



L'Administrateur Général

energie atomique • énergies alternatives

Monsieur Jean-Pierre Petit
BP 55
84 122 Pertuis

Saclay, le 15 Septembre 2011

N/Réf : Cab/Ag/336

Monsieur,

Par deux lettres ouvertes en dates des 25 et 26 août 2011, en tant que sympathisant de l'association « sortir du nucléaire », vous m'interrogez sur des points particuliers du fonctionnement envisagé de l'installation ITER telle que prévue pour être construite sur le site de Cadarache.

Je vous remercie vivement pour l'intérêt que vous portez à ce grand projet de recherche et pour votre souhait d'en comprendre le fonctionnement détaillé et les éventuelles limites par rapport à des objectifs qui sont les vôtres.

Je suis surpris cependant qu'en tant qu'ancien membre du CNRS vous estimiez nécessaire de passer par moi pour nouer ce dialogue avec la communauté de la fusion plutôt que de vous adresser directement à Messieurs Marbach et Chatelier que vous connaissez nécessairement, en tant qu'ancien physicien des plasmas.

Une des questions que vous posez concerne le rayonnement de freinage.

"Comment les concepteurs d'ITER envisagent-ils de lutter contre le puissant refroidissement dû au rayonnement de freinage consécutif à l'arrachement de noyaux lourds à la paroi?"

Votre question aborde un des éléments importants de l'atteinte des conditions nécessaires à la réaction de fusion.

En effet comme vous le savez bien, dans un plasma, les électrons sont freinés et déviés du fait de leur interaction avec les ions présents dans le plasma. Or, selon les équations de Maxwell, toute charge dont la vitesse varie, en valeur absolue ou en direction, rayonne. Ce rayonnement, dit "Bremsstrahlung", correspond à un terme de perte dans le bilan de puissance du plasma. Si ce terme de perte est trop



important, il peut empêcher de chauffer le plasma aux températures nécessaires pour assurer une production d'énergie par réaction de fusion.

Ce rayonnement est proportionnel à la densité du plasma au carré, à la racine carrée de la température des électrons dans le plasma et à la charge effective (Z_{eff}) du plasma. La charge effective est la moyenne de la charge des ions dans le plasma:

$$Z_{\text{eff}} = \sum_Z Z^2 \frac{n_Z}{n_e}$$

où n_Z est la densité des ions portant une charge électrique Z . Cette formule permet de constater que plus le plasma sera contaminé par des ions "lourds" donc à nombre de charge Z élevé, plus le terme perte de Bremsstrahlung sera important.

Historiquement, ce problème était considéré comme devant être résolu en priorité dans les années 1970, car à l'époque des premiers tokamaks les éléments de paroi en interaction forte avec le plasma (là où le matériau faisant face au plasma est bombardé par les particules du plasma et est susceptible d'être érodé et de relâcher dans le plasma des impuretés contaminant le plasma) était composé d'éléments lourds (typiquement du molybdène). A cette époque, la charge effective du plasma et donc le rayonnement Bremsstrahlung pouvaient être élevés.

Dans les années 1980, une première solution a été mise en œuvre en remplaçant dans les composants face au plasma (CFP) les éléments lourds par des éléments légers (carbone (C) dans les zones de forte interaction avec le plasma, béryllium (Be) dans les zones plus éloignées). Cela a permis de rendre le rayonnement Bremsstrahlung négligeable par rapport aux puissances de chauffage du plasma (typiquement de 1 à 4% de la puissance additionnelle).

Enfin, toujours dans les années 1980, puis 1990, un nouveau dispositif, permettant de contrôler l'interaction entre le plasma et la paroi, a été mis au point. Il s'agit du divertor axisymétrique qui permet d'éloigner le plasma confiné (susceptible de piéger les impuretés) du lieu où l'interaction plasma-paroi prend place. Ce dispositif permet, en plus d'écranter les impuretés provenant de la paroi du divertor, de contrôler la température du plasma de bord en interaction avec la paroi. Cette capacité permet d'envisager d'utiliser, pour les composants face au plasma, des matériaux lourds comme le tungstène (W) dont l'érosion est négligeable lorsque la température du plasma de bord est suffisamment basse (<10 eV). Cette solution a été mise en œuvre avec succès dans le tokamak ASDEX-U qui a démontré que la charge effective du plasma (de l'ordre de 1.5-2) était tout à fait comparable dans une situation où tous les CFP étaient recouverts de tungstène par rapport à l'ancienne configuration d'ASDEX où les CFP étaient recouverts de carbone [1]. Un divertor tungstène va être également testé cette année et l'année prochaine dans le tokamak JET, le reste de la paroi étant recouvert de béryllium.

Concernant ITER, la paroi (hors divertor) sera recouverte de béryllium. Le divertor de première génération sera composé de CFP recouverts de carbone dans la zone d'interaction forte avec le plasma et recouverts de tungstène dans la zone d'interaction faible avec le plasma. Lors du passage à la phase active d'ITER avec opération en mélange deutérium et tritium, les composants face au plasma du divertor seront entièrement recouverts de tungstène (la configuration des CFP sera alors la même que celle qui va être testée dans JET). Toutefois, il faut noter que si la charge effective dans le plasma d'ITER est



prévue du même ordre de grandeur que dans les machines actuelles, la température et la densité du plasma sera bien plus importante ce qui va augmenter la puissance Bremsstrahlung. Celle-ci restera toutefois inférieure à la puissance de chauffage du plasma. Typiquement, pour le scénario à gain fusion de 10 d'ITER, la puissance Bremsstrahlung est estimée de l'ordre de 20 MW pour une puissance de chauffage du plasma de 120 MW [1].

Bien sûr, même si l'ensemble des résultats obtenu sur les machines actuelles et leur modélisation indiquent que le rayonnement Bremsstrahlung ne sera pas un souci pour ITER, seul l'expérimentation sur ITER apportera la confirmation ultime de la justesse de l'extrapolation.

Pour ce qui est de l'expression « plasma intense », il s'agit d'une erreur de retranscription. L'expression utilisée par M. Chatelier était « plasma dense ». Monsieur Chatelier a voulu indiquer qu'une densité de plasma élevée dans la zone extérieure du plasma (au-delà de la zone centrale où ont lieu les réactions de fusion) permet de rayonner, par rayonnement de freinage en particulier, une quantité importante de la puissance permettant de réduire le flux et l'énergie des particules chargées résiduelles à la paroi. Le phénomène d'arrachage d'ions lourds de la paroi s'en trouve réduit d'autant, et donc en raison de l'équation évoquée plus haut, la puissance Bremsstrahlung émise au cœur du plasma limitée d'autant. On comprend que l'optimisation du flux d'impuretés entre le centre et la périphérie du plasma soit un programme de recherche en soi qu'ITER abordera.

Pour ce qui est des matériaux utilisés pour la construction d'ITER comme dans les centrales nucléaires de fission, leur comportement sous bombardement neutronique fait l'objet depuis de très nombreuses années d'expériences, en particulier au JET ou à Tore Supra ou dans les laboratoires du CEA et d'EDF. Je vous invite à prendre connaissance des éléments figurant dans l'ouvrage "La Métallurgie, sciences et ingénierie", Rapport commun Académie des sciences - Académie des technologies, Éditions EDP Sciences - Janvier 2011.

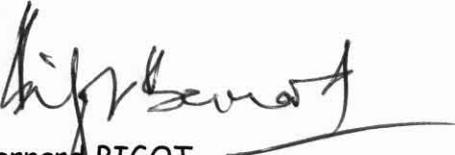
Par ailleurs, votre connaissance du projet IFMIF est incomplète. Actuellement, un programme de démonstration, IFMIF-EVEDA, de faisabilité et de performance d'un accélérateur de la puissance nécessaire et la cible correspondante pour produire le flux de neutrons recherché est en cours sur le site de Rokkasho-Mura au Japon et il n'a jamais été question de construire IFMIF avant que les résultats de ce programme soient obtenus. ITER sera construit avec des matériaux dont la qualité est établie pour répondre aux exigences de sûreté de son fonctionnement. Mais, parce que ITER est un instrument de recherche des échantillons des matériaux innovants destinés à être utilisés dans le futur démonstrateur industriel DEMO pourront être introduits dans l'enceinte pour tester leur comportement, après démonstration de sûreté.

Passionné que vous êtes par le projet ITER, et fortement intéressé par sa réussite, comme je peux le constater, pour les autres questions particulières posées, je vous invite à vous connecter sur les sites du JET à Culham, de l'Institut de recherche sur la fusion magnétique du CEA (IRFM) qui abrite Tore Supra, et de l'Institut de Physique des plasmas de Munich (IPP) qui abrite ASDEX pour établir le contact avec les chercheurs de ces centres.



energie atomique • énergies alternatives

Je vous prie de croire, Monsieur, en l'assurance de ma considération distinguée.


Bernard BIGOT

[ⁱ] Kallenbach A., Nucl. Fusion, **49** (2009) 045007

[ⁱⁱ] Johner J., Fusion Science and Technology, **59** (2011) 308-349