

## Electrons découplés dans les tokamaks

<sup>1</sup>C. Reux\*, JET contributors, WEST Team

\*conférencier principal

<sup>1</sup> CEA-IRFM, F-13108 Saint-Paul-les-Durance, France

\* cedric.reux@cea.fr

Les électrons découplés « runaways » apparaissent dans les plasmas lorsque des champs électriques intenses accélèrent des électrons davantage que ceux-ci ne sont freinés par les collisions : ils se « découplent » de leur plasma. Théorisés à la fin des années 1950 et découverts dans les premiers stellarators et machines à striction axiale, ils ont depuis été observés dans les plasmas solaires ainsi que dans la foudre. Les principaux objets de recherche concernés par les électrons découplés sont néanmoins les tokamaks.

Les plasmas de tokamaks sont sujets à des instabilités magnétohydrodynamiques macroscopiques appelées disruptions qui provoquent l'arrêt prématuré de la décharge. Elles conduisent à un dépôt brutal du contenu énergétique du plasma dans les composants internes du réacteur, menant à leur endommagement prématuré. Les faisceaux d'électrons découplés sont une des formes que peut prendre ce dépôt d'énergie. Ceux-ci sont créés par le champ électrique induit par la perte du courant plasma à la suite de la disruption. Ils accélèrent jusqu'à des énergies de plusieurs dizaines de MeV, tout en portant une part significative du courant plasma initial. Les électrons découplés sont également présents à l'amorçage de la décharge plasma, du fait des champs électriques élevés nécessaires à la montée initiale du courant. Initialement une simple nuisance sur les premiers tokamaks, ils deviennent de plus en plus problématiques sur les machines de plus grande taille. Ils pourraient représenter jusqu'à 80% des 15 MA de courant plasma initial sur une disruption d'ITER.

Il apparaît donc nécessaire d'empêcher la formation des électrons découplés, et en cas d'échec de cette première ligne de défense, d'être capable d'arrêter un faisceau d'électrons découplés déjà accéléré. Dans les deux cas, la méthode principale actuellement testée est l'injection massive de matière. Une quantité équivalente à plusieurs fois le contenu en particules du plasma est injectée dans le but d'augmenter la densité et la fréquence des collisions pour freiner les électrons. Lorsque l'imminence d'une disruption est détectée, l'injection massive a pour effet de déclencher celle-ci de façon contrôlée et moins dangereuse.

La présente contribution va brosser un rapide tableau des recherches actuelles dans la prévention et la suppression des faisceaux d'électrons découplés dans les tokamaks. En particulier, nous reviendrons sur les résultats expérimentaux récents ainsi que les efforts de modélisation. Le champ de recherche est particulièrement actif depuis la fin des années 1990, et a conduit à des découvertes intéressantes en physique des plasmas. Parmi elles, on peut citer le phénomène d'avalanche multipliant les électrons découplés par collisions, l'importance des processus radiatifs (synchrotron, bremsstrahlung) dans leur dynamique d'accélération, celle des instabilités MHD dans leur dissipation, et la mise en évidence d'un plasma froid qui accompagne le faisceau et influe sur son évolution. Nous reviendrons également sur une méthode d'amortissement du faisceau récemment découverte, qui combine instabilités MHD et suppression de l'avalanche et qui a permis de dissiper sans danger 1.4 MA d'électrons découplés sur JET. Enfin nous illustrerons quelques conséquences inattendues d'un faisceau d'électrons non amorti sur les machines récentes.