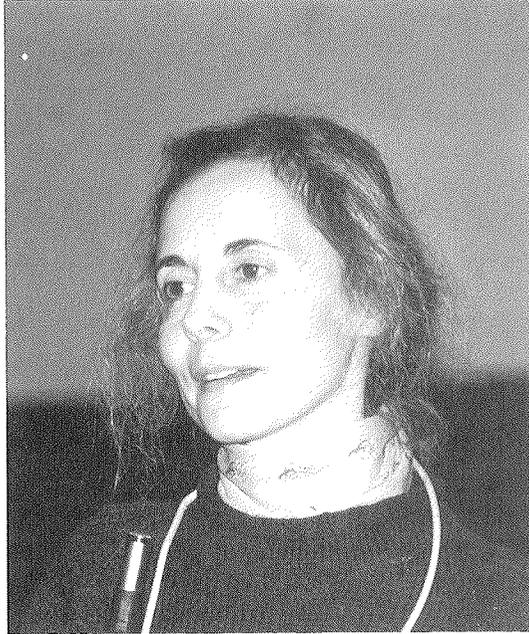


LES MÉCANISMES FONDAMENTAUX DE DÉFORMATION DES MATÉRIAUX



NADINE BALUC

Introduction

Avant de commencer mon exposé, je souhaiterais remercier la Fondation Latsis pour m'avoir attribué l'un des prix Latsis de cette année 2000 et offert ainsi l'opportunité de vous présenter ce soir un domaine d'études et de recherches à priori un peu rébarbatif, qui fait fuir pas mal d'étudiants et que l'on nomme la Physique Métallurgique. Mais au lieu de vous parler de manière très générale de Physique Métallurgique ou de son domaine Père, la Matière Condensée, j'ai choisi de vous parler aujourd'hui d'un problème bien particulier, sur lequel je travaille déjà depuis quelques années et qui concerne le développement de nouveaux matériaux de structure destinés aux futurs réacteurs de fusion thermonucléaire.

La fusion thermonucléaire

Tout d'abord, qu'est ce que la fusion thermonucléaire? La fusion thermonucléaire est simplement la source d'énergie qui fait marcher le Soleil et les autres étoiles et qui, si elle était pleinement réalisée ici sur Terre, pourrait constituer une nouvelle source d'énergie quasiment illimitée et offrir ainsi une solution à la demande d'énergie croissante à laquelle nous avons à faire face.

De nombreuses réactions nucléaires différentes se produisent au sein des étoiles, mais seul un petit nombre de ces réactions présente un intérêt pratique en ce qui concerne la production d'énergie sur Terre. Ces réactions impliquent toutes la fusion de formes différentes, que l'on appelle isotopes, de l'atome d'hydrogène. L'atome d'hydrogène est l'atome le plus simple que nous connaissons. Il est composé d'un proton et d'un électron.

Sur Terre, la fusion d'isotopes de l'atome d'hydrogène est possible et a déjà été réalisée. Mais, si l'on désire générer assez d'énergie de façon à produire de l'électricité de manière efficace par le biais de réactions de fusion, il est nécessaire de chauffer les atomes d'hydrogène à une température de l'ordre de 100 millions de degrés Celsius, c'est-à-dire à une température dix fois supérieure à celle que l'on trouve à l'intérieur du Soleil.

Pourquoi une telle température? Les forces entre deux atomes d'hydrogène les font normalement se repousser l'un l'autre. A l'intérieur du Soleil, la force de gravité est telle qu'elle pousse les atomes les uns contre les autres. Mais sur Terre, où la force de gravité est beaucoup plus faible, nous devons utiliser une combinaison de champs magnétiques intenses permettant de contenir les atomes et de hautes températures permettant d'induire les réactions thermonucléaires. A ces hautes températures, atteintes de différentes manières, nous obtenons un plasma, c'est-à-dire un gaz ionisé. Le plasma est la forme de matière qui compose le Soleil et les autres étoiles. C'est un mélange de ions positifs (atomes ayant perdu leur(s) électron(s)) et d'électrons négatifs, qui possède une charge globale nulle et qui peut conduire l'électricité et la chaleur.

La réaction de fusion qui se produit à la température la plus basse et, par conséquent, la réaction de fusion la plus facilement réalisable sur terre, est la combinaison d'un ion de deutérium avec un ion de tritium, deux isotopes de l'atome d'hydrogène. Les produits de cette réaction de fusion sont de l'énergie, un ion d'hélium et un neutron possédant une énergie de 14 MeV (voir schéma).

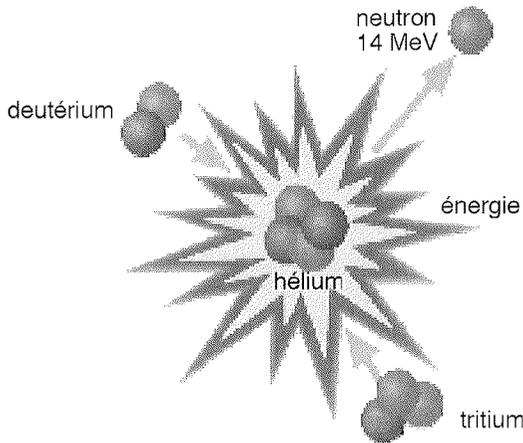


Schéma d'une réaction de fusion entre un ion de deutérium et un ion de tritium produisant un neutron et un ion d'hélium énergétiques.

Dans le domaine de la fusion, le but final des chercheurs est de développer un réacteur de fusion commercial dans lequel les réactions thermonucléaires induites libèrent assez d'énergie pour produire environ 1 GW d'électricité. Un tel réacteur pourrait voir le jour aux alentours des années 2050. Les réactions de fusion sont étudiées sur Terre depuis déjà une quarantaine d'années, par exemple au sein d'installations que l'on appelle des tokamaks. La dernière génération de ces installations (le tokamak européen JET, auquel la Suisse a contribué) a généré une puissance de fusion d'environ 16 MW. La prochaine étape sera un réacteur expérimental appelé ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Ce réacteur international, si sa construction s'avère confirmée au niveau politique (décision attendue entre 2003 et 2006), devrait devenir opérationnel durant la seconde décennie de ce siècle. ITER devrait fournir une puissance de fusion d'environ 500 MW, c'est-à-dire dix fois supérieure à la puissance nécessitée par le chauffage de son plasma. Son coût est estimé à 3,5 milliards de dollars.

Les matériaux dans le domaine de la fusion

Qu'en est-il des problèmes concernant les matériaux dans le domaine de la fusion? Nous avons vu précédemment que les produits de la réaction de fusion deutérium-tritium sont, outre de l'énergie, un ion d'hélium, que l'on appelle également une particule α , et un neutron de 14 MeV que l'on appelle un neutron de fusion. C'est ce neutron qui, en cédant son énergie cinétique, fournit de l'énergie dans un réacteur.

La particule α est ralentie à l'intérieur du plasma et contribue à son chauffage. Mais le neutron de fusion, lui, s'échappe du plasma et pénètre la première paroi du réacteur de fusion, où il produit des cascades de déplacements atomiques et des réactions nucléaires de transmutation. Par conséquent, la première paroi d'un réacteur de fusion peut être sérieusement endommagée par l'irradiation neutronique et peut également devenir radioactive. Cependant, par 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. Du point de vue de la science des matériaux, les cascades de déplacements

atomiques induisent la formation de défauts de structure ponctuels à l'intérieur du matériau irradié, tels les lacunes (un atome en moins) et les atomes interstitiels (un atome en trop). Quant aux réactions nucléaires de transmutation, elles conduisent à la production d'impuretés, comme par exemple des atomes d'hélium, donnant lieu à un gonflement macroscopique du matériau.

La microstructure finale du matériau irradié résulte de réactions entre ces différents défauts. Cette microstructure a un impact important sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau considéré. Elle peut par exemple engendrer une fragilisation importante du matériau. Du point de vue de la technologie de la fusion, il est donc important d'étudier les effets d'une irradiation par des neutrons de fusion sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux potentiels destinés à la première paroi des futurs réacteurs de fusion. Tel est donc le but de mes recherches actuelles, plus particulièrement focalisées sur l'étude des propriétés mécaniques de différents types de matériau, réalisée, avant et après irradiation, au moyen d'essais de déformation macroscopiques et d'observations microstructurales effectuées par microscopie électronique à transmission.

Les matériaux qui apparaissent les plus prometteurs, tant du point de vue mécanique que du point de vue activation, sont les aciers de structure martensitique, les alliages de titane, ceux de vanadium et les matériaux composites à base de carbure de silicium. Tous ces matériaux contiennent majoritairement des éléments que l'on qualifie d'éléments «à basse activation», de façon à limiter leur radioactivité résiduelle induite par l'irradiation neutronique. On estime généralement que, dans un réacteur de fusion commercial, le matériau constituant la première paroi devra supporter des températures atteignant 600 degrés Celsius et que les déplacements atomiques imputables à l'irradiation neutronique seront de l'ordre de 20 déplacements par atome et par année.

Il faut toutefois noter que les différentes sources de neutrons de 14 MeV qui existent actuellement de par le monde ont hélas une très faible intensité et ne permettent pas d'obtenir, au sein du matériau étudié, un taux d'accumulation de défauts qui soit comparable à celui que l'on s'attend à obtenir dans le cas des 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 des protons de haute énergie, produits par l'accélérateur de protons de l'Institut Paul Scherrer, situé à Villigen dans le canton d'Argovie. De même que les neutrons de fusion, les protons de haute énergie produisent des cascades de déplacements atomiques et des impuretés, par le biais de réactions nucléaires de transmutation, à l'intérieur du matériau irradié et permettent donc de simuler les effets dûs aux neutrons de fusion.

En ce qui concerne le développement et la qualification finale de nouveaux matériaux destinés aux futurs réacteurs de fusion commerciaux, ils devraient se trouver grandement facilités par la construction prochaine, espérons-le, d'IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), une source intense de neutrons de 14 MeV, nous permettant de nous rapprocher des conditions expérimentales réelles que l'on devrait trouver au sein des réacteurs de fusion. Son coût est estimé à 490 millions de dollars. Les études concernant IFMIF s'effectuent dans le cadre des accords de l'Agence Internationale de l'Énergie dont la Suisse est signataire.

Résumé

En résumé, la fusion thermonucléaire présente de nombreux avantages, compatibles avec la notion de développement durable. La quantité de combustible à disposition est presque inépuisable. Le deutérium peut être extrait facilement de l'eau de mer. Le tritium peut être fabriqué à partir d'un autre élément, le lithium. C'est le métal le plus léger et on le trouve également en abondance dans l'eau de mer. C'est également une source d'énergie très sûre du point de vue des accidents (les réactions nucléaires 'en chaîne', telles qu'observées dans les processus de fission nucléaire, ne sont pas possibles dans le domaine de la fusion) et propre vis-à-vis de l'environnement (la fusion thermonucléaire ne contribue pas à l'effet de serre, la radioactivité résiduelle des matériaux de structure et fonctionnels peut être limitée par le choix de leur composition et les matériaux concernés recyclés). C'est dans ce dernier domaine, crucial quant à l'acceptabilité sociale de la fusion thermonucléaire comme future source d'énergie, qu'une physicienne métallurgiste telle que moi peut apporter sa contribution à la résolution de ce problème global qu'est celui de l'énergie.