HAL open science

Physique des flux de matière

Bernard Pégourié, Régis Bisson

▶ To cite this version:

Bernard Pégourié, Régis Bisson. Physique des flux de matière. Sciences de la Fusion, 2020, 3. hal-03219153

HAL Id: hal-03219153

https://amu.hal.science/hal-03219153v1

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.

Physique des flux de matière

Dans un réacteur de fusion deutérium-tritium par confinement magnétique, la première paroi devra assurer simultanément la régénération du tritium et le contrôle des flux de chaleur et particules à la périphérie du plasma. La grande inhomogénéité des flux sur la paroi et la forte sensibilité des performances du cœur à la présence de particules érodées représentent un vrai défi pour les réacteurs futurs. Celui-ci ne pourra être relevé que par un effort conjoint de simulation intégrant la paroi de façon explicite et de travaux de laboratoire pour comprendre en détail les phénomènes élémentaires régissant les interactions plasma-matériaux.

Dans un réacteur de fusion tel que le **tokamak ITER**, le rôle de la première paroi est multiple. La paroi éloignée du **plasma** (tuiles de la couverture) doit collecter les 4/5 de la puissance de fusion portée par les neutrons (**Figure 1**) et assurer la régénération du tritium. Les composants de paroi au contact du plasma (tuiles du **divertor**) doivent quant à eux récupérer le 1/5 de la puissance de fusion restant, sous forme de **rayonnement** et de flux de particules, et assurer leur neutralisation pour que les cendres (He) produites par les réactions de fusion puissent être pompées. Pour des raisons de viabilité économique et de sureté nucléaire, ceci doit être fait en maximisant la durée de vie des composants de paroi (plusieurs années dans un réacteur) tout en minimisant la quantité de tritium radioactif piégée (limitée à 700 g dans l'enceinte d'ITER) et en réduisant la formation de débris et poussières (limités à 1000 kg dans ITER) [1].

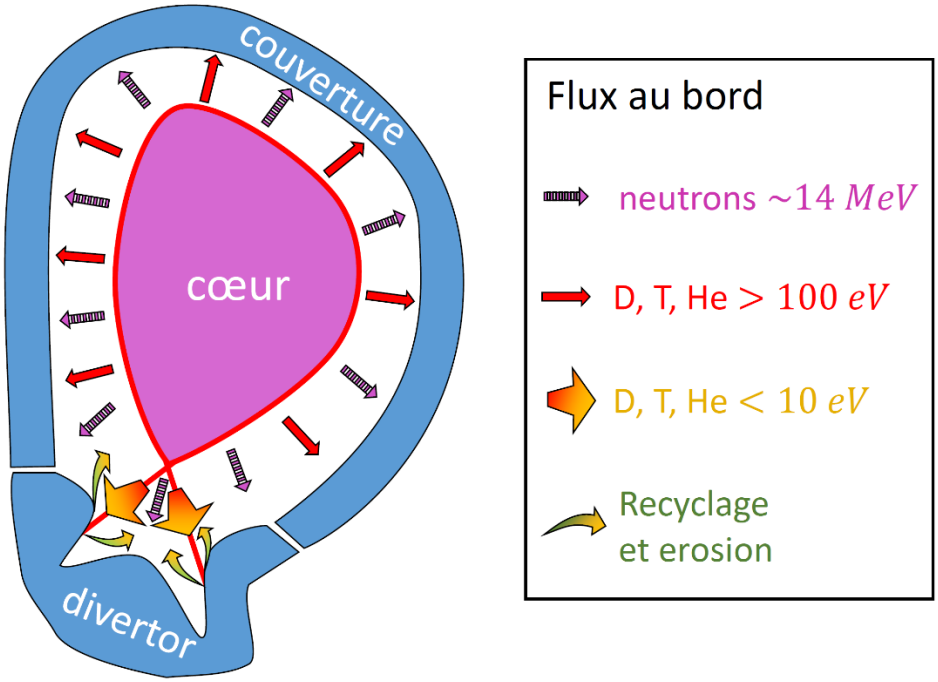

*Figure 1 : Représentation schématique des différents flux aux parois dans la configuration divertor utilisée pour ITER avec l'ordre de grandeur des **énergies cinétiques** des particules associées.*

Flux et énergie sur les composants de paroi

La répartition des flux de particules sur la paroi dépend de la configuration de confinement utilisée et peut être très inhomogène en intensité et en énergie (**Figure 1**) [2]. A l'extérieur du plasma confiné, là où les **lignes de champ** magnétique sont interceptées par les tuiles de la paroi du divertor [**cf. article #2 « Comment mettre le soleil en boîte »**], le transport parallèle aux lignes de champ domine et, celui-ci étant beaucoup plus rapide que le transport transverse (dans un rapport ~10^6-10^7), la surface d'interaction s'en trouve très réduite. De par ce simple effet géométrique, le flux à la paroi est très localisé. A cet effet il faut ajouter celui de la configuration magnétique [**cf. article « Notions utiles #1 : comment limiter la taille du plasma »**]. En configuration limiteur, où des tuiles massives délimitent directement le volume de confinement, le flux ionique sera de l'ordre de ~10^{23} $m^{-2}s^{-1}$ avec une énergie d'impact des particules proche de celle avec laquelle elles ont quitté le plasma confiné (~100 **eV**). A contrario, en configuration divertor, où les tuiles massives sont physiquement éloignées du plasma de fusion et où le flux de particules est détourné par la présence d'une séparatrice magnétique, les phénomènes de friction entre particules provenant du plasma et particules réémises par le divertor (par **recyclage**) entrainent une augmentation du flux ionique qui atteindra alors ~10^{24} m^{-2} s^{-1}. Le flux de chaleur étant conservé, l'énergie moyenne des particules incidentes sur la paroi est plus basse en configuration divertor (<10 eV) qu'en configuration limiteur**.**

Recyclage du carburant et des cendres de fusion

Les ions (D, T ou He) provenant du plasma et impactant les tuiles du limiteur ou du divertor peuvent après neutralisation et selon leur énergie et leur angle d'incidence, soit être réfléchis vers le plasma avec une énergie proche de leur énergie incidente, soit pénétrer sous la surface de la tuile, dans son volume. Une partie des ions neutralisés implantés dans le volume peut rester piégée dans le matériau, l'autre partie pouvant diffuser vers la surface et être réémise vers le plasma, après une étape de recombinaison moléculaire en surface pour D et T. Ces atomes et molécules qui quittent la paroi après migration dans le volume ont une énergie proche de la température de la paroi. Cet échange permanent de particules entre le plasma et la paroi est nommé recyclage et est un paramètre important pour le contrôle des décharges plasma. En effet, lorsqu'un matériau de tuile lie fortement (chimiquement) un ion incident neutralisé (cas des tuiles en carbone) ou qu'il favorise sa diffusion dans le volume (cas de certains métaux tel que le tungstène) il a un effet pompant. Ce pompage par la paroi favorise les décharges à haute performance et l'accession au **mode H**, dans lequel sont opérés la plupart des tokamaks actuels, mais la rétention de l'isotope radioactif de l'hydrogène T par les composants de la paroi doit être contrôlée pour ne pas dépasser la limite autorisée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire. De même que la répartition des flux sur la paroi des tokamaks est très inhomogène, le recyclage peut largement varier d'un endroit à l'autre du réacteur, dans l'espace et dans le temps, certains composants en contact avec le plasma pouvant s'avérer pompant ou dégazant suivant les conditions locales de flux de particules et de température.

Endommagement microscopique et érosion

L'irradiation de la paroi par des flux de particules ne se limite pas au divertor. L'ensemble de la paroi est impacté par des flux plus faibles (~10^{20}-10^{22} $m^{-2}s^{-1}$), mais de plus haute énergie (dans une gamme 10 eV - 1 keV), résultant soit des réactions d'échange de charge dans le plasma confiné, soit d'une **instabilité** périodique du bord du plasma, les **ELMs** (pour Edge Localized Modes) [**cf. Sciences en Fusion #2**], caractéristique du mode H de confinement. Ajoutant à cela que la gaine électrostatique qui s'établit à l'interface plasma-matériau accélère les ions, leur conférant une énergie supplémentaire (proportionnelle à l'état de charge de l'ion et à la température des électrons) [**cf. article « Notions utiles #2 : physique de la gaine »**], il s'ensuit que l'ensemble des composants proches du plasma dans un tokamak subit un flux de particules de ~10^{20}-10^{24} $m^{-2}s^{-1}$, l'énergie des particules incidentes (D, T, He, impuretés) s'étalant de quelques eV au ~keV. A haute énergie, les ions impactant un solide commencent par perdre de l'énergie par collision avec les électrons du matériau, puis avec les ions, provoquant des cascades de déplacements atomiques. Quand les collisions ioniques ont lieu suffisamment près de la surface, des atomes du matériau peuvent être éjectés vers

le plasma. Ce phénomène d'**érosion** physique présente une énergie seuil, proportionnelle à l'énergie de liaison du solide impacté et au rapport des masses des particules cible et incidente. Des composés chimiques, éventuellement volatiles, peuvent également se former à la surface du matériau (hydrocarbures, CO_2, oxydes métalliques…). On parle alors d'érosion chimique. Au niveau macroscopique, l'irradiation par le plasma crée des défauts structuraux dans le matériau (lacunes, interstitiels, dislocations) et provoque une réorganisation du matériau. Dans les réacteurs à paroi métallique, l'hélium issu des réactions de fusion forme des bulles dans le volume à proximité de la surface (~10 nm), dégradant les propriétés des surfaces. Sur le long terme, dans un réacteur, l'irradiation par les neutrons de fusion créera des défauts en profondeur dans le matériau, transmutera certains atomes par réaction de capture neutronique ou de spallation, pouvant conduire à un gonflement sensible du matériau. Cette modification de la structure cristalline peut amener à la modification des propriétés thermomécaniques des tuiles, à l'apparition de cloques et fissures fragilisant la surface des composants en contact avec le plasma et pouvant aller jusqu'à l'émission de débris macroscopiques [1].

Conséquences macroscopiques de l'impact des particules sur les composants de paroi

Une pénétration excessive d'impuretés dans le plasma de cœur entraînant inéluctablement une baisse de la température par rayonnement et/ou une baisse de la densité de réactifs (D et T) par dilution, les conséquences de l'interaction plasma paroi sur la performance des plasmas et le contrôle des décharges peuvent être inférées de la circulation des impuretés et particules dans le réacteur. En premier lieu vient l'érosion du matériau des composants en contact avec le plasma (Figure 2) soit par le flux d'ions D ou T, soit par des impuretés déjà présentes à l'état de traces (C, O…). Ces atomes érodés pénètrent dans le plasma confiné et rayonnent une partie de la puissance. S'il s'agit d'éléments légers (C, B, Be, Li…), le rayonnement est localisé à la périphérie du plasma, là où ces atomes ne sont que partiellement ionisés. Cette configuration facilite le contrôle de la décharge car elle diminue la charge thermique sur le divertor sans affecter significativement le plasma de cœur. A l'inverse, s'il s'agit d'éléments lourds (Cu, Fe, Ni… à plus forte raison W), le rayonnement est concentré au centre du plasma de fusion car ces éléments ne sont jamais complètement ionisés, même aux plus hautes températures (~10 keV). Cette configuration est délétère, car la perte de puissance associée refroidit significativement le plasma de cœur, jusqu'à pouvoir provoquer l'arrêt brutal de la décharge. Il s'ensuit que si, dans le cas d'une première paroi faite d'un matériau léger, une érosion modérée peut être tolérée (conduisant à une concentration d'impuretés de quelques 10^{-2} dans le plasma confiné), les conditions de bord du plasma doivent être très soigneusement contrôlées dans le cas d'une paroi en matériau lourd pour minimiser au maximum l'érosion de la paroi (concentration d'impuretés $<10^{-4}$ dans le plasma confiné). De par l'éloignement physique des tuiles dans la configuration divertor, la pénétration des impuretés dans le plasma de cœur est diminuée, autorisant ainsi des performances accrues et expliquant que tous les tokamaks actuels utilisent cette configuration. Dans le plasma confiné, les particules érodées sont expulsées vers le plasma de bord par les phénomènes de transport (**turbulence**, collisions). Une partie d'entre elles impacte la paroi avec une énergie suffisante pour éroder celle-ci et participer ainsi - plus efficacement que les ions D ou T - à la génération d'impuretés. L'autre partie de ces particules, de basse énergie, forme des dépôts dans la chambre à vide, y compris dans des zones à l'abri du flux direct du plasma (Figure 2). L'épaisseur de ces dépôts augmente au fur et à mesure du temps de plasma cumulé. Selon l'élément considéré (C, Be), ces dépôts peuvent piéger les isotopes de l'hydrogène et contribuer ainsi significativement à accroître la quantité de tritium stockée dans le réacteur. Quand ces couches atteignent une épaisseur critique qui dépend de leur composition (~100 µm), les contraintes internes sont suffisantes pour que le dépôt s'écaille, soit expulsé vers le plasma et perturbe fortement la décharge, jusqu'à provoquer son arrêt brutal [3]. Dans les réacteurs à paroi métallique, le flux de chaleur associé peut provoquer la fusion locale de composants

particulièrement exposés (bord d'attaque des tuiles du divertor) et provoquer l'expulsion de gouttelettes de métal fondu [**cf. article #4 « Poussières dans un tokamak »**].

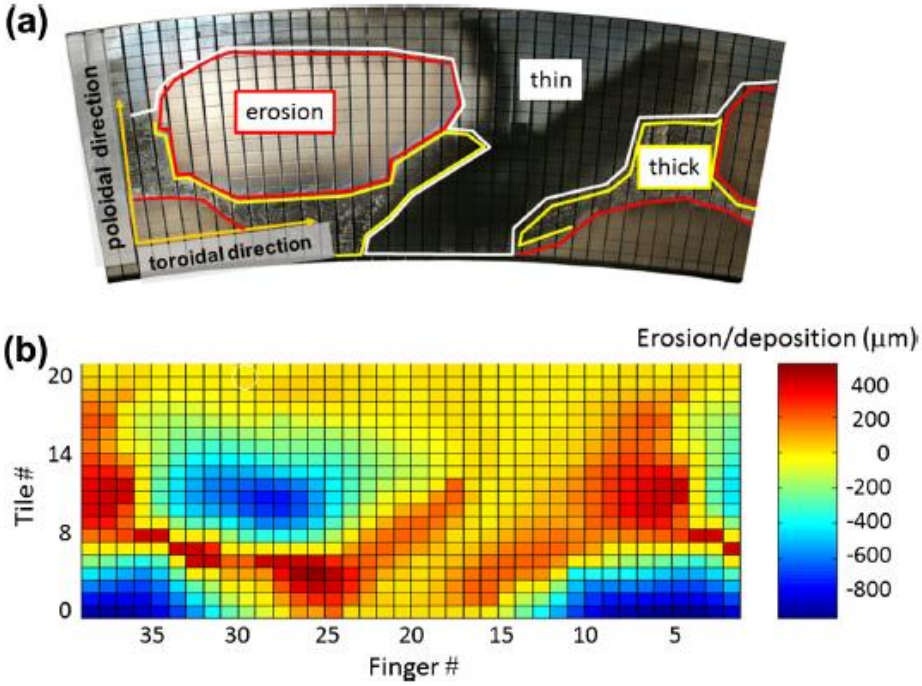

Figure 2 : (a) photographie d'un composant en carbone érodé du limiteur de Tore Supra (IRFM, CEA Cadarache), les zones d'érosion et de déposition sont indiquées. (b) mesure par microscopie confocale des profils correspondants. B. Pégourié et al.*, J. Nucl. Mater.* ***438*** *(2013) S120.*

Choix des matériaux pour les parois

Les processus décrits ci-dessus éclairent l'historique des matériaux utilisés pour les composants en contact avec le plasma dans les tokamaks. La première génération de tokamaks (1960-1980) était de taille et de performance modestes. La configuration limiteur était utilisée et l'énergie des particules impactant la paroi suffisamment faible pour que de l'inox (Inconel) puisse être utilisé comme matériau de première paroi. Cependant, avec l'augmentation de la puissance couplée, l'érosion des parois a augmenté et le rayonnement de cœur associé à la pénétration d'impuretés lourdes (Ni, Cr, Fe) a provoqué l'écroulement des performances. C'est pourquoi la seconde génération de tokamaks (1990-2010) a privilégié les matériaux légers (C, B, Be, Li), soit sous forme massive, soit en couche mince. Associés à la configuration divertor, ils ont permis de réaliser des décharges stables, longues, et de performance élevée. Le prix à payer en a été une érosion significative des composants en contact avec le plasma et une rétention parfois importante des isotopes d'hydrogène (essentiellement D pour les tokamaks de cette génération). Ces deux derniers points empêchant l'utilisation de ces matériaux pour des tokamaks de la classe d'un réacteur (temps de vie top faible des composants de paroi et rétention du tritium trop élevée), les réacteurs actuellement en construction (2010-2030) reviennent à des matériaux plus lourds (Mo, W), mais possédant de bonnes propriétés thermomécaniques, en tirant parti des avancées faites dans le contrôle du plasma de bord pendant les deux décennies précédentes, empêchant ainsi une érosion trop importante du matériau de première paroi. Malgré les progrès réalisés, la gestion de l'interaction plasma-paroi reste un défi majeur pour les réacteurs du futur et un champ de recherche très actif, couvrant aussi bien l'exploration de nouvelles configurations divertor (snow-flakes, super-X, [**cf. article #2 « Comment mettre le soleil en boîte »**]) que le développement de nouvelles technologies pour les composants de la paroi en contact avec le plasma (paroi liquide utilisant le lithium ou l'étain).

Compréhension et intégration de la physique des interactions plasma - paroi

Une des difficultés de l'analyse des composants de paroi des tokamaks est que les échantillons prélevés ont été soumis à des conditions d'exposition variables durant une, voire plusieurs campagnes expérimentales pouvant cumuler plusieurs heures de plasma. Dès lors, des études sont menées en laboratoire sur des dispositifs expérimentaux dédiés (Figure 3) pour obtenir des conditions contrôlées d'irradiation de particules et quantifier précisément les divers paramètres caractérisant l'interaction particule-matériau (taux d'érosion, coefficient de réflexion, modification des propriétés du matériau…). Parallèlement, des modèles **cinétiques** basés sur des équations de réaction-diffusion sont développés pour décrire le comportement des matériaux sous irradiation. Les paramètres cinétiques (énergies d'activation, fréquence de dépiégeage…) sont soit mesurés dans les expériences de laboratoire susmentionnées [4], soit déterminés par des calculs de dynamique moléculaire [**cf. article #6 « Modélisation multi-échelle, côté paroi »**]. Couplés à des calculs thermiques décrivant l'évolution en température des composants de paroi sous irradiation, ces modèles sont introduits comme conditions aux limites dans les codes simulant le plasma de bord, permettant ainsi un traitement auto-cohérent du recyclage, des flux et de l'interaction plasma-paroi [5].

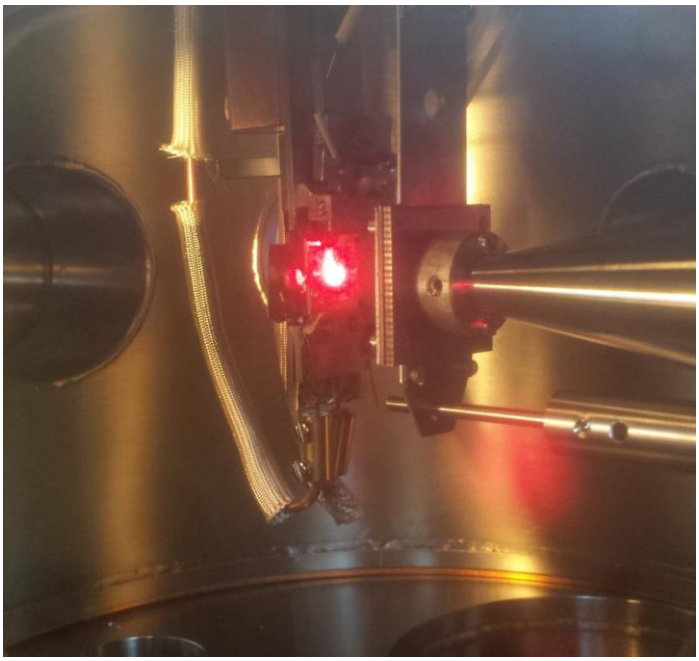

Figure 3 : Dispositif expérimental AMU-PSI permettant d'irradier des échantillons de parois avec des faisceaux d'ions et de mesurer les paramètres cinétiques de réémission des particules neutres (laboratoire PIIM, Aix-Marseille Université, CNRS)

Références

[1] **Y. Ueda *et al.***, « Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion », *Nucl. Fusion*, **57**, 092006 (2017)
[2] **R. Wenninger *et al.***, « The DEMO wall load challenge », *Nucl. Fusion*, **57**, 046002 (2017)
[3] **B. Pégourié *et al.***, « Overview of the Deuterium Inventory campaign in Tore Supra : operational conditions and particle balance », *J. Nucl. Mater.*, **390-391**, 550 (2009)
[4] **E.A. Hodille *et al.***, « Retention and release of hydrogen isotopes in tungsten plasma-facing components: the role of grain boundaries and the native oxide layer from a joint experiment-simulation integrated approach », *Nucl. Fusion*, **57**, 076019 (2017)
[5] **H. Bufferand *et al.***, « Three-dimensional modelling of edge multi-component plasma taking into account realistic wall geometry », *Nucl. Mat. Energy* ,**18,** 82 (2019)