

Fusion nucléaire : des scientifiques ont réussi à contrôler des instabilités du plasma

Parmi les défis que la fusion nucléaire doit encore surmonter, celui du confinement magnétique vient de connaître une avancée: des scientifiques du laboratoire de physique des plasmas de Princeton ont réussi à contrôler des instabilités du plasma en fusion.

A l'inverse de la fission nucléaire qui casse un noyau lourd pour en faire deux plus légers, la fusion, processus qui alimente le cœur des étoiles, consiste à assembler deux noyaux atomiques légers pour en faire un plus lourd. Reproduire les conditions menant à la fusion est un défi, car ces réactions ont lieu à des pressions et températures extrêmes, qui atteignent des centaines de millions de degrés Celsius. Dans de telles conditions, la matière est confinée par un champ magnétique sous forme de plasma, du gaz ionisé sous l'effet de la chaleur, dans lequel circulent librement électrons et noyaux atomiques.

Or, le champ magnétique qui confine le plasma possède des irrégularités, infimes, mais qui suffisent à faire dériver la matière en fusion, puis disparaître la réaction de fusion. Une étude publiée dans la revue *Physical Review Letters* explicite une méthode prometteuse qui permettrait de compenser ces irrégularités.

Le confinement magnétique, pour contenir et maintenir la réaction

Pour déclencher une réaction de fusion, la méthode utilisée par les chercheurs consiste à confiner les particules du plasma par un champ magnétique, notamment à l'aide de tokamaks (acronyme russe signifiant "chambre toroïdale avec bobines magnétiques"). Ce sont des structures en forme d'anneaux, appelées tores, autour desquelles sont installées des bobines qui créent un champ magnétique.

Construction des bobines poloïdales qui généreront le champ magnétique dans le tokamak "International Thermonuclear Experimental Reactor" (ITER) à Saint-Paul-les-Durance, dans le Sud de la France. Crédits : CLEMENT MA-HOUDEAU / AFP L'idée est de maintenir les particules chargées du plasma sur des trajectoires fermées, sans qu'elles ne se rapprochent ni trop du centre de l'anneau, ni des parois externes. L'utilisation du champ magnétique, combinée à un apport de chaleur par les parois externes, permet à la fois de chauffer le plasma à des températures favorables à la fusion nucléaire, et de le maintenir confiné. Pour le moment, les recherches se concentrent sur la faisabilité de la fusion nucléaire en tant qu'exploitation industrielle. Notamment au niveau de la configuration magnétique : celle-ci est générée grâce aux bobines qui entourent l'anneau. Le champ magnétique est modulé et possède des distorsions. Mais la trajectoire des particules n'est, en pratique pas complètement symétrique. Tout d'abord, les bobines qui entourent le tokamak sont en nombre fini : le champ magnétique qui en découle, au lieu d'être homogène et axisymétrique, est alors modulé, et sa modulation dépend de l'espacement entre les

bobines. C'est sur cette problématique que travaillent les scientifiques du CEA de Cadarache, dont Xavier Garbet, qui a éclairé Sciences et Avenir sur l'enjeu des recherches autour de la fusion nucléaire. De plus, du fait d'un alignement imparfait des bobines qui génèrent le champ magnétique, celui-ci possède des distorsions, irrégulières, qui rendent le plasma instable. Ces erreurs d'alignement sont minimales, de l'ordre d'un dix-millième de la valeur du champ magnétique, mais elles suffisent pour créer un impact significatif. En effet, le moindre écart d'alignement cause une variation dans le champ magnétique, et crée des instabilités dans le plasma. Enfin, des instabilités sont créées au sein même du plasma, indépendamment des erreurs de champ magnétique. Pour compenser ces instabilités intrinsèques du plasma, des aimants supplémentaires sont placés, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur des tokamaks. " Leur effet sera d'autant plus important qu'elles seront placées proches du plasma en fusion" explique Xavier Garbet, chercheur à l'Institut de Recherche en Fusion Magnétique (IRFM). Mais ces aimants ajoutent d'autres effets : alors qu'ils stabilisent le plasma, ils le ralentissent aussi. Ce freinage peut conduire ensuite à l'émergence de nouvelles instabilités, mais aussi à l'éjection de particules hors du plasma, en particulier des particules alpha (noyaux d'hélium). Celles-ci sont essentielles au maintien de la température de plasma, leur perte peut donc entraîner une baisse de réactivité. C'est sur cette problématique qu'ont travaillé les chercheurs du laboratoire de physique des plasmas à Princeton (PPPL) du Département américain des énergies (DOE). La quasi-symétrie, pour éliminer les distorsions sans avoir les effets secondaires Pour éviter ces effets secondaires des aimants supplémentaires, l'équipe de chercheurs de Princeton a travaillé sur la quasi-symétrie, une classe de perturbations magnétiques qui modifie la trajectoire hélicoïdale des particules de plasma. Cette trajectoire, même si elle n'est pas "symétrique" à proprement parler, confine tout aussi bien le plasma. La technique des chercheurs consiste à créer des perturbations supplémentaires qui viennent compenser les erreurs originelles. "Une manière de préserver leur rotation tout en assurant la stabilité est de changer la forme du champ magnétique, pour que les particules se comportent comme s'il n'y avait pas eu de déformation de champ magnétique", déclare dans un communiqué le physicien du PPPL Jong-Kyu Park, auteur principal de l'étude. Pour cela, les chercheurs ont d'abord effectué une mesure de flux au sein des tokamaks. Grâce à cette mesure, ils ont déduit quelles étaient les erreurs de champ magnétique puis calculé le champ à appliquer ensuite pour les compenser. "Nous devons construire un champ magnétique en 3D quasi-symétrique à l'intérieur du plasma pour induire les particules en erreur, et qu'elles agissent comme si elles n'étaient pas affectées par le champ", continue Park. Des perturbations en première phase de test Ils ont ensuite utilisé des bobines déjà placées dans les tokamaks, pour y instaurer des perturbations magnétiques "quasi-symétriques" : qui ne créent pas de symétrie autour d'un axe mais qui permettent tout de même de confiner le plasma. Des tests ont été effectués sur les tokamaks DIII-D à San Diego et KSTAR en Corée du Sud, pendant lesquels ils ont observé s'il y avait un effet de freinage comme pour les autres perturbations magnétiques. Les résultats ont été enthousiasmants : aucun effet de freinage ou de perte de particules! Le processus "fournit une voie fiable d'optimisation complète des erreurs de champ magnétique dans les plasmas de combustion par fusion", selon l'article. "Ces travaux pourraient être la base sur laquelle les futures stratégies de contrôle pour ces champs seront développées", a expliqué Paz-Soldan, co-auteur de la publication et physicien au tokamak DIII-D. Reste à vérifier si ces perturbations remplissent leur mission première, qui est d'atténuer les instabilités du plasma. Enfin, "la dernière étape", a dé-

claré Park, consistera à appliquer ce concept à ITER, "afin que nous puissions corriger les champs d'erreur dans ce tokamak." Commenter

Commenter

par Léa Fournasson