

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande  
**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 132 (2006)  
**Heft:** 02: Fusion thermonucléaire

**Artikel:** Matériaux pour réacteurs de fusion thermonucléaire  
**Autor:** Baluc, Nadine  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-99444>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Matériaux pour réacteurs de fusion thermonucléaire

**Par opposition au phénomène de fission utilisé actuellement dans les centrales nucléaires, le combustible de la fusion thermonucléaire n'engendrera pas directement des déchets radioactifs. En revanche, l'émission de neutrons à très haute énergie va fortement irradier les matériaux situés à proximité du plasma, affectant singulièrement leurs propriétés mécaniques tout en les rendant radioactifs. Un des principaux défis de la fusion thermonucléaire concerne le développement de matériaux à même de supporter l'intense bombardement neutronique auquel ils seront soumis.**

L'efficacité d'un réacteur est proportionnelle à la différence de température du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie du réacteur, ces températures étant imposées par les températures d'opération maximales et minimales des matériaux de structure environnants. Dans un réacteur de fusion thermonucléaire, les éléments faisant face au plasma (première paroi et diverteur<sup>1</sup>) ainsi que la couverture, située derrière la première paroi, seront exposés à un flux intense de neutrons de fusion, d'une énergie de 14 MeV, en provenance

<sup>1</sup> Le diverteur est un appareil qui permet de récupérer d'une part les impuretés contenues dans un plasma et d'autre part l'énergie des atomes d'hélium résultant de la réaction de fusion. C'est l'élément du réacteur qui est porté à la plus haute température.

du plasma. Les conséquences de cette irradiation neutronique sur la microstructure, les propriétés et par conséquent le choix des matériaux de structure pour les réacteurs de fusion thermonucléaire, sont capitales.

## Irradiation par des neutrons de fusion

L'interaction de neutrons de fusion avec les atomes composant les matériaux engendre des cascades de déplacements atomiques et des réactions nucléaires de transmutation, modifiant grandement la microstructure du matériau irradié. En effet, du point de vue de la science des matériaux, les cascades de déplacements atomiques induisent la formation de défauts de structure ponctuels, les lacunes ou les atomes interstitiels (fig. 2). Quant aux réactions nucléaires de transmutation, elles conduisent à la formation d'impuretés - comme des atomes d'hélium ou d'hydrogène - pouvant être radioactives. L'unité d'endommagement du matériau est le « dpa » ou nombre de déplacements par atome. Les données principales relatives à l'endommagement des aciers dans un réacteur de fusion commercial sont reportées dans le tableau A.

La microstructure finale du matériau irradié résulte de réactions entre les différents défauts mentionnés ci-dessus (lacunes, atomes interstitiels, impuretés), ces réactions étant fortement dépendantes de la température du matériau sous irradiation. Cette microstructure peut contenir de tout petits amas de défauts, non véritablement identifiables, des boucles

Endommagement des aciers	Neutrons de fusion (réacteur commercial de 3-4 GW)	Source suisse de neutrons de spallation (SINQ)	Neutrons de fission (réacteur BOR60)	Source intense de neutrons de 14 MeV (IFMIF)
Taux d'endommagement [dpa/an]	<b>20-30</b>	~ 10	~ 20	<b>20-55</b>
Taux de production d'hélium [appm/dpa]	<b>10-15</b>	~ 50	~ 1	<b>10-12</b>
Taux de production d'hydrogène [appm/dpa]	<b>40-50</b>	~ 450	~ 10	<b>~ 40-50</b>

Tabl. A : Taux d'endommagement et de production d'impuretés, tels que générés dans les aciers par différentes sources d'irradiation

Fig. 1 : Exemples de défauts de structure engendrés par une irradiation (neutronique ou autre)

Fig. 2 : Représentation schématique d'une lacune (1) et d'un atome interstitiel (2) dans une structure cristalline

Fig. 3 : Durcissement ( $\Delta H$ ) et perte de ductilité ( $\Delta L$ ) d'un acier ferritique/martensitique à faible activation de type OPTIMAX A, engendrés par une irradiation aux protons de haute énergie, mesurés par des essais de déformation en traction à vitesse imposée

Fig. 4 : Augmentation de la température de transition fragile-ductile (DBTT) d'un acier ferritique/martensitique à faible activation de type OPTIMAX A, engendrée par une irradiation aux neutrons de fission, mesurée par des essais de fracture de type Charpy

de dislocation, des tétraèdres de fautes d'empilement, des précipités, des vides ou bien encore des bulles d'hélium et/ou d'hydrogène (fig. 1).

Cette microstructure a un impact important sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau considéré. Elle peut engendrer une dégradation des propriétés physiques, comme une diminution de la conductivité électrique ou thermique, ainsi qu'une dégradation des propriétés mécaniques, caractérisée par un phénomène de durcissement (fig. 3), une perte de ductilité (fig. 3) et de ténacité ainsi qu'une diminution de la résistance au fluage, résultant en une fragilisation importante du matériau (fig. 4). Une accumulation des impuretés peut être à l'origine de modifications locales de la composition chimique. La formation de gaz peut également provoquer un gonflement macroscopique du matériau, conduisant à une perte de stabilité dimensionnelle.

En plus d'une bonne résistance à l'irradiation, les matériaux de structure doivent présenter une conductivité thermique suffisamment élevée, une bonne tenue mécanique à haute température, une longue durée de vie et une grande fiabilité. Ils doivent être compatibles avec le fluide caloporeur et les matériaux environnants, faciles à fabriquer et les ressources doivent être disponibles en quantités suffisantes. Finalement, ils ne doivent pas présenter de danger pour l'environnement. En effet, bien que le phénomène de dégradation des propriétés des matériaux de structure sous irradiation neutronique

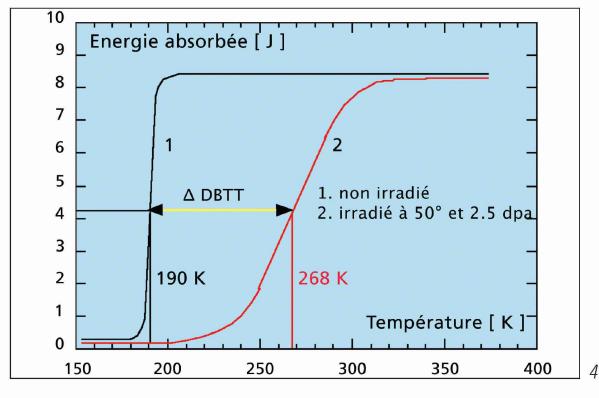
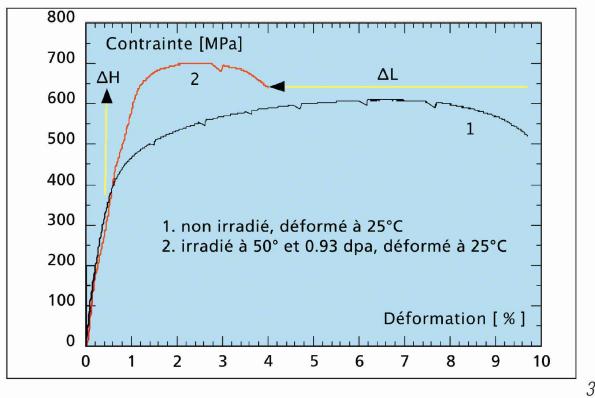
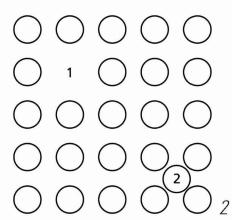
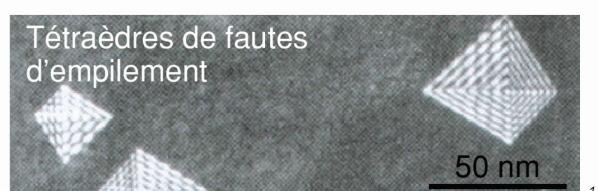
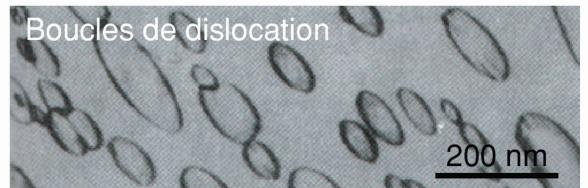


Fig. 5 : Etat de développement des principaux matériaux de structure candidats

Fig. 6 : Fenêtre d'opération (en température) des principaux matériaux de structure candidats

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

## Une Installation dénommée IFMIF

Le développement et la qualification des matériaux destinés aux réacteurs de fusion thermonucléaire commerciaux impliquent de pouvoir disposer d'une source intense de neutrons de 14 MeV, permettant de se rapprocher des conditions expérimentales réelles que l'on devrait trouver au sein de ces réacteurs, notamment en termes de température, de taux d'endommagement et de taux de production d'impuretés (tabl. A). La construction d'une telle installation, appelée IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), devrait démarrer à la suite de celle d'ITER. Elle devrait être opérationnelle en 2016-2017 et son coût est estimé à environ 500 millions de dollars. Dans IFMIF, les neutrons de 14 MeV seront émis par une cible de lithium liquide irradiée par un faisceau de deutérons. IFMIF aura trois buts principaux :

- la qualification des matériaux de structure pour des temps d'irradiation correspondant à leur temps de vie envisagé au sein des futurs réacteurs de fusion commerciaux,
- la calibration et la validation des résultats obtenus au moyen de neutrons de fission, ions ou protons de haute énergie,
- l'identification d'éventuels nouveaux phénomènes engendrés par les neutrons de 14 MeV.

Le volume d'irradiation envisagé étant malheureusement très petit (pour des raisons techniques et financières), de l'ordre du demi-litre pour la région soumise à l'irradiation neutronique la plus intense, seuls de très petits échantillons, de géométries différentes et provenant de divers matériaux candidats, seront irradiés dans IFMIF. De nombreuses études en cours ont donc pour but de calibrer les résultats obtenus au moyen de ces petits échantillons par rapport à ceux obtenus au moyen d'échantillons répondant aux normes standards (de type DIN, KLST ou autre) [3].

soit l'un des principaux facteurs limitant leur choix, la radioactivité résiduelle des matériaux considérés doit également être prise en compte, puisqu'elle a un impact important sur les durées de stockage, les procédés de manipulation, le traitement des déchets et les possibilités de recyclage.

Par opposition aux matériaux de structure, le choix des matériaux fonctionnels est en principe moins critique, en ce sens que leur tenue mécanique sous irradiation n'est pas fondamentale. Ce choix est donc principalement lié aux propriétés requises par la fonction envisagée.

On estime que, avec un choix approprié des matériaux de structure et fonctionnels, la radiotoxicité d'un réacteur de fusion devrait atteindre celle d'une centrale à charbon après environ 30 à 50 ans, temps au bout duquel il est possible soit de recycler les matériaux, soit de les stocker sans surveillance.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

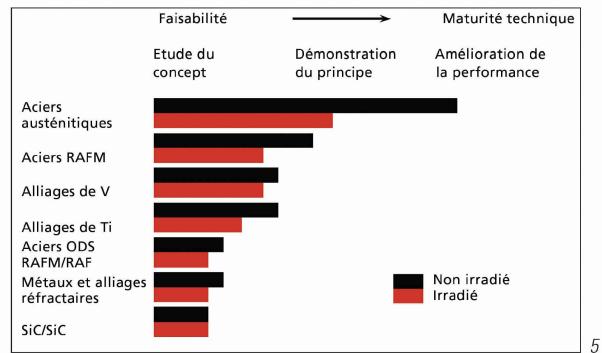
## Matériaux de structure candidats

Les matériaux de structure destinés aux éléments faisant face au plasma et à la couverture sont composés d'éléments chimiques « à faible activation », c'est-à-dire présentant une radioactivité résiduelle limitée après irradiation par des neutrons de fusion [1]. Ces éléments sont principalement le fer, le vanadium, le titane, le chrome, le tungstène, le silicium et le carbone. Les matériaux composés de l'un ou l'autre de ces éléments, et présentant un intérêt en terme de résistance mécanique, sont :

- les aciers ferritiques/martensitiques à faible activation (RAFM),
- ces mêmes aciers renforcés par des particules d'oxyde (ODS RAFM),
- les aciers ferritiques renforcés par des particules d'oxyde (ODS RAF),
- les alliages à base de vanadium,
- les alliages à base de titane,
- le chrome et le tungstène ainsi que leurs alliages,
- les matériaux composites de type céramique (CFC, SiC/SiC).

Chacun de ces matériaux présente des avantages et des inconvénients bien spécifiques quant à son utilisation pour la structure des réacteurs de fusion, mais leurs qualités et défauts sont actuellement difficiles à comparer, ces matériaux étant à différents stades de développement (fig. 5). Les plus prometteurs sont les aciers ferritiques/martensitiques à faible activation : ils présentent la plus grande maturité technologique, en termes de procédés de fabrication et de soudage et d'expérience industrielle. Un exemple d'acier ferritique/martensitaire à faible activation est l'EUFER 97, développé en Europe dans le cadre de l'EFDA (European Fusion Development Agreement), de composition chimique suivante : 8,9 % Cr, 1,1 % W, 0,47 % Mn, 0,2 % V, 0,14 % Ta, 0,1 % C, Fe pour le reste (pourcents en poids).

Les fenêtres d'opération de ces différents matériaux sont reportées à la figure 6. Leur température minimale d'opération est généralement limitée par les effets de fragilisation dus à l'irradiation neutronique, ces effets étant prépondérants à basse température, alors que leur température maximale d'opération est principalement limitée par une chute importante de leur résistance mécanique (traction et fluage notamment). La fenêtre d'opération des aciers ferritiques/martensitiques à faible activation s'étend approximativement de 350 °C à 550 °C. Cette fenêtre, permettant un écart de 200 degrés entre la température du fluide caloporteur à la sortie du réacteur (550 °C) et celle à son entrée (350 °C), devrait lui assurer une efficacité raisonnable.



5

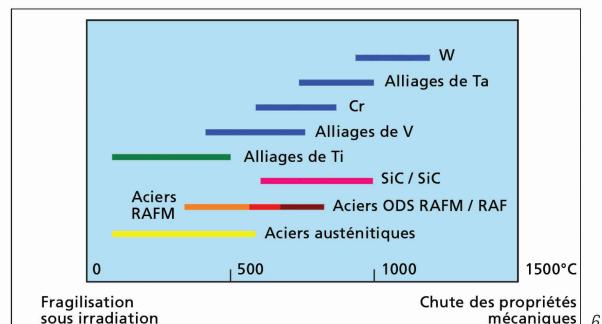
## Recherches actuelles en matériaux de structure

Les matériaux de structure destinés aux futurs réacteurs de fusion commerciaux sont encore tous en cours de développement ou de caractérisation. Leur évaluation s'effectue principalement au moyen d'essais de déformation macroscopiques et d'observations microstructurales, réalisés avant et après irradiation.

Malheureusement, les différentes sources de neutrons de 14 MeV qui existent actuellement de par le monde ont une très faible intensité et ne permettent pas d'obtenir, au sein du matériau étudié, un taux d'accumulation de défauts comparable à celui que l'on s'attend à obtenir dans les futurs réacteurs de fusion commerciaux. Il est donc nécessaire de simuler l'irradiation par des neutrons de fusion, en utilisant par exemple des neutrons de fission. En Suisse, nous utilisons principalement un spectre mixte de protons de haute énergie et de neutrons de spallation<sup>2</sup>, produits par des installations situées à l'Institut Paul Scherrer (PSI). Ces irradiations produisent toutefois des taux d'impuretés plus élevés que les neutrons de fusion (tabl. A). Elles sont donc complétées par des irradiations aux neutrons de fission, réalisées dans différents réacteurs en Europe et aux Etats-Unis, produisant quant à elles des taux d'impuretés plus faibles que les neutrons de fusion (tabl. A).

Aucune sélection définitive des matériaux pour les réacteurs de fusion commerciaux n'a bien sûr encore été effectuée. En Europe, il est pour l'instant envisagé d'utiliser un acier ferritique/martensitique à faible activation comme matériau de structure pour la couverture et le divertiteur, la couverture étant protégée par une première paroi composée soit d'un acier renforcé par des particules d'oxyde soit d'un alliage à base de tungstène, le divertiteur étant lui-même protégé par une armure de tungstène.

<sup>2</sup> Les neutrons de spallation sont émis par des atomes lourds (de plomb, par exemple) lors du processus de désexcitation suivant leur irradiation, et donc leur excitation, par des protons de haute énergie.



6

Les recherches effectuées en Suisse dans le domaine des matériaux pour les réacteurs de fusion se concentrent actuellement sur les matériaux métalliques. Elles comprennent le développement et la caractérisation, avant et après irradiation, d'aciérs ferritiques/martensitiques à faible activation, d'aciérs ferritiques/martensitiques et ferritiques à faible activation, renforcés par des particules d'oxyde, d'alliages de tungstène nanocristallins et de nombreux travaux de modélisation des défauts et effets d'irradiation.

Nadine Baluc, dr ing. phys. dipl. EPF  
Centre de Recherches en Physique des Plasmas  
Technologie de la Fusion - Matériaux  
Association EURATOM-Confédération Suisse  
CH - 5232 Villigen-PSI

- [1] M. VICTORIA, N. BALUC AND P. SPÄTIG: « Structural materials for fusion reactors », *Nuclear Fusion*, Vol. 41, (2001), pp. 1047-1053
- [2] N. BALUC, C. SCHÄUBLIN, P. SPÄTIG AND M. VICTORIA: « On the potential of using ferritic/martensitic steels as structural materials for fusion reactors », *Nuclear Fusion*, Vol. 44, (2004), pp. 56-61
- [3] P. SPÄTIG, E.N. CAMPITELLI, R. BONADÉ AND N. BALUC: « Assessment of plastic flow and fracture properties with small specimen test techniques for IFMIF-designed specimens », *Nuclear Fusion*, Vol. 45, (2005), pp. 635-641

## Les matériaux de structure pour ITER

Les conditions environnementales seront beaucoup moins sévères dans ITER qu'elles ne le seront dans un réacteur de fusion commercial, particulièrement en ce qui concerne l'endommagement sous irradiation neutronique et les températures maximales atteintes. Dans ITER, l'endommagement devrait atteindre 3 à 5 dpa en fin de vie, et la température des matériaux de structure ne devrait pas dépasser 500 °C. Par conséquent, il n'est nul besoin de développer de nouveaux matériaux pour ITER, dont la construction devrait se faire principalement avec des matériaux commerciaux. Un acier austénitique du type 316LN devrait être utilisé comme matériau de structure pour la couverture, celle-ci comprenant également un alliage de cuivre servant de puits de chaleur et étant protégée par une première paroi constituée de beryllium. Quant au divertiteur, il devrait être composé d'un alliage de cuivre, servant de puits de chaleur, et être protégé par une armure faite soit de CFC, soit de tungstène.