



HAL
open science

L'Interface Plasma-Paroi

Hugo Bufferand, Régis Bisson

► **To cite this version:**

| Hugo Bufferand, Régis Bisson. L'Interface Plasma-Paroi. Sciences en Fusion, 2020. hal-03219163

HAL Id: hal-03219163

<https://amu.hal.science/hal-03219163>

Submitted on 6 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'Interface Plasma-Paroi

Dans l'histoire de la recherche sur la fusion par confinement magnétique, l'interface entre le plasma et la paroi n'a pas toujours été sur le devant de la scène. Près de 70 ans après les premiers tokamaks, contrôler le plasma de bord et son interaction avec la paroi est devenu un enjeu majeur et une thématique de premier plan dans la recherche en fusion.

Naissance de la configuration divertor

Au commencement de la recherche sur la fusion par confinement magnétique, dans les années 1950, l'enjeu principal était de trouver une configuration magnétique permettant de maximiser le confinement pour obtenir le **plasma** le plus chaud possible et ainsi permettre la réaction de fusion des isotopes de l'hydrogène, Deuterium et Tritium. Les performances de la configuration **tokamak** s'améliorant, l'énergie du plasma en contact avec la paroi a fini par être telle que le choix des matériaux composants cette première paroi devint critique. Au contact du plasma énergétique, des atomes et agrégats d'atomes de la paroi peuvent être arrachés et ainsi polluer le plasma d'hydrogène, dégradant ses performances. Pour limiter cette pollution par **érosion**, la configuration magnétique **divertor** a été imaginée pour maximiser la distance entre le plasma chaud et la paroi, en créant une zone intermédiaire de plasma sacrificiel dédié aux interactions plasma-paroi [cf. **article « Notions utiles #1 : comment limiter la taille du plasma »**]. Pour la première fois, le choix de la configuration magnétique n'était plus guidé par l'objectif de confinement mais par la volonté de contrôler l'interface plasma-paroi. Étonnamment, la configuration divertor a également contribué à améliorer significativement le confinement du plasma, le fameux **mode H** de haut confinement, par l'établissement d'une barrière de transport (encore mal comprise) à l'interface entre le plasma confiné et le plasma en contact avec la paroi. La configuration divertor est aujourd'hui la configuration de référence retenue pour le design des futurs réacteurs à fusion dont **ITER**.

Extraire la puissance sans dégrader la paroi

Si le confinement magnétique permet de concentrer l'énergie du plasma pour permettre la fusion nucléaire, il concentre aussi le dépôt d'énergie sur la paroi. Alors que l'extraction d'énergie ne posait pas de problème sur les petits tokamaks des années 50, il en est autrement sur un réacteur à fusion comme ITER où un cinquième des 500 MW de puissance générée par fusion se voit potentiellement déposée sur une surface très modeste, principalement sur les tuiles du divertor. Bien que des stratégies de dissipation assistées par collisions seront employées en amont des surfaces exposées [cf. **article #2 « Comment mettre le soleil en boîte »**], les matériaux et technologies des composants face au plasma doivent être capables de supporter des flux d'énergie comparables à ceux présents au voisinage de la surface du soleil. En plus de l'extraction de puissance, la paroi a un rôle prépondérant dans le bilan de matière [cf. **article #3 « Physique des flux de matière »**]. Ainsi, au cours d'une décharge plasma du réacteur ITER, les isotopes de l'hydrogène du plasma ne cesseront de se neutraliser au niveau de la paroi pour y être momentanément piégés puis très majoritairement réémis vers le plasma procédant ainsi à ce qu'on appelle le **recyclage** du plasma. Avant de subir une réaction de fusion dans le plasma de cœur, on compte qu'un isotope de l'hydrogène sera recyclé autour de 100 000 fois sur les parois. Au vu du très grand nombre d'interactions élémentaires entre les ions du plasma et la paroi, cette dernière peut lentement s'éroder et ainsi contaminer le plasma en impuretés. L'éjection de ces impuretés du plasma et leur re-déposition contribueront à la formation de poussières [cf. **article #4 « Poussières dans un tokamak »**]. Le choix des matériaux est ainsi crucial pour limiter ce

phénomène et c'est le tungstène qui a été retenu pour le divertor d'ITER, en vertu de son faible taux de pulvérisation, de sa bonne résistance mécanique, de sa faible affinité avec les isotopes de l'hydrogène etc...

Recherche interdisciplinaire et physique multi-échelle

La compréhension des phénomènes à l'interface plasma-paroi est aujourd'hui un sujet clé de recherche au sein de la communauté fusion, notamment en France. De nombreuses expériences dédiées à l'étude de l'interaction plasma-paroi sont en cours. On peut mentionner par exemple le tokamak **WEST** à l'IRFM qui étudie l'opération d'un plasma avec une paroi en tungstène et qui prépare l'opération d'ITER en testant notamment les composants face au plasma de son divertor. Différents diagnostics sont mis en œuvre pour mesurer les quantités caractérisant l'extraction de puissance ou bien encore l'érosion de la paroi [cf. **article #5 « Mesurer l'interaction plasma paroi »**]. En complément de l'expérience, l'étude de l'interaction plasma-paroi a recours à la modélisation numérique [cf. **articles #6 « Modélisation multi-échelle, côté paroi »** et **#7 « Modélisation multi-échelle, côté plasma »**] pour mieux comprendre les comportements expérimentaux actuellement observés et à terme prédire les futures expériences sur ITER. Une difficulté majeure de l'étude des interfaces au bord du plasma réside dans la large gamme d'échelles et de disciplines physiques impliquées, de la thermodynamique hors-équilibre à la **turbulence** plasma, de la physique atomique à la physique des matériaux en passant par la chimie quantique. Une part importante du travail de modélisation résidera donc dans l'intégration des différents modèles pour avoir une vision globale des interactions entre le plasma et la paroi.

Des observations expérimentales encore imparfaitement expliquées

Si l'étude de l'interaction plasma-paroi revêt aujourd'hui une importance particulière du point de vue technologique pour l'opération des réacteurs à fusion, elle reste aussi une thématique fondamentale en physique des plasmas tant les effets de la paroi sur le plasma restent mal compris. On peut citer par exemple la formation de la barrière de transport caractéristique du mode H évoquée plus haut [cf. **Sciences en Fusion #1**] ou encore l'impact des matériaux de la paroi sur la qualité du confinement : le tokamak européen JET obtenait un meilleur confinement avec une paroi en carbone qu'avec une paroi métallique. Ces deux exemples importants illustrent que les résultats expérimentaux sont en quelque sorte « en avance » sur la théorie, les phénomènes observés n'étant pas encore complètement expliqués ou modélisés.

Dialogue fondamental-appliqué

L'interface plasma-paroi comporte donc encore de nombreux défis à relever et se révèle comme une zone d'échange permanente entre théorie et expérience, entre approches fondamentales et appliquées, entre physiciens, chimistes et numériciens. Ce dialogue entre plusieurs disciplines fait de l'interaction plasma-paroi l'une des communautés les plus vivantes et imaginatives du moment où les prochaines découvertes fondamentales et technologiques ne manqueront pas de contribuer à l'avancement des connaissances et au développement de nouvelles sources d'énergie décarbonnées.

Référence

P. C. Stangeby, « The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices », CRC Press (2000)