

FUSION

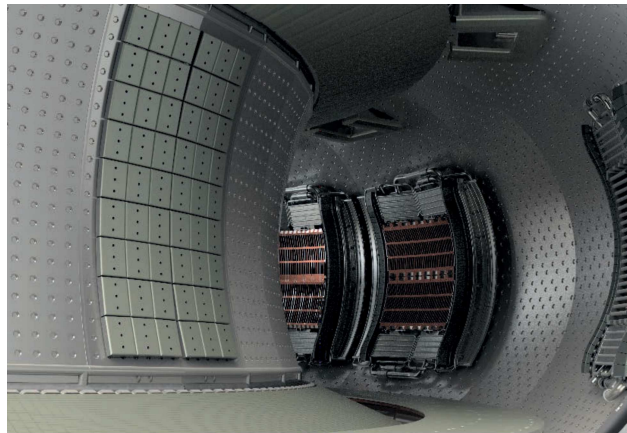
Le cas de l'énergie de fusion

L'énergie de fusion, celle des étoiles, est complémentaire des sources d'énergie renouvelables comme l'éolien et le solaire, qui dérivent elles aussi de l'énergie de fusion du Soleil. Aussi prometteuse qu'elle est difficile à maîtriser sur Terre, l'énergie de fusion présente plusieurs atouts, notamment un combustible quasiment inépuisable présent dans l'eau de mer.

Le potentiel prodigieux de la fusion

Le « cas » de l'énergie de fusion est souvent mis en avant dans l'acronyme qui figure dans la version anglaise de l'expression « the CASE for fusion energy » dans lequel « C » est l'initiale de Clean - pas d'émission de CO₂, pas de déchet radioactif à vie longue, faible impact sur l'environnement, « A » d'Abundant - combustible quasiment inépuisable présent dans l'eau de mer, « S » de Safe - sûre, pas de risque de réaction en chaîne - et « E » d'Economic - réacteur cher mais combustible très peu cher (ce point restant à démontrer !). Tout est dit. L'énergie de fusion est celle qui fait briller les étoiles, nous chauffe et nous éclaire sur Terre depuis quelques milliards d'années et encore pour quelques milliards de plus. C'est une forme d'énergie extraordinairement concentrée puisqu'un demi-litre d'eau peut produire assez d'énergie pour alimenter une voiture électrique sur plus de 30 000 km. De ce point de vue, elle est très complémentaire des sources d'énergies renouvelables très diffuses comme le solaire et l'éolien, elles-mêmes en fait dérivées de l'énergie de fusion dégagée par le Soleil !

La fusion est une source d'énergie aussi prometteuse qu'elle est difficile à maîtriser sur Terre. Si la force gravitationnelle permet de créer les conditions extrêmes nécessaires à la fusion des noyaux d'hydrogène dans les étoiles, d'autres solutions doivent être imaginées sur Terre. Depuis les années cinquante, des centaines de machines de fusion ont été proposées, construites et exploitées. La solution la plus avancée aujourd'hui se base sur l'utilisation de champs magnétiques intenses, dans la configuration dite « tokamak ». Elle vise à confiner un plasma de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène



Pose du boîtier de la bobine basse du divertor West

PAR JÉRÔME BUCALOSSI

(Direction de la recherche fondamentale)



Jérôme Bucalossi est chef du projet WEST à l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (IRFM) du CEA et responsable scientifique du segment « Fusion nucléaire ».

Fig. 1 : A l'intérieur du tokamak WEST.

WEST est le nouveau nom du tokamak Tore Supra, exploité par le CEA à Cadarache, après sa transformation en tokamak en configuration divertor avec point-X et le passage du carbone au tungstène pour l'armure des composants face au plasma. Des prototypes de composants divertor d'ITER sont intégrés dans son divertor (plancher du tore) et vont être exposés à des flux intenses de chaleur et de particules similaires à ceux prévus dans ITER. Ces expériences permettront d'optimiser la géométrie fine de ses composants et d'anticiper leur comportement en fonctionnement normal et accidentel et prédire leur durée de vie.

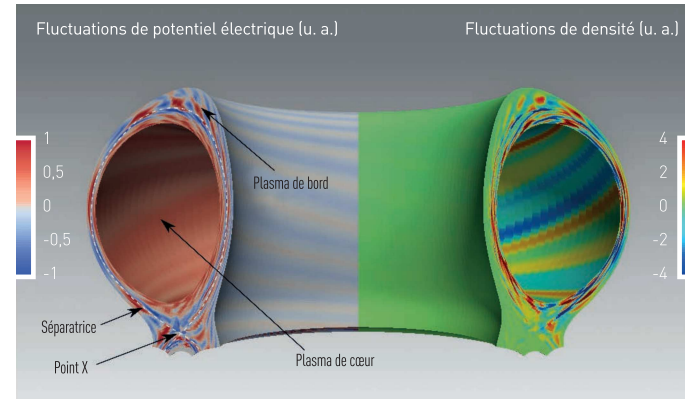


Fig. 2 : Simulation numérique du plasma de bord dans un tokamak avec divertor axisymétrique. La séparatrice est la limite virtuelle entre le plasma confiné, région où les lignes de champ magnétique se referment sur elles-mêmes, et le plasma non confiné, région où les lignes de champ interceptent un paroi. La région du divertor est située sous le point X, point où le champ magnétique poloidal est nul. Le flux de chaleur qui franchit la séparatrice est conduit dans la région du divertor dans une couche limite de quelques millimètres d'épaisseur avant d'impacter les composants ciblés du divertor.

présentant la section efficace de réaction de fusion la plus élevée) chauffé à quelques 150 millions de degrés. Le tokamak européen JET, situé à Culham en Grande Bretagne, a déjà réalisé l'exploit de produire 16 MW de puissance fusion à la fin des années 90 et a permis le lancement du projet ITER en 2007 à Cadarache. ITER est le projet le plus ambitieux au monde dans le domaine de l'énergie, avec pour objectif de démontrer la faisabilité de la fusion comme source d'énergie. ITER doit notamment produire 500 MW de puissance de fusion pendant 400 secondes !

Les défis de la fusion par confinement magnétique

Maîtriser le plasma « en combustion »

Dans les expériences en deutérium-tritium de JET, la puissance dégagée par les réactions de fusion participe d'un programme de recherche au niveau européen dans lequel le CEA, avec son tokamak WEST (voir figure 1), est un des acteurs majeurs au côté de 5 autres instituts européens. L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes qui régissent les dépôts de flux de particules et de chaleur (voir figure 2), de trouver des régimes plasma et des géométries de divertor permettant d'étaler ces flux de chaleur et enfin de développer des composants face au plasma innovants capables de supporter des flux intenses de particules et de chaleur supérieur à 10 MW/m² (à comparer aux 60 MW/m² à la surface du Soleil !). Le matériau privilégié aujourd'hui pour ces composants à très haut flux est le tungstène qui a pour caractéristiques, au-delà de sa température de fusion la plus élevée des éléments, des taux d'érosion et des taux de rétention du tritium très faibles.

leur évacuation sous forme d'hélium neutre dans le divertor, situé dans la partie basse de l'enceinte à vide du tokamak, seront confrontés aux nombreuses simulations en cours de développement et des surprises ne sont pas à exclure. C'est tout l'enjeu d'ITER de montrer que l'on peut contrôler de tels plasmas sur de longues durées.

Évacuer la chaleur et les particules

Les progrès récents de la thermographie infrarouge dans les tokamaks ont mis en évidence de très fortes concentrations de flux de chaleur et de particules sur les composants face au plasma. Les lois empiriques donnant la largeur des dépôts de chaleur en fonction de la taille du réacteur sont actuellement remises en question avec pour conséquence potentielle un flux plus fort que prévu dans le divertor d'ITER et plus généralement une limitation de la puissance accessible par les machines de fusion basée sur la configuration tokamak. Cette découverte a entraîné le lancement d'un programme de recherche au niveau européen dans lequel le CEA, avec son tokamak WEST (voir figure 1), est un des acteurs majeurs au côté de 5 autres instituts européens. L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes qui régissent les dépôts de flux de particules et de chaleur (voir figure 2), de trouver des régimes plasma et des géométries de divertor permettant d'étaler ces flux de chaleur et enfin de développer des composants face au plasma innovants capables de supporter des flux intenses de particules et de chaleur supérieur à 10 MW/m² (à comparer aux 60 MW/m² à la surface du Soleil !). Le matériau privilégié aujourd'hui pour ces composants à très haut flux est le tungstène qui a pour caractéristiques, au-delà de sa température de fusion la plus élevée des éléments, des taux d'érosion et des taux de rétention du tritium très faibles.

« La fusion est une source d'énergie aussi prometteuse qu'elle est difficile à maîtriser sur Terre ».

Tokamak

Acronyme russe désignant une chambre de confinement magnétique en forme de tore

JET

Joint European Torus

ITER

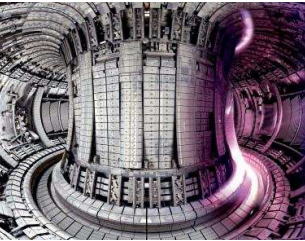
International Thermonuclear Experimental Reactor

WEST

Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak

IFMIF

International Fusion Materials Irradiation Facility



Plasma de JET observé dans la bande de rayonnement visible.

Exploiter les neutrons de 14.1 MeV

Si l'énergie des particules alpha produites par les réactions de fusion est confinée dans le plasma de cœur par le champ magnétique et permet de maintenir le plasma en combustion, celle portée par les neutrons doit être récupérée dans les parois non seulement pour chauffer l'eau qui fera tourner les turbines électrogènes mais aussi pour produire le tritium (par réaction sur le lithium), l'un des deux combustibles de la fusion, non disponible à l'état naturel. La difficulté réside dans l'énergie cinétique très élevée de ces neutrons : 14.1 MeV soit environ 7 fois plus que celle des neutrons « rapides » produits par les réactions de fission. Ces neutrons énergétiques vont endommager en profondeur les matériaux de première paroi en provoquant des déplacements d'atomes dans le réseau cristallin (dpa) et en produisant du gaz en leur sein par transmutation

nucléaire (hydrogène ou hélium). Par ailleurs ces réactions de transmutation ont pour conséquence une activation nucléaire des matériaux. On estime qu'un réacteur de fusion pourrait produire plus de 30 dpa/an (à comparer aux 80 dpa d'une centrale à fission sur toute sa vie). Seuls des matériaux avec une composition chimique et structurelle conçue à dessein pourront résister. La validation et la qualification de tels matériaux doivent se faire dans une installation d'irradiation dédiée capable de générer un flux intense de neutrons de 14 MeV. C'est à cette fin que l'Europe et le Japon mènent depuis 2007, dans le cadre de l'« Approche Elargie », les études d'ingénierie du projet IFMIF. Le CEA est impliqué dans le volet accélérateur qui doit produire deux faisceaux de deutons de 40 MeV d'une intensité de 125 mA chacun. Le rapport final est attendu très prochainement ainsi que le choix d'un site et la décision de construction.

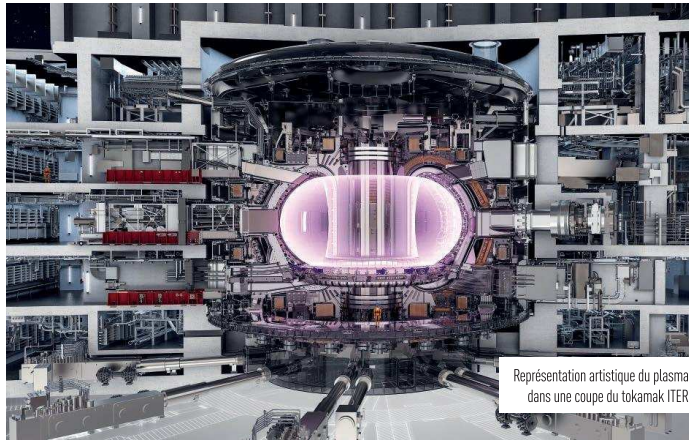
La fusion sera disponible « quand l'humanité en aura besoin, peut-être un peu avant ».

Lev Artsimovitch (1909-1973), père du tokamak



Pour aller plus loin

- A propos de JET www.euro-fusion.org/
- A propos d'ITER www.iter.org/fr/accueil
- A propos de WEST west.cea.fr/en/index.php
- A propos d'IFMIF www.ifmif.org/

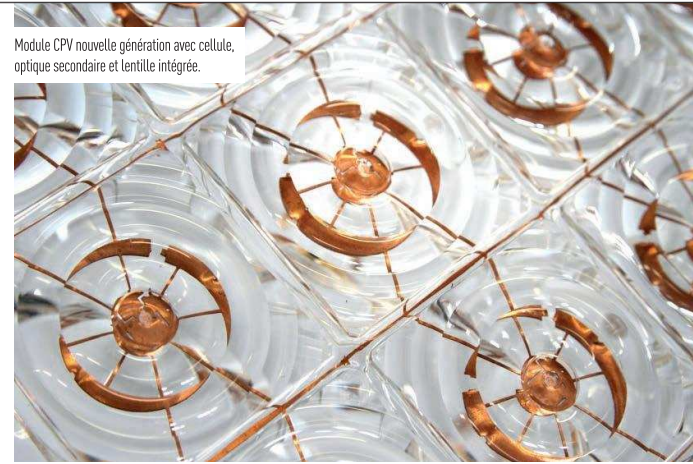


Représentation artistique du plasma dans une coupe du tokamak ITER

Quelle place pour la fusion dans la transition énergétique ?

La fusion sera disponible « quand l'humanité en aura besoin, peut-être un peu avant ». C'est ainsi que l'académicien soviétique Lev Artsimovitch (1909-1973), père du tokamak, répondait à la question de sa disponibilité il y a près de 50 ans. Au niveau mondial, la Chine, la Corée, les États-Unis, l'Europe, l'Inde et la Russie, tous partenaires

d'ITER, développent, sur la base du tokamak en construction à Cadarache, des designs de réacteur électrogène pour l'horizon 2050. Des initiatives privées ont vu le jour ces dernières années en Amérique avec pour objectifs de trouver un moyen plus rapide qu'ITER pour puiser dans cette source d'énergie. Google montre un intérêt... Mais plusieurs décades seront sans doute nécessaires avant de bénéficier d'une électricité de fusion. Les enjeux énergétiques mondiaux sont tels qu'il est essentiel de soutenir les recherches vers cette nouvelle source d'énergie. ■



Module CPV nouvelle génération avec cellule, optique secondaire et lentille intégrée.

PHOTOVOLTAÏQUE

Des innovations en nombre

Dans le domaine du photovoltaïque, un marché de masse s'est installé en quelques années et ouvre la voie à de nouvelles innovations. Les équipes du CEA à l'INES y contribuent activement.

Entre 2005 et 2017, la capacité de puissance photovoltaïque (PV) installée dans le monde est passée de 1 à 310 GWc. Dans la même période, le prix des modules PV est passé de 4 €/Wc à moins de 0,4 €/Wc. En termes de performances, les rendements des modules ont évolué de 14 % à 18 % pour les technologies dites standards. Les technologies de pointe atteignent 23 % et sont en forte croissance (on ne parle pas ici des technologies pour le spatial où les rendements records atteignent plus de 40 %). Ce marché de masse ouvre la voie à de nouvelles innovations, depuis celles sur les matériaux jusqu'à l'intégration aux réseaux en passant par les cellules, les modules et les systèmes.

Les enjeux principaux concernent les performances et les coûts des modules. La R&D du CEA menée dans le cadre de l'Institut national de l'énergie solaire (INES) s'oriente sur les nouveaux usages du PV et donc les technologies de demain. Les acteurs du

bâtiment, des travaux publics, du transport (voitures, bateaux, trains...), de l'agriculture, de l'aérospatial, du militaire, du luxe, des réseaux et de l'énergie cherchent tous à « solariser » leurs produits et/ou services. Leurs demandes : rendre le module plus léger, plus robuste (usage route, mur anti-bruit...), plus esthétique (voire invisible), plus souple, plus recyclable, plus haut en tension, plus sûr, plus communiquant ... Côté réseau électrique, il faut que les systèmes de production ne soient plus considérés comme perturbants mais participent à la régulation de celui-ci par le biais des services systèmes.

A titre d'exemples, on peut citer la réalisation de modules PV (en silicium polycrystallin) inférieurs à 3 kg/m² (contre 12kg/m² en standard) pour des applications militaires, la conception de modules qui résistent à des millions de passage de camions, la démonstration de modules bifaciaux qui permettent, dans les meilleurs cas, de produire 20 % d'énergie supplémentaire grâce à la réflexion de la lumière en

PAR **FRANCK BARRUEL**

(Direction de la recherche technologique)



Franck Barruel est adjoint du chef du Département des technologies solaires (DTS) au CEA/Liten.



Entre 2005 et 2017, la capacité de puissance photovoltaïque installée dans le monde est passée de 1 à 310 GWc.

Wc / GWc / MWc

Watt crête, gigawatt crête et megawatt crête. Puissance maximale d'un dispositif dans les conditions standards de test (1000W/m² à 25°C).