

La fusion nucléaire par confinement magnétique

PRINCIPE

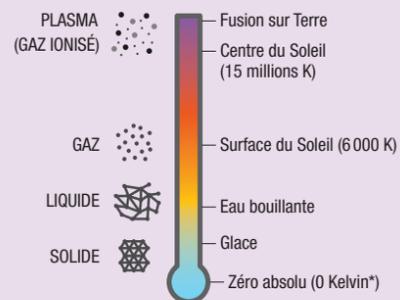
Chauffer un gaz pour créer un plasma, lui-même confiné par un puissant champ magnétique : voici le principe de la fusion nucléaire par confinement magnétique qui devrait proposer, à terme, un nouveau moyen de production d'électricité. La fusion magnétique est expérimentée depuis les années 1960 dans des tokamaks. Celui du CEA, West, va tester des composants clés qui seront mis en œuvre, vers 2025, dans le futur grand réacteur international Iter, lequel ouvrira la voie vers la construction d'un prototype industriel, Demo, à l'horizon 2040.

Tokamak

Тороидальная Камера
Магнитными Катушками

Toroidalnaya Kamera Magnitnymi Katushkami, littéralement : chambre toroïdale avec bobines magnétiques

Le plasma est le quatrième état de la matière, extrêmement chaud



* 1 Kelvin (K) = - 273,15 °C

Le plasma se forme par ionisation d'un mélange de quelques milligrammes de deutérium et de tritium dans un tokamak.

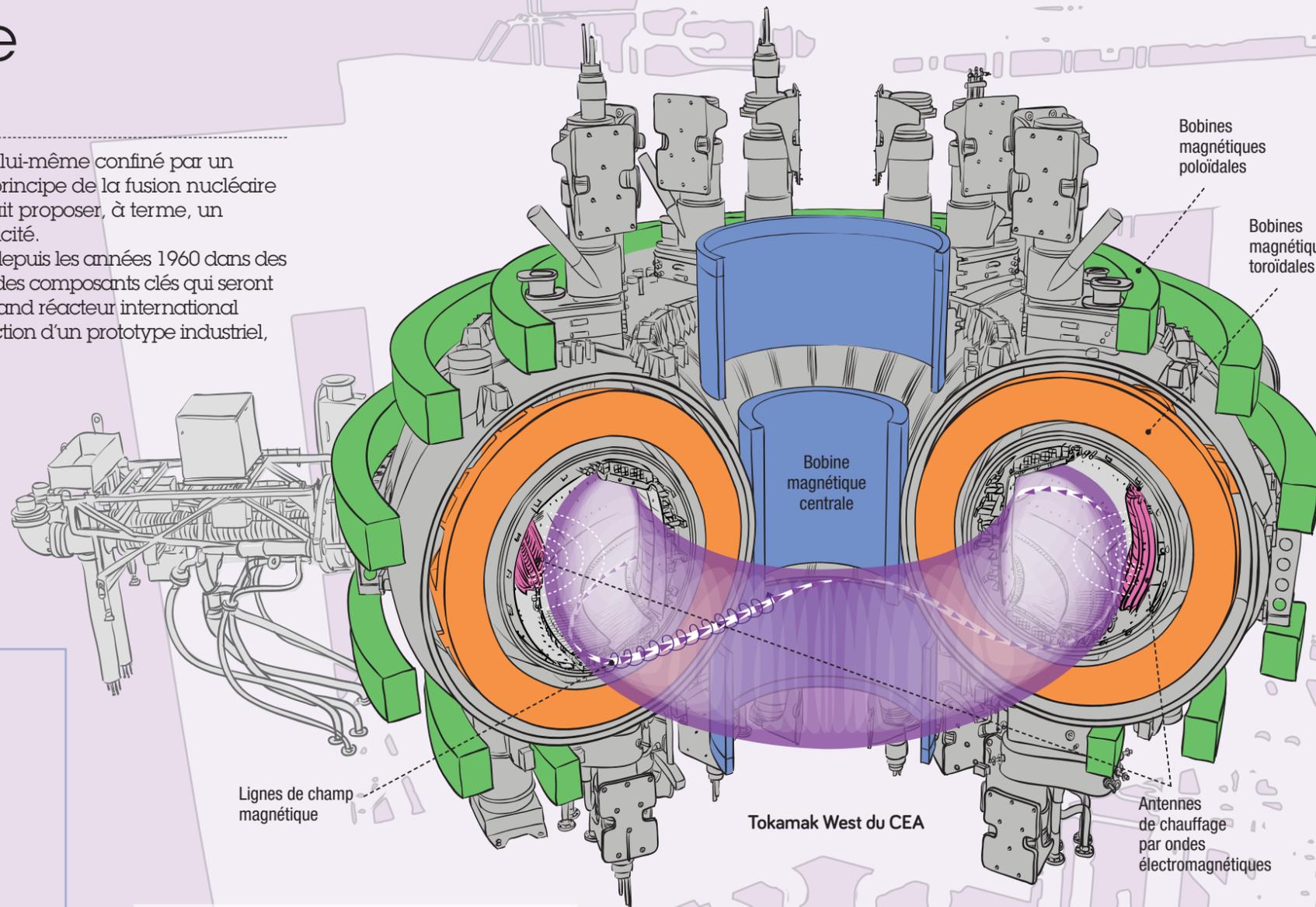
L'ionisation (modification des charges électriques des particules) est initialement générée par la bobine magnétique centrale. Au-dessus de 100 millions de degrés, les ions de deutérium et de tritium peuvent fusionner, ce qui émet des noyaux d'hélium et des neutrons dotés d'une grande énergie cinétique.

Le plasma est chauffé au-delà de 100 millions de degrés par plusieurs méthodes.

- **Effet de résistance électrique (dit « effet Joule »)** provoqué par la circulation du courant dans le plasma (induit par la bobine magnétique centrale).
- **Injection d'atomes neutres de deutérium fortement accélérés** qui entrent en collision avec les particules du plasma.
- **Émission d'ondes électromagnétiques**, dont l'absorption par certaines particules du plasma augmente également la température.
- **Interaction des noyaux d'hélium**, produits lors des réactions de fusion nucléaire, avec les particules du plasma qui contribue à son « auto-chauffage ».

Le plasma est confiné par un puissant champ magnétique qui le maintient à distance des parois du tokamak.

Le moindre contact avec les parois internes le refroidit et peut le faire disparaître. Pour cela, un champ magnétique toroïdal dont l'intensité (100 000 fois supérieure à celui de la Terre) crée des lignes de champ le long desquelles les particules du plasma se déplacent. Des bobines poloidales assurent l'équilibre, la position et la forme du plasma. Dans le tokamak West, des bobines poloidales ont été rajoutées pour donner au plasma une forme allongée en D (autrefois circulaire), avec un point X qui permet d'atteindre des modes de confinement plus performants, dits « améliorés » (ou, mode H : High confinement).



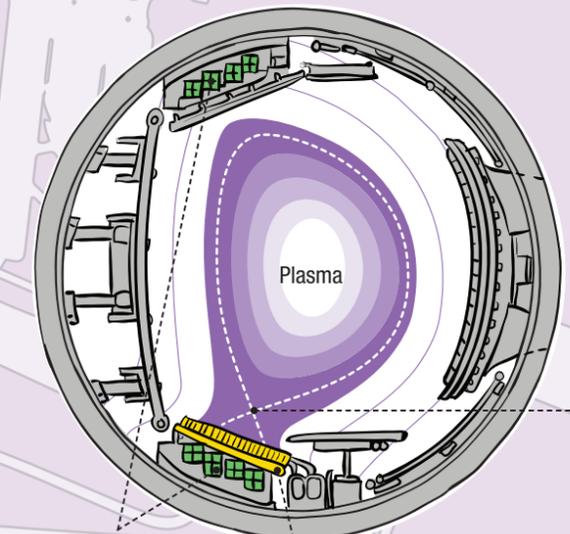
Bobines magnétiques poloidales

Bobines magnétiques toroïdales

Tokamak West du CEA

Antennes de chauffage par ondes électromagnétiques

Lignes de champ magnétique



Bobines poloidales ajoutées dans West

Divertor de West (lame de monoblocks en tungstène faisant face au plasma)

Mode de confinement magnétique en point X

À SAVOIR

Rapport entre l'énergie injectée dans le plasma et l'énergie produite par le plasma = le facteur d'amplification (Q)

Trois paramètres combinés :

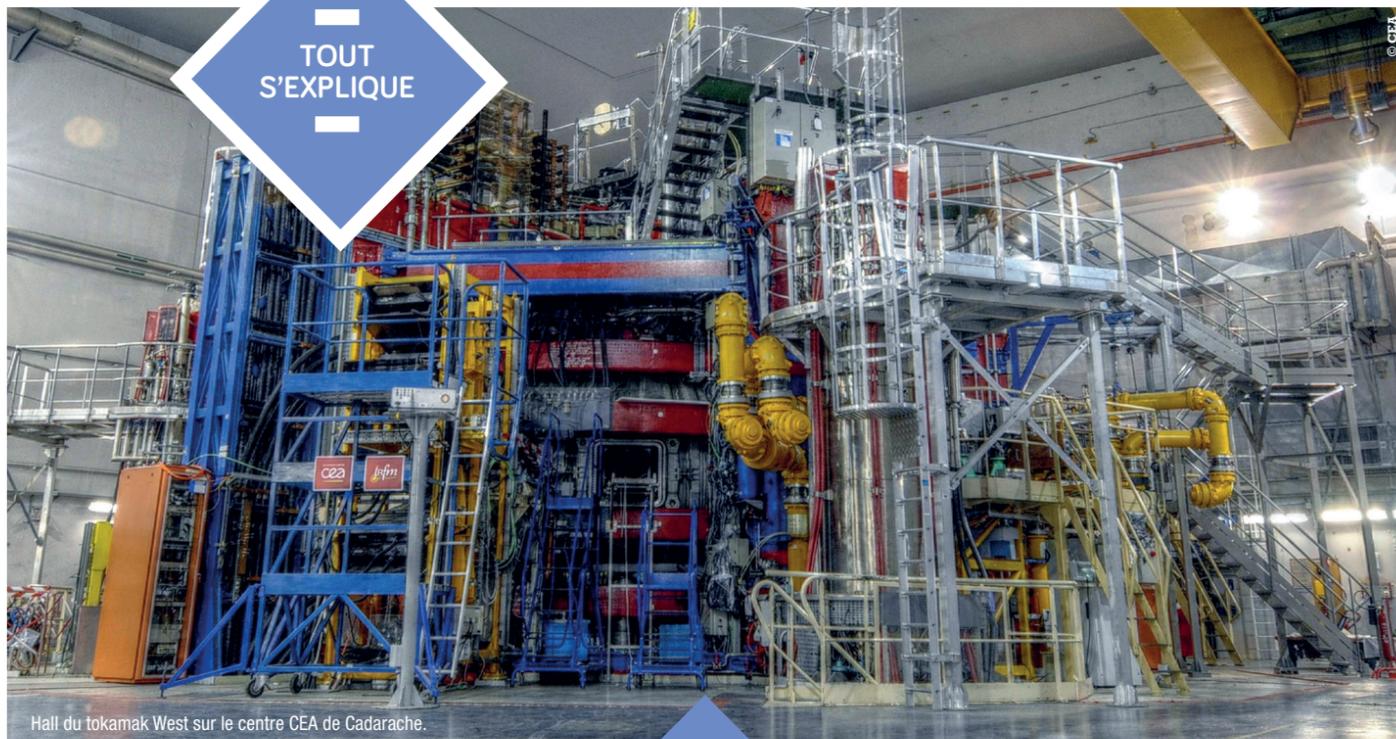
- **Densité** : supérieure à 10^{20} particules par m^3 pour maximiser leur rencontre et fusion.
- **Température (équivalente à la vitesse des particules)** : suffisamment élevée (de 150 à 200 millions °C) pour que les noyaux puissent vaincre la répulsion électrique tout en ayant le temps de fusionner.
- **Temps de confinement de l'énergie (relatif à la qualité de l'isolation thermique)** : supérieur à 1 seconde (plus le temps de confinement est élevé, moins il perd d'énergie).

Iter est conçu pour atteindre un facteur d'amplification de 10 ($Q = 10$) : il fournira 500 MW d'énergie de fusion à partir de 50 MW de chauffage du plasma, sur environ 400 secondes. La rentabilité d'un réacteur industriel commencerait à $Q \geq 20$.

Production d'électricité

L'énergie des neutrons issus des réactions de fusion, particules non chargées donc non confinées dans le plasma, sera récupérée sous forme de chaleur par les parois du tokamak dans lesquelles circule un fluide caloporteur. La vapeur extraite actionnera des turbines pour produire de l'électricité. À noter : l'interaction des neutrons avec les couvertures tritigènes à base de lithium des parois internes produira du tritium, ce qui permettra d'autoalimenter le plasma en tritium, non disponible à l'état naturel.

TOUT
S'EXPLIQUE



Hall du tokamak West sur le centre CEA de Cadarache.

Le tokamak West

Les développements menés sur les tokamaks du monde entier, notamment Jet (Eurofusion-Angleterre) et Tore Supra (CEA-France) ont permis de définir les grands choix d'options pour le futur réacteur expérimental Iter.

Dans cette perspective, Tore Supra a été reconfiguré, de 2013 à 2016, en West, plateforme unique de tests pour un composant critique d'Iter : le divertor en tungstène activement refroidi. Cette pièce a pour fonction d'extraire les atomes d'hélium produits par la réaction de fusion nucléaire et d'évacuer une partie de la chaleur générée par le système, tout en minimisant la contamination du plasma par les autres impuretés.

Après l'obtention, le 18 décembre 2017, de son premier plasma en point X (type de confinement magnétique augmentant les performances d'un plasma), les équipes de West vont s'atteler aux objectifs scientifiques suivants : évaluer les performances d'extraction des composants en tungstène face au plasma ; explorer les problématiques de physique des plasmas sur des longues durées en environnement tungstène (grâce au divertor activement refroidi) ; comprendre les interactions plasma/paroi déterminant la durée de vie du composant ainsi que son exploitation.

Ce que fera Iter, réacteur expérimental ; ce que fera Demo, prototype industriel

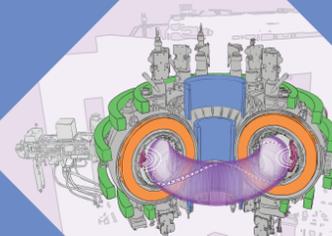
Iter :

- Consolider la physique des plasmas en combustion (plasma entrete nu pas les réactions de fusion).
- Démontrer la production d'énergie de fusion en produisant 500 mégawatts, sur 400 secondes, avec un facteur d'amplification (rapport entre énergie injectée dans le plasma et énergie produite) $Q = 10$.
- Explorer le régime stationnaire à $Q = 5$.
- Démontrer la disponibilité des technologies essentielles (aimants supraconducteurs, composants face au plasma, maintenance robotisée).
- Tester des modules de couverture tritigène des parois internes du tokamak.
- Démontrer la sûreté de fonctionnement et le faible impact sur l'environnement de la fusion nucléaire.

Demo :

- Produire de l'électricité.
- Qualifier les matériaux à « basse activation » et résistants aux neutrons.
- Démontrer l'autosuffisance en tritium grâce à la couverture tritigène des parois internes du tokamak.
- Démontrer la disponibilité nécessaire pour un réacteur commercial électrogène.

les défis 224
du cea



TOUT
S'EXPLIQUE

La fusion nucléaire par confinement magnétique

Chauffer un gaz pour créer un plasma, lui-même confiné par un puissant champ magnétique : voici le principe de la fusion nucléaire par confinement magnétique qui devrait proposer, à terme, un nouveau moyen de production d'électricité. La fusion magnétique est expérimentée depuis les années 1960 dans des tokamaks. Celui du CEA, West, va tester des composants clés qui seront mis en œuvre, vers 2025, dans le futur grand réacteur international Iter, lequel ouvrira la voie vers la construction d'un prototype industriel, Demo, à l'horizon 2040.

ENJEUX



Maîtriser sur Terre une réaction à l'œuvre dans les étoiles, n'est ni plus ni moins qu'un défi civilisationnel équivalent à celui de la conquête de l'espace. Enjeu : produire des gigawatts d'électricité à partir de quelques grammes de combustible.

Ce défi, aux riches perspectives industrielles, économiques et environnementales, suppose d'importantes ruptures scientifiques et technologiques qui mobilisent la communauté scientifique depuis les années 1960. À commencer par les Russes, pionniers en la matière qui auront baptisé du nom de « tokamak » un réacteur à même de concrétiser la fusion nucléaire par confinement magnétique. La France s'est engagée dès cette époque dans ces recherches, grâce aux compétences en physique nucléaire, supraconductivité, cryogénie, sciences des matériaux, diagnostic, robotique... du CEA. Elle s'est dotée de trois tokamaks sur les centres CEA

de Fontenay-aux-Roses, Grenoble et Cadarache, où se trouve l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (IRFM) : TFR et Petula, puis Tore Supra (1988). Dernier en activité, Tore Supra (devenu West aujourd'hui) a obtenu en 2003 un record mondial avec un plasma stationnaire pendant 6 minutes à plus de 50 millions de degrés.

En 2006, forts de leurs avancées respectives, Chine, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Japon, Russie et Union européenne ont décidé de s'unir au sein du projet Iter. Ce tokamak, actuellement en construction à Cadarache et dont la mise en service est prévue à partir de 2025, est un jalon crucial pour valider l'ensemble des options scientifiques et technologiques, étudiées sur les différents tokamaks dans le monde. Objectif : lancer la construction, à l'horizon 2040, du premier prototype industriel, Demo, capable de produire de l'électricité grâce à la fusion nucléaire.