

Fusion nucléaire: préciser les objectifs de la sûreté et de la protection de l'environnement

L'analyse du potentiel de l'énergie de fusion sous l'angle de la sûreté, de la fiabilité et de l'écologie est au cœur de la recherche

par
**Franz-Nikolaus
Flakus, John C.
Cleveland et
T.J. Dolan**

Depuis plusieurs décennies, certains pensent que la source d'énergie de notre soleil — la fusion nucléaire — résoudra le problème de l'énergie sur la Terre. Mais cela reste encore à voir: les problèmes technologiques auxquels se heurtent les concepteurs d'une centrale à fusion sont complexes, et cette centrale reste à construire. Les progrès dans ce sens sont néanmoins remarquables.

Dans plusieurs pays, la recherche sur la fusion nucléaire a commencé il y a des dizaines d'années. JT-60 a fourni d'importantes données pour améliorer le confinement du plasma, D-III-D tokamak a permis d'obtenir des pressions records du plasma par rapport à la pression du champ magnétique, et TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) a produit 10 millions de watts d'énergie thermique de fusion. JET (Joint European Torus) approche du point critique où l'énergie produite excède l'énergie consommée. Les problèmes de physique en suspens — pureté du plasma, perturbations et maintien du courant — devraient être résolus par le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) sur lequel travaillent des experts de la Communauté européenne, des Etats-Unis, de la Fédération de Russie et du Japon (*voir l'article page 16*).

Des difficultés d'ingénierie se présentent au niveau des aimants supraconducteurs, des systèmes à

vide, des systèmes cryogènes, des systèmes de chauffage du plasma, de diagnostic du plasma et de refroidissement du manteau, mais il semble qu'elles pourront finalement être surmontées. De gros problèmes de sûreté et d'économie se posent aussi. Nous parlerons ici de sûreté, des questions connexes et de la coopération internationale dans ce domaine.

Considérations et objectifs de sûreté

Il est impossible de faire des prédictions valables du coût de l'électricité produite par la fusion en ignorant les détails de la conception d'une centrale thermonucléaire industrielle. Pour l'instant, il est dit qu'il ne serait pas très inférieur à celui d'autres sources d'énergie.

En matière de sûreté, en revanche, la fusion semble présenter des avantages par rapport à d'autres sources d'énergie. Pratiquement toutes les études tiennent de plus en plus compte des considérations de sûreté et d'écologie, et les objectifs de sûreté ont été très largement discutés. Il s'agit de protéger les travailleurs contre les rayonnements, les champs électromagnétiques et autres dangers, le public contre les matières radioactives et toxiques, l'environnement contre les polluants et les déchets, et les investisseurs contre les dommages dus à des accidents.

Le processus de fusion. A certaines températures suffisamment élevées, presque tous les noyaux légers entrent en réaction de fusion et peuvent, en principe, servir de combustible dans une centrale thermonucléaire. Toutefois, les difficultés techniques augmentent rapidement avec la charge nucléaire

M. Flakus et M. Cleveland sont des cadres de la Division de la sûreté nucléaire et de la Division de l'énergie d'origine nucléaire, respectivement, du Département de l'énergie et de la sûreté nucléaires de l'AIEA; M. Dolan est chef de la Section de la physique de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA.

des isotopes en réaction. C'est pourquoi, dans la pratique, seuls le deutérium, le tritium et les isotopes de l'hélium, du lithium et du bore sont envisagés.

La première génération de réacteurs à fusion utilisera très probablement le deutérium-tritium (DT) comme combustible, le plus facile à «allumer». Le principal produit de la réaction DT, l'hélium 4, ne comporte pas de risque pour la santé, et son principal produit énergétique est un neutron de 14 MeV. Pratiquement toutes les matières sont plus ou moins activées par un bombardement de neutrons de haute énergie. Dans un réacteur DT, les neutrons produiront inévitablement des radio-isotopes. Les principales matières radioactives seront donc le tritium et les matériaux de structure entourant le volume utile, activés par les neutrons.

Considérations de sûreté. Les études spéciales de la sûreté d'un réacteur à fusion, qui viennent compléter maintes autres études de sûreté, concernent la protection contre le tritium, celle contre les produits d'activation, l'évaluation des rejets de tritium, l'élimination des déchets radioactifs, et l'analyse des accidents éventuels et de leurs conséquences.

Le dégagement de tritium pendant le fonctionnement du réacteur doit être maintenu dans des limites acceptables; il est modélisé selon des codes informatiques qui tiennent compte de la filtration du tritium à travers les matériaux de l'installation. Les principaux laboratoires de recherche sur cet élément se trouvent en Allemagne, au Canada, aux Etats-Unis, en Fédération de Russie, en Italie et au Japon.

Les produits de l'activation neutronique ne posent pas de sérieux problèmes s'ils sont de courte période et peuvent être confinés. Ce sont des sous-produits qui ne proviennent pas directement de la réaction. Ils apparaissent dans le manteau et dans les structures du réacteur, de sorte que le concepteur peut en réduire la production par des solutions appropriées et un choix judicieux de matériaux. L'emploi de divers matériaux peu activables fait l'objet d'études très poussées.

Une réaction de fusion ne peut pas s'emballer; le problème, c'est de l'entretenir. En principe, toutes les défaillances de matériel provoquent l'arrêt de la fusion; celle-ci comporte de toute manière un frein intrinsèque de par sa nature même et le réacteur ne contient que relativement peu de combustible. En revanche, d'autres accidents potentiels, au niveau des électro-aimants, par exemple, sont étudiés plus spécialement et des «calculs de conséquences» sont effectués. Pour classer les accidents selon les séquences d'événements et estimer leur fréquence, il faut disposer de données spécifiques sur la fiabilité des composants.

Pour faire une étude générale de la sûreté d'un réacteur à fusion, on adopte une approche analogue à celle de la conception des autres grandes installations nucléaires (voir l'encadré, page 25). D'après les résultats des analyses, une centrale thermonucléaire peut répondre aux impératifs de sûreté

souhaitables. L'étude ESECOM compare divers types de réacteurs à fusion du point de vue de la sûreté et de l'économie*. Les problèmes généraux de sûreté que pose ITER ont été examinés et les résultats préliminaires font l'objet d'un projet de rapport.

Il y a plus de 20 ans que l'on étudie la sûreté d'une centrale thermonucléaire en suivant constamment l'évolution des concepts et des impératifs de sûreté radiologique internationalement agréés.

En 1994, l'Agence a publié une version révisée des *Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements*, en collaboration avec cinq organisations internationales: l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développements économiques (AEN/OCDE), le Bureau international du Travail (BIT), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et l'Organisation panaméricaine de la santé (OPS). Les Normes révisées tiennent compte des nouvelles recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Le système de limitation des doses est centré sur le principe de «l'optimisation de la protection» et la fusion semble bien se prêter à l'application de celui-ci. Le meilleur moyen d'assurer l'optimisation consiste à incorporer l'évaluation de la sûreté dès le début de l'étude d'un projet.

Les premières centrales thermonucléaires utiliseront très certainement le cycle du combustible DT. Lorsqu'elles seront construites, des combustibles plus étudiés permettront de réduire les quantités de tritium. Par la suite, elles utiliseront des combustibles au deutérium-hélium 3, par exemple, qui produisent moins de neutrons, donc moins de radioactivité dans les matériaux de structure. Ainsi, le passage au nouveau cycle du combustible fera que la fusion deviendra, avec le temps, encore plus avantageuse du point de vue de la sûreté. Peut-être sera-t-il possible de concevoir des centrales contenant si peu de radionucléides que les plans d'intervention d'urgence seront inutiles.

Réalisation pratique de la fusion

On compte entre 50 et 100 milliards de dollars d'investissements pour rendre l'énergie de fusion exploitable. Les progrès de la recherche sont conditionnés par le rythme du financement qui, selon les

* Voir «Report of the Senior Committee on Environmental, Safety, and Economic Aspects of Magnetic Fusion Energy», par J.P. Holdren, D.H. Berwald, R.J. Budnitz, et coll., UCRL-53766 (1989).

estimations, est de l'ordre de 1,5 milliard de dollars par an dans le monde entier.

Il est prévu que ITER commence à fonctionner au DT avec un bon rendement vers 2005-2010, et qu'une centrale de démonstration soit construite et mise en service une vingtaine d'années plus tard. Si les résultats sont bons, autrement dit si l'expérience d'exploitation est suffisante pour justifier le financement d'une centrale industrielle, les premières de ce type entreraient en service vers 2050.

Ce calendrier provisoire varierait dans un sens ou dans l'autre. Il serait retardé si le financement était insuffisant ou si des difficultés imprévues se présentaient au niveau du plasma ou de la technologie. Il serait abrégé en raison d'un bon en avant dans la recherche sur le comportement du plasma (comme le récent succès remporté avec le tokamak exploité en «mode de cisaillement inversé»), d'une amélioration du confinement du plasma ou d'un rythme de financement accéléré.

Un confinement du plasma autre que celui du tokamak est aussi à l'étude pour des réacteurs dont la production d'électricité serait plus économique. Par exemple, de grands stellarators sont en construction en Europe et au Japon. Cela dit, il est certain que les études de sûreté joueront un grand rôle si l'on veut gagner et garder la confiance du public, répondre à ses souhaits et lui faire accepter l'énergie thermonucléaire.

L'AIEA et la sûreté de la fusion

Encouragée par le Conseil international de la recherche sur la fusion nucléaire (CIRF), l'AIEA mène toute une série d'activités visant à promouvoir la coopération internationale pour développer les avantages de la fusion du point de vue de la sûreté et de l'environnement. Son action consiste à assister le projet ITER, dont l'étude technique est plus qu'à mi-chemin. Les protections seront incorporées dans la conception pour éviter tout rejet mortel de radioisotopes en cas d'accident grave. En 1995, l'Agence a publié le compte rendu d'une discussion sur la sûreté des réacteurs à fusion laser.

Maintes activités de l'Agence concernent les normes de sûreté aux fins de la radioprotection, le transport des matières radioactives et la gestion des déchets radioactifs, les directives pour la manipulation du tritium et la limitation des rejets de radioactivité dans l'environnement.

Depuis 1973, la sûreté de la fusion est un point important du programme de l'Agence, qui a organisé, au cours des 20 dernières années, plusieurs réunions de comité technique pour discuter des progrès accomplis, des besoins en matière de recherche et des plans d'avenir. Une cinquantaine d'experts d'une douzaine d'Etats Membres ont assisté à ces réunions qui ont eu lieu tous les trois ou quatre ans. Les

Doctrines de sûreté pour la fusion

Cette philosophie se fonde sur les concepts suivants:

- systèmes passifs et caractéristiques de sûreté intrinsèque;
- sûreté intégrée;
- fiabilité (redondance de composants — pompes, vannes, etc.; diversification — par exemple, deux sources différentes d'énergie; indépendance: la défaillance d'un composant ou d'un système ne provoque pas la défaillance d'un système associé; simplicité; et surveillance pour détecter les composants défectueux avant que l'accident ne survienne);
- étude des facteurs humains;
- possibilités de télémaintenance;
- culture de sûreté parmi le personnel;
- assurance de la qualité (codes et normes; vérification et validation; analyse de la sûreté);
- contrôle des opérations (détection des anomalies, rectification automatique);
- systèmes de sûreté pour atténuer les effets des défaillances;
- moyens d'intervention et gestion des accidents, pour préserver l'intégrité du confinement;
- plan d'intervention d'urgence pour réduire les effets des rejets de radioactivité, le cas échéant.

comptes rendus de la dernière réunion de la série, tenue en 1993 à Toronto (Canada), ont été publiés dans le *Journal of Fusion Energy* de juin 1993. La prochaine réunion est prévue pour octobre 1996, au Japon.

Perspectives et orientations futures

Les réacteurs à fusion promettent un fonctionnement sûr et sans risque pour l'environnement. La sûreté des centrales thermonucléaires, qui n'est encore que sur papier, ne saurait se comparer directement à celle des centrales nucléaires à fission ou des autres sources d'énergie en exploitation. Dans le cas de la fusion, les matières radioactives sont, pour l'essentiel, un sous-produit de l'activation neutronique, d'où la possibilité d'optimiser la protection en choisissant ou en étudiant de nouveaux matériaux, ou en utilisant des combustibles plus évolués.

Pour compter sur les avantages potentiels de la fusion en matière de sûreté et d'écologie, il faut incorporer les caractéristiques techniques de sûreté aux plans des réacteurs à l'étude. C'est ce qui se passe avec ITER qui n'est cependant qu'un réacteur thermonucléaire expérimental et ne devrait pas être considéré comme un prototype.

Analyse de sûreté pour la fusion

Comme dans l'étude de la sûreté de n'importe quelle grande installation nucléaire, l'analyse des accidents pouvant survenir dans une centrale thermonucléaire comporte plusieurs démarches.

Chaque séquence d'événements peut être représentée par un «arbre d'événements» dont chaque branche est affectée d'une certaine probabilité. Par exemple, si une vanne reçoit l'ordre de se fermer, la probabilité qu'elle ne le fasse pas est finie. S'il s'agit d'une perte de fluide de refroidissement ou d'un arrêt de la circulation, l'augmentation de la température dans la première enceinte et le manteau doit être calculée en fonction du temps, et l'on peut alors estimer dans quelle mesure divers éléments sont mobilisés, à partir d'analyses en laboratoire.

La quantité de radio-isotopes libérés lors d'un accident constitue le «terme source». Si celui-ci est un aérosol d'oxyde, ce qui est parfois le cas, la plupart se fixera sur les surfaces intérieures du bâtiment. Pendant un accident grave avec endommagement du confinement, une partie de l'aérosol risque de s'échapper dans l'atmosphère. Des codes informatiques très raffinés sont utilisés pour modéliser les phénomènes suivants:

- propagation des neutrons et des photons gamma dans la première enceinte, le manteau et le bouclier;
- production de radio-isotopes par absorption de neutrons;
- augmentation de la température due à la chaleur résiduelle et aux réactions chimiques au cours de l'accident;
- libération de radio-isotopes pendant l'accident;
- transport des aérosols à l'intérieur de l'enceinte de confinement (libérés par la réaction);
- transport des particules et des gaz libérés vers les limites du site;
- dose de rayonnement à «l'individu le plus exposé» à la limite du site.

A mesure qu'elles avancent, les études de sûreté demandent davantage de travaux interdisciplinaires. A longue échéance, on peut compter que la sûreté des centrales thermonucléaires sera renforcée grâce aux progrès de conception. Dans l'avant-propos d'une étude faite il y a 20 ans, M. C.M. Braams, président du CIRF, écrivait ce qui suit:

« ... bien que les possibilités d'exploiter les mérites écologiques de la fusion soient bonnes, il est clair que les réacteurs à fusion, s'ils deviennent réalité, auront un impact sur l'environnement — et comporteront des risques d'irradiation — dont l'importance dépendra des progrès de la recherche, des matériaux qui seront disponibles et du prix que la société sera prête à payer pour réduire cet impact au minimum».

Cela est encore vrai aujourd'hui.

Analyse d'un accident de centrale thermonucléaire

I. Examen des risques potentiels

- rayonnement gamma
- rejet courant de tritium
- rejet accidentel de matières radioactives provenant:
 - des structures
 - du fluide de refroidissement
 - des produits de corrosion
 - des poussières
 - du tritium présent dans les parois, le manteau, le fluide de refroidissement, le système à vide, le système d'alimentation en combustible
- matières toxiques (béryllium, vanadium, plomb)
- champs électromagnétiques
- vide
- fluides cryogènes
- gaz asphyxiants (N₂, He)
- réactions chimiques:
 - métaux liquides avec l'eau, l'air ou le béton
 - surfaces chaudes avec l'eau ou l'air
 - dégagement d'hydrogène et explosion
- haute tension
- organes à mouvement rotatif
- levage de masses pesantes
- objets projetés par des aubes de turbine, des arcs électriques au niveau des bobinages, ou des gaz sous haute pression

II. Analyse des sources d'énergie pouvant libérer des matières radioactives

- chaleur résiduelle [910] GJ la première semaine
- réactions chimiques [800] GJ
 - fluide de refroidissement
 - eau/air + composants en contact avec le plasma chaud
- énergie retenue dans le fluide de refroidissement 300 GJ
- énergie retenue dans le bobinage de l'électro-aimant 120 GJ
- pleine puissance de la réaction de fusion 1,5 GJ/seconde
- énergie magnétique du plasma 1,3 GJ
- énergie thermique du plasma 1,2 GJ
- énergie thermique du caisson faible
- vide faible

III. Analyse d'accidents possibles

- événements dans le plasma
 - surpuissance de fusion
 - rupture de confinement
 - arrêt retardé
- perte de fluide de refroidissement
- arrêt de circulation
- perte de vide
- panne d'électro-aimant
- perte de fluide cryogène
- panne du circuit tritium
- panne de systèmes auxiliaires