

MAI 1979

INT 95/79

L'IMPACT ECOLOGIQUE DE LA FUSION

F. Troyon

Centre de Recherches en Physique des Plasmas  
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

## L'IMPACT ECOLOGIQUE DE LA FUSION

La nécessité de trouver une énergie de substitution au pétrole à plus ou moins longue échéance est admise par tous. Parmi les critères de choix essentiels figurent les critères écologiques de minimisation de l'impact sur l'environnement. Les ennuis rencontrés par le programme de réacteurs nucléaires dans presque tous les pays nous contraignent à considérer également les problèmes écologiques susceptibles d'être soulevés envers d'éventuels réacteurs à fusion. Comme il n'existe pas de tels réacteurs, on doit se limiter à un inventaire des problèmes potentiels et à une appréciation quant à la possibilité de les résoudre. Examinons donc les éléments essentiels d'un réacteur à fusion tels qu'on les imagine dans l'état actuel de nos connaissances scientifiques et technologiques.

### Schéma général de principe d'un réacteur

Dans cette discussion nous omettons pour le moment le cas des réacteurs qui utiliseraient des "microexplosions" en pensant uniquement à un réacteur quasi-stationnaire à confinement magnétique (Tokomak par exemple). Pour notre usage, on peut diviser le réacteur en 5 parties distinctes essentielles (voir schéma) :

- un mélange de combustible en réaction sous forme plasmatique, tenu éloigné de toute paroi par un système de confinement magnétique et entouré d'un vide de bonne qualité,
- une enceinte qui tient le vide, dite première paroi,
- une structure complexe qui entoure complètement l'enceinte, désignée sous le nom de manteau,

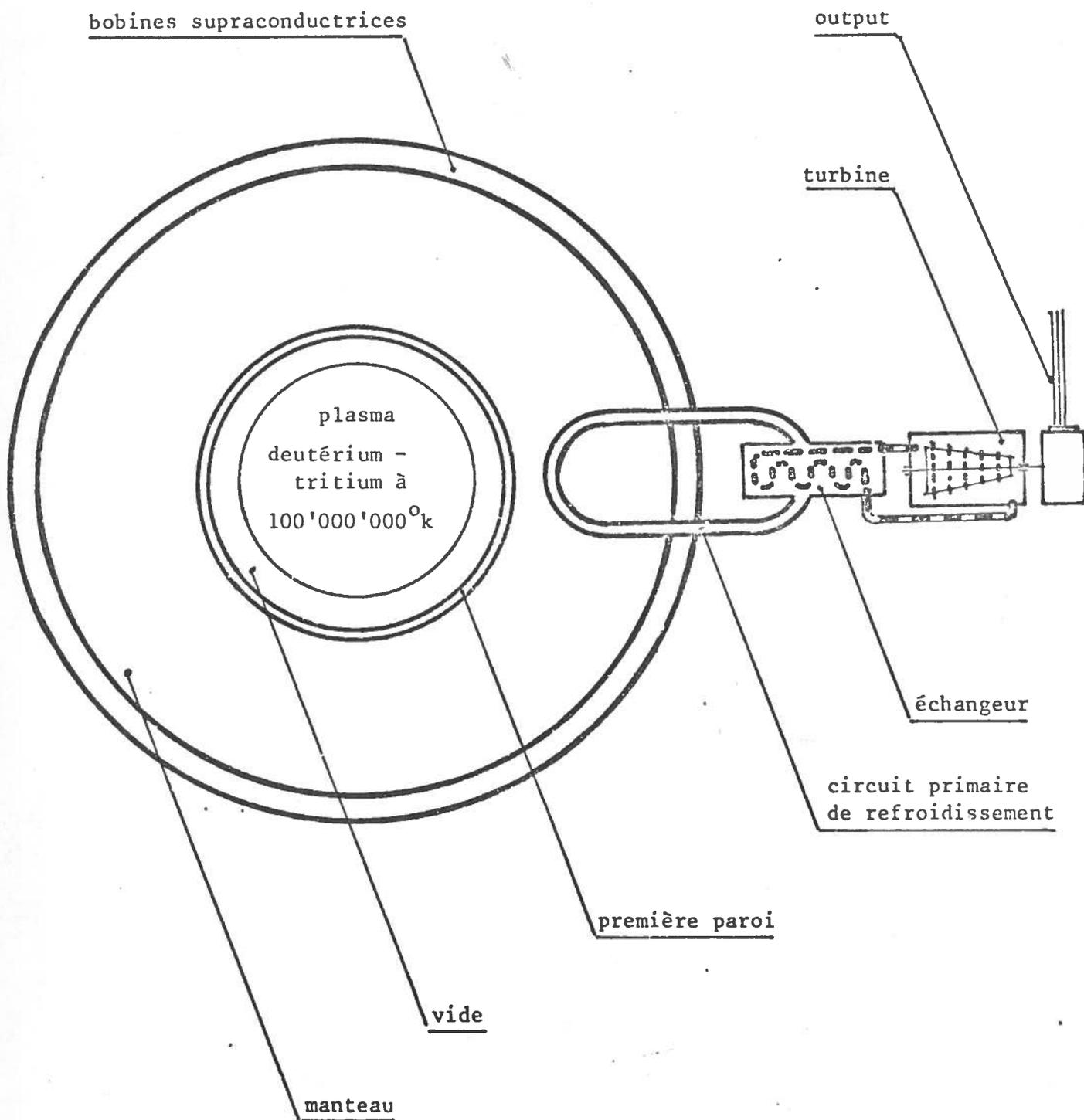


Schéma général d'un réacteur  
 à confinement magnétique

- des bobines supraconductrices, qui génèrent les champs magnétiques nécessaires au confinement du plasma,
- des systèmes auxiliaires : échangeurs de chaleur, turbines-générateurs conventionnels et le séparateur de tritium.

Beaucoup d'autres éléments (injecteurs, bobines auxiliaires, etc.) ne sont pas mentionnés, car ils ne jouent aucun rôle dans notre discussion.

### Problèmes potentiels

Examinons le rôle de chaque élément, les problèmes de sécurité qui peuvent se poser et leur degré de sévérité.

L'objectif actuel du programme mondial consiste à faire fusionner un mélange de deuterium et tritium. Le deuterium est ce que l'on appelle l'hydrogène lourd, stable, deux fois plus lourd que l'hydrogène léger ordinaire et ayant des propriétés chimiques presque identiques à celui-ci. Combiné à l'oxygène, il donne l'eau lourde. L'eau ordinaire en contient toujours une quantité appréciable : 1 litre d'eau contient assez de deutérium pour produire une énergie équivalente à 300 l de pétrole. Le tritium est aussi de l'hydrogène, mais 3 fois plus lourd que l'hydrogène léger. Il est radioactif, se désintégrant en hélium léger, qui lui est stable. C'est une désintégration  $\beta$  qui émet un électron de 18,6 keV au maximum avec une durée de vie de 12,7 années. Notons que l'électron produit a une énergie comparable à celle des électrons dans un tube TV couleur, ce qui montre qu'elle n'est pas dangereuse aussi longtemps que le tritium reste dans l'enceinte. Le tritium n'existe pas dans la nature et doit être régénéré. C'est là un des rôles du manteau et le problème de sa fuite se pose à cet endroit.

Le mélange réagit à une température de l'ordre de  $100'000'000^{\circ}\text{K}$  et produit de l'hélium lourd, gaz totalement inerte et stable, et des neutrons rapides de  $14\text{MeV}$  qui sortent du plasma et bombardent la première paroi. Il n'existe donc aucun résidu radioactif de la réaction. Comme les neutrons produits ne peuvent pas réagir dans le mélange, il n'y a pas de possibilité de réaction en chaîne. Si le mélange devient trop chaud, le confinement magnétique n'est plus suffisant, le mélange entre en contact avec la paroi, se refroidit instantanément, et la réaction s'arrête. La quantité de chaleur contenue dans le plasma est toujours très faible, car il est très chaud, mais très peu dense. La paroi ne s'échauffe pas appréciablement, tout au plus peut-il y avoir ablation en surface due au choc thermique. Donc aucune possibilité d'explosion même limitée. Ceci constitue un atout majeur potentiel du réacteur à fusion.

La première paroi constitue un des grands problèmes à résoudre et une inconnue. Elle peut être simple ou composée et le choix du ou des matériaux à utiliser est encore ouvert. Du point de vue de l'environnement, le problème est l'activation de la paroi sous l'effet du bombardement neutronique qui conduira à un problème de déchets radioactifs au moment de son remplacement. Pour minimiser le problème les matériaux doivent être choisis suivant les trois critères suivants : transparence maximum aux neutrons, activation ne donnant que des résidus radioactifs de courtes durées de vie, d'énergie aussi faible que possible, matériel résistant au bombardement neutronique de manière à ne pas devoir le changer trop souvent au cours de la vie du réacteur. A ce jour, peu d'études sérieuses ont été faites dans cette optique et certaines données essentielles relatives aux sections efficaces d'excitation par collision inélastique avec les neutrons rapides manquent encore. Le point de vue traditionnel est que le critère de résistance au bombardement sera le plus difficile à satisfaire et qu'il déterminera le choix du matériel. C'est pourquoi le niobium, un métal réfractaire utilisé

dans les surgénérateurs, et un alliage d'acier inox connu sous le nom de SS 316, on été les premiers considérés. Ils conduisent à des déchets radioactifs  $\beta$  (électrons) et  $\gamma$  (photons) de longue durée de vie qui devront être stockés à la manière des déchets des réacteurs à fission. Le vanadium par contre a été étudié en ce qui concerne l'activation uniquement et il ne donne qu'une très faible radioactivité. Une demi-heure suffirait à désactiver la paroi ! Mais sa résistance au bombardement neutronique rapide est mal connue, spécialement lorsqu'il est allié à d'autres métaux. Des matériaux légers (bore, carbone, beryllium, sillicium, etc.), sous formes de céramiques pour la plupart, ont été aussi étudiés et conduisent à de faibles activations. Dans l'état actuel de nos connaissances, on doit admettre que la situation est encore confuse et le restera encore longtemps jusqu'à ce que l'on dispose de sources neutroniques intenses et réacteurs d'essais pour des essais réalistes. Cependant la multiplicité des matériaux susceptibles d'être utilisés donnant des déchets radioactifs  $\beta$  et  $\gamma$  de durée de vie ne dépassant pas quelques années permet d'envisager avec optimisme la solution au problème de l'activation de la première paroi. Notons également que la mise au point de procédés peu coûteux de séparation isotopique, poursuivie activement par le monde pour des raisons militaires, contribuerait grandement à la solution de ce problème en limitant les possibilités d'activation d'une matière donnée. Néanmoins, il y aura toujours des déchets radioactifs dus aux impuretés activées même dans la situation la plus favorable.

Le manteau est une structure compliquée qui, d'une part, régénère le tritium consommé à partir de lithium, et d'autre part transforme l'énergie des neutrons qui sortent de la machine en chaleur, qui est évacuée par l'intermédiaire d'un fluide de refroidissement primaire. Les neutrons émis par le plasma réagissent avec le lithium en redonnant soit des neutrons additionnels, soit du tritium et de l'hélium. Sur le chemin les neutrons sont également ralentis par collisions avec les atomes de lithium et avec d'éventuelles autres matières modératrices,

d'une manière analogue à ce qui se passe dans un réacteur à fission conventionnel. L'énergie de fusion se retrouve sous forme de chaleur dans le manteau qui doit être évacuée et convertie en électricité par un système conventionnel. Les réactions des neutrons sur le lithium qui régénèrent le tritium et augmentent le flux neutronique ne produisent aucun résidu radioactif autre que le tritium.

Trois problèmes potentiels sont à considérer dans le manteau : activation de la structure mécanique et peut-être électrique, perte de tritium dans l'environnement, danger d'explosion par rupture du système de refroidissement par exemple. Tout ce qui a été dit au sujet de la première paroi peut être repris pour la structure mécanique avec des critères moins sévères. Par une disposition judicieuse de modérateur, les activations qui ne sont possibles qu'avec des neutrons rapides sont évitées. Un problème additionnel peut surgir s'il s'avère nécessaire de placer des bobinages à l'intérieur du manteau pour des raisons de confinement magnétique. On ne peut alors éviter d'utiliser du cuivre qui s'activera. Mais là encore, on ne peut pas tirer de conclusions, car si les conducteurs peuvent être entourés de modérateur, l'activité deviendra sans importance (courte durée de vie). Le tritium est un gaz qui diffuse facilement à travers les parois chauffées. Ceci implique donc un constant rejet radioactif dans l'environnement à travers le système de refroidissement. En comparaison les pertes directes à travers l'enveloppe extérieure peuvent être rendues négligeables. Les fuites devraient pouvoir se limiter à l'échangeur de chaleur entre le circuit de refroidissement primaire du manteau et le circuit externe. La température, le choix du matériel de l'échangeur et la nature du fluide de refroidissement primaire sont les facteurs importants. La température de l'échangeur dépend du cycle d'extraction de la chaleur. Une extraction énergétique partielle au niveau du cycle primaire déjà, comme dans certains surgénérateurs (toping), abaisserait la température de l'échangeur et réduirait les fuites. L'emploi de couches minces d'oxydes sur les surfaces permet

en principe de réduire encore plus ces pertes, mais le procédé n'a pas été démontré à grande échelle. Enfin les fuites dépendent directement de la concentration de tritium dans le fluide qui circule dans le manteau et cette concentration dépend de la nature du fluide et du procédé d'extraction du tritium. Là encore on doit constater que peu d'efforts ont été faits à ce jour dans ce domaine car le problème n'est jamais apparu comme aigu. En effet, les quelques études qui ont été faites ont montré que le niveau d'activité maximum calculé dans l'eau de refroidissement, sans précautions spécifiques, est toujours bien inférieur au taux maximum présentement admis pour le tritium (de 2 à 200 curie/jour/1000MWe suivant les projets). Si la volonté de réduire ce rejet à un niveau encore plus bas se manifeste, des solutions techniques existent et certainement beaucoup d'autres seront encore trouvées, mais seuls des essais permettront de trancher la question d'une manière certaine et de déterminer la relation entre le coût et le niveau de fuite du tritium. Notons que, anticipant un resserrement des normes de rejet maximum conforme à la tendance actuelle, la norme utilisée maintenant dans ce genre d'études est de 1 curie/jour/1000MWe ce qui donne une activité de l'ordre de  $10^{-10}$  à  $10^{-9}$  curie/litre, alors que le standard américain actuel est de  $3 \cdot 10^{-6}$  curie/litre.

Bien que le réacteur à fusion ne puisse pas devenir une explosion nucléaire, il convient d'examiner quelles pourraient être les conséquences d'un sabotage ou plus simplement d'une défaillance du système de refroidissement conduisant à une perte du fluide de refroidissement primaire et d'autres matériaux du manteau. Le lithium réagit violemment avec l'eau ou l'air, comme le sodium. La situation est analogue à celle du surgénérateur à métal liquide. Il existe donc un danger potentiel d'incendie violent. Mais d'autres solutions sont possibles. Par exemple, on peut substituer au lithium liquide un mélange de fluorure de lithium et de fluorure de beryllium,

connu sous le nom de "FLIBE", qui ne réagira pas et qui possède d'excellentes propriétés neutroniques. Une autre solution consiste à séparer les fonctions de régénération du tritium et de refroidissement en utilisant un composé solide de lithium et de l'hélium comme fluide. Une céramique composée d'alminate de lithium est une possibilité présentement étudiée et qui possède d'autres avantages encore. Le véritable danger potentiel réside dans une libération éventuelle du tritium contenu dans le manteau. Pour le minimiser, il faut maintenir au niveau le plus bas possible la quantité de tritium présente dans le manteau. Or, cette quantité dépend de la structure du manteau, du fluide extracteur et du procédé de séparation. Peu d'études ont été effectuées à ce jour et on note d'énormes différences suivant le schéma choisi. Par exemple, avec un manteau de céramique refroidi à l'hélium, l'inventaire de tritium est estimé à quelques dizaines de grammes seulement, alors qu'il atteindrait plus de 100 kg avec un manteau de lithium pur. Il ne semble donc pas qu'il y ait d'obstacles insurmontables pour maintenir l'inventaire du tritium à un niveau acceptable en cas d'accident.

Pour ce qui est des autres matériaux, les remarques au sujet de l'activité de la première paroi s'appliquent ici également. Suivant le matériel structural utilisé il peut y avoir un problème de chauffage retardé comme dans les réacteurs à fission. C'est le cas avec le niobium et l'acier inox 316, pour lesquels l'activité en régime permanent est comparable à celle du combustible dans un réacteur à fission; mais même dans ces cas particulièrement défavorables le "danger biologique" du manteau reste très inférieur à celui du combustible irradié en raison de la présence dans ce dernier de substances particulièrement nocives comme le iode activé et les transuraniens. On mentionne le chiffre de 10'000 comme réduction du risque dans le cas le plus défavorable, mais il existe trop d'incertitudes pour prendre ce chiffre autrement que comme indicateur. Ce risque est encore beaucoup plus faible pour les autres

matériaux. On ne peut que constater une fois de plus que le problème potentiel est là, qu'il est au pire déjà beaucoup plus faible que pour la fission et qu'il pourrait devenir minime si les autres matériaux se révélaient utilisables.

Les bobines supraconductrices entourent toute l'installation. Elles créent le champ magnétique principal de confinement du plasma. Des blindages les protégeront du rayonnement provenant de l'activation du manteau. Le seul problème prévisible est une transition accidentelle du supraconducteur qui redevient dans son état normal de très mauvais conducteur. La forte dissipation ohmique qui en résulte peut provoquer des dégâts importants, mais ceux-ci peuvent être minimisés par une construction adéquate et de toute manière il s'agit là d'un accident non-nucléaire sans libération de produits radioactifs et qui n'affecte donc pas l'environnement.

Parmi les équipements auxiliaires (vapeur, turbine-générateur, ...) les seuls éléments pouvant présenter un problème sont le séparateur de tritium et les installations de stockage de la réserve de tritium. Mais ces éléments étant à basse température, l'étanchéité de ces installations ne pose pas de difficultés.

#### Autre filière

La filière deutérium-tritium examinée n'est pas la seule possible. Il est possible en principe de n'utiliser que du deutérium, le tritium étant généré par une première fusion du deutérium dans le plasma et consommé immédiatement "sur place" sans qu'il sorte de l'enceinte à vide. Cette solution impliquerait la suppression du lithium et de ses problèmes et réduirait les fuites de tritium à un niveau insignifiant.

Cette filière n'est pas envisagée présentement, car elle requiert une température du plasma 5 fois plus élevée et une qualité de confinement d'un ordre de grandeur supérieur. De telles performances du système de confinement représentent une trop grande extrapolation par rapport à ce que l'on fait maintenant pour espérer l'atteindre dans un temps raisonnable. Néanmoins, si on veut évaluer le potentiel des réacteurs à fusion comme source d'énergie pour les générations à venir, il faut tenir compte de cette possibilité qui constituera toujours l'objectif ultime des recherches.

#### Autres schémas de réacteurs

Le réacteur à fusion quasi-stationnaire à confinement magnétique décrit et examiné est celui qui paraît avoir le plus de chances d'aboutir dans un temps raisonnable. C'est aussi celui qui a été examiné le plus attentivement quant à son impact sur l'environnement et celui qui présente le moins de problèmes. Examinons brièvement quelques autres variantes et les problèmes additionnels soulevés.

La première variante est le générateur pulsé basé sur la détonation successive de "microexplosions" nucléaires à l'aide de faisceaux lasers ou d'électrons. Le grand problème réside dans la taille de chaque explosion. Dans l'état actuel des connaissances, il apparaît probable que chaque explosion sera de l'ordre de 1 à 100 tonnes de TNT au moins. Ces explosions ont lieu dans le vide et leurs effets peuvent être moindres que ne l'indique l'analogie avec le TNT. Il n'existe aucune information quant à la possibilité de tenir de telles explosions en raison des incidences militaires, mais quelle que soit la solution, il est clair que le choix de matériaux sera très limité, que le danger d'émissions radioactives sera accru, l'étanchéité devant être difficile à garantir dans un tel environnement, et que la probabilité de ruptures

de l'enceinte, du manteau et de l'enveloppe augmente. Le passage ultérieur au deutérium pur paraît être une impossibilité. La plupart des schémas proposés conduisent à adjoindre des substances lourdes au combustible pour améliorer le rendement. Ceci implique des résidus radioactifs de la réaction. Cette solution est encore dans un état préliminaire, mais d'ores et déjà on peut prédire qu'elle présentera des problèmes additionnels aigus comparé au réacteur quasi-stationnaire. C'est une solution de repli en cas d'échec complet de la voie magnétique.

Une autre variante consiste à adjoindre un matériau fissile dans le manteau pour profiter des neutrons excédentaires de la fusion. On appelle un tel réacteur réacteur hybride. Il est clair qu'une telle solution cumule les problèmes de la fusion et de la fission. Elle n'a de sens que comme position ultime de repli. Dans la même veine mentionnons le réacteur symbiotique qui transforme du matériel non-fissile en matériel fissile, par exemple de l'uranium 238 en plutonium comme dans un surgénérateur. Les problèmes sont trop évidents pour s'y arrêter.

### Conclusions

Dans l'état actuel des connaissances aucun obstacle insurmontable à la réalisation d'un réacteur à fusion à confinement magnétique fonctionnant avec un minimum de nuisances n'est connu. Le problème des déchets radioactifs, inévitable dans tout réacteur nucléaire, est d'un tout autre ordre de grandeur que dans les réacteurs à fission : pas de plutonium, pas de résidu radioactif de combustion et une activité résiduelle de la structure, au pire comparable à celle du combustible irradié, mais avec un danger biologique de plusieurs ordres de grandeur inférieur.

Il faut se souvenir toutefois qu'il s'agit de potentialités qui ne pourront être testées que lorsqu'un réacteur de fusion sera construit, ce qui suppose au préalable la résolution des problèmes de confinement et chauffage qui restent les problèmes immédiats et cruciaux.

F. TROYON

Lausanne, mars 77