production en surface en plasma sans césium en vue de les optimiser.

## Dispositif expérimental

Les mesures sont réalisées dans un réacteur de type hélicon en mode capacitive ou inductif, sans champ magnétique. Un échantillon du matériau étudié est placé au centre de la chambre de diffusion et fait face à un spectromètre de masse muni d'un analyseur en énergie. L'échantillon est polarisé négativement par rapport au potentiel plasma. Les ions positifs du plasma le bombarde créant ainsi des ions négatifs en surface. Ces ions négatifs sont accélérés par la gaine devant l'échantillon vers le plasma qu'ils traversent sans collision aux faibles pressions considérées dans cette étude (0.2 – 2 Pa). Ils sont ensuite collectés par le spectromètre de masse et analysés en énergie. L'étude de leur fonction de distribution en énergie permet de remonter aux mécanismes de production en surface.

## Résultats et discussions

La première étude menée concernait le graphite HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite). Nous avons montré que les ions négatifs étaient produits en surface par deux mécanismes. Le premier est la rétrodiffusion d'un ion positif incident sous forme d'un ion négatif [1]. Le deuxième est la pulvérisation d'un atome d'hydrogène adsorbé en surface sous forme d'un ion négatif [2]. L'analyse des résultats montre qu'une grande majorité des ions négatifs mesurés a été créée par le mécanisme de pulvérisation. Nous avons également montré que les mêmes mécanismes étaient à l'œuvre dans les plasmas de deutérium [3]. Afin d'aller plus loin dans l'interprétation des mesures, une modélisation des fonctions de distribution en énergie a été entreprise. Le logiciel SRIM est utilisé pour obtenir la distribution énergétique et angulaire

des particules, à priori neutres, émises par la surface. L'hypothèse que ces distributions sont de formes identiques pour les ions négatifs est faite et, en se basant sur ces distributions, les calculs des trajectoires des ions négatifs dans les gaines face à l'échantillon et face au spectromètre de masse sont réalisés. Ces calculs donnent la distribution angulaire et énergétique des ions négatifs arrivant sur le spectromètre de masse. A l'aide du logiciel SIMION, le transport des ions dans le spectromètre de masse est simulé et, en intégrant sur l'ensemble des angles acceptés par le spectromètre, la distribution énergétique des ions détectés est calculée. L'accord entre les fonctions de distribution calculées et mesurées s'avère excellent validant ainsi l'usage de SRIM pour les ions négatifs dans ces conditions expérimentales. De surcroît, les calculs révèlent une mesure préférentielle des ions négatifs créés par le mécanisme de pulvérisation. En effet, ces ions sont émis à des angles plus proches de la normale et à des énergies moyennes plus faibles que les ions créés par le mécanisme de rétrodiffusion. Ainsi, leurs trajectoires sont plus facilement rectifiées par les gaines et ils impactent le spectromètre sous des angles plus faibles, augmentant ainsi leur probabilité de transmission. Ces résultats montrent que seul un petit pourcentage des ions émis par la surface peut être mesuré et que le graphite est encore meilleur émetteur d'ions négatifs qu'on le pensait initialement. Notons enfin que ces calculs ont été rendus possibles grâce à une collaboration avec le LPGP (T. Minéa) visant à calculer la forme des gaines devant le spectromètre de masse à l'aide d'un code d'extraction d'ions adapté à nos conditions expérimentales.

Nous avons ensuite mené une étude sur d'autres matériaux. En particulier nous nous sommes intéressés aux couches minces de diamant dopé au bore (collaboration avec A. Gicquel, LSPM), et de diamant de manière plus générale (collaboration avec D. Eon, Institut Néel). Parmi les matériaux testés (de nombreux métaux, le silicium...), les couches carbone se révèlent être les matériaux les plus efficaces pour la création d'ions négatifs. A température ambiante, le diamant dopé au bore est légèrement moins efficace que le graphite pour la production d'ions négatifs. Lorsque la température de surface augmente, et alors que la production d'ions négatifs sur graphite diminue, celle sur diamant augmente. Autour de 400°C, la production de surface sur diamant est jusqu'à cinq fois supérieure à celle observée sur graphite à température ambiante [4]. Cette production de surface diminue ensuite pour des températures plus élevées. Ces résultats sont très encourageants pour le développement de méthodes de production d'ions négatifs en surface sans césium. Des analyses Raman après exposition plasma ont permis de fournir une interprétation probable à ces observations. Lorsque les échantillons de graphite ou de diamant sont soumis au plasma, il se crée en surface des défauts et des zones amorphisées, et de l'hydrogène est implanté dans le matériau. Les états de surface sur les deux matériaux sont alors similaires et le taux de production des ions négatifs est voisin. Les signatures Raman des deux échantillons sont semblables et diffèrent nettement des signatures des matériaux vierges. Lorsque l'on chauffe à 400°C, la gravure préférentielle des phases sp<sup>2</sup> des matériaux permet de reconstruire partiellement la structure diamant. La signature Raman du diamant se rapproche alors de celle obtenue avant exposition plasma. La production de surface est grande probablement du fait des propriétés d'émission électronique du diamant. De surcroît, la couverture d'hydrogène en surface est encore assez élevée pour permettre au mécanisme de pulvérisation d'avoir lieu. Lorsque l'on augmente encore la température, la structure du diamant continue de se reconstruire mais le pourcentage d'hydrogène en surface diminue provoquant une diminution des ions négatifs mesurés.

Ces travaux vont se poursuivre et s'étendre à d'autres matériaux. Le but est d'identifier les propriétés de surface pertinentes jouant sur la probabilité de formation des ions négatifs et d'aller ainsi vers le matériau « idéal ».

### **Remerciements :**

Ces travaux, financés par la communauté européenne au travers du contrat d'association entre EURATOM, le CEA et la FR-FCM (Fédération de Recherche en Fusion par Confinement Magnétique), ont été menés dans le cadre de l'EFDA (European Fusion Development Agreement). Un support financier a également été obtenu de l'Agence National de la Recherche au travers des contrats ITER-NIS (08- BLAN-0047-05) et CAMITER (06-BLAN-0008-01).

### **Références**

- [1] L Schiesko, M Carrère, G Cartry and J M Layet, H<sup>-</sup> production on a graphite surface in a hydrogen plasma, *Plasma Sources Sci. Technol.* 17 (2008) 035023
- [2] L Schiesko, M Carrère, J M Layet and G Cartry, Negative ion surface production through sputtering in hydrogen plasma, *Applied Physics Letters* 95, (2009) 191502
- [3] L Schiesko, M Carrère, J M Layet and G Cartry, A comparative study of H<sup>-</sup> and D<sup>-</sup> production on graphite surfaces in H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> plasmas, *Plasma Sources Sci. Technol.* 19 (2010) 045016
- [4] P Kumar, A Ahmad, C Pardanaud, M Carrère, J M Layet, G Cartry, F Silva, A Gicquel and R Engeln, Enhanced negative ion yields on diamond surfaces at elevated temperatures, *Fast track communication, J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 (2011) 372002