



Les applications industrielles de la M.H.D.

Dans notre premier article, nous avons rappelé les bases physiques de la conversion magnétohydrodynamique (M.H.D.). Nous avons également fait un court historique de son développement expérimental. Nous continuons ici cet historique en abordant les différentes applications industrielles possibles. Cet article étant en grande partie traduit d'un article datant de 1980, certaines données numériques peuvent être dépassées. Dans une troisième partie, nous examinerons avec des spécialistes français de Grenoble l'actualité de la M.H.D.

1. La fission nucléaire

Les produits de combustion des réacteurs nucléaires conventionnels ne sont pas des particules chargées électriquement. En fait, le principal produit de la réaction de fission nucléaire est de l'énergie thermique, qu'il faut transférer à un fluide de travail, pouvant être ionisé pour une conversion M.H.D. directe de puissance. Il existe principalement deux approches pour résoudre ce problème.

La première a déjà été décrite dans notre numéro précédent. Elle utilise, pour les systèmes M.H.D. « fermés » de type charbon, un gaz noble (hélium ou argon enrichi en césium), comme fluide de travail. Pour une température de 1700°C, on estime l'efficacité de conversion de ce type de système entre 50 et 54%. Jusqu'aux années 75, cette méthode était considérée comme la plus réalisable.

Hélas, dès que l'administration Carter mit fin aux projets de réacteurs à haute température, les recherches dans ce domaine diminuèrent fortement aux Etats-Unis. Par contre, les Japonais se lancèrent dans un projet appelé Disk II, inspiré par les essais du MIT d'une configuration M.H.D. particulière en forme de disque. Cette configuration à effet Hall utilise un plasma d'argon et ne possède qu'une seule charge électrique, plutôt qu'une douzaine de paires d'électrodes connectées séparément. Tant que les surgénérateurs à métal liquide apparaissent comme la future génération de réacteur, un effort international important était consacré à l'étude des systèmes M.H.D., utilisant différentes formes de métaux liquides ou gazeux comme fluide conducteur.

La M.H.D. à métal liquide

Aux Etats-Unis, c'est le Laboratoire

Marsha Freeman Gil Rivière-Wekstein

re National d'Argonne (Illinois), qui a engagé les travaux les plus importants sur la M.H.D. à métal liquide, également appelée L.M.M.H.D. Les expériences ont commencé en 1972 et quelques prototypes furent opérationnels vers 1980.

La difficulté principale dans l'utilisation de métal liquide réside dans le fait qu'il n'est pas compressible et, qu'il ne peut donc pas être suffisamment accéléré dans la tuyère de la M.H.D. Cependant, différents systèmes à deux phases ont été mis à l'étude afin de remédier à ce problème.

L'avantage non négligeable de la L.M.M.H.D. c'est que le métal liquide est fortement conducteur et génère donc un courant électrique important. De plus, l'utilisation de métal liquide dans les réacteurs rapides et les réacteurs de fusion résoud le problème de l'interface entre l'eau et le métal que l'on trouve dans une turbine à vapeur.

Enfin, la conversion électrique d'un système à métal liquide peut être obtenue avec des températures bien plus basses qu'avec un gaz noble. Des expériences à Argonne ont été conduites sur un prototype proche d'un système commercialisable avec des températures allant de 200°C à 540°C.

Dans un modèle L.M.M.H.D. de base, on se sert d'un gaz inerte comme fluide de travail. Il parcourt la tuyère M.H.D., véhiculant le métal liquide avec lequel il a été préalablement mélangé dans le champ magnétique (Figure 1). Le métal liquide ayant une capacité calorifique élevée, la détente se fait à température quasi constante, de telle sorte que le liquide agit comme une source « infinie » de chaleur pour le gaz.

Une grande partie de la chaleur restée dans le gaz après la conversion M.H.D., peut être récupérée une fois ce dernier séparé du liquide et ren-

voyé dans le mélangeur. La chaleur peut également être utilisée pour une turbine à vapeur ou à gaz.

Les résultats d'Argonne, rendus publics en juin 1979, étaient très encourageants : le LT-4 à température ambiante de 20 kW électriques, fonctionnant avec un mélange de sodium-potassium liquide et d'azote gazeux, a opéré à des courants dont les densités étaient supérieures ou égales à celles requises pour les systèmes habituels, avec des niveaux de puissance de 32 MW par centimètre cube. Le rendement de conversion mesuré à cette température basse était supérieur à 60%, et les chercheurs pensent pouvoir l'optimiser pour atteindre 80%.

En 1977, les chercheurs d'Argonne ont démarré des expériences utilisant un mélange homogène de gaz et de liquide (avec un pourcentage du volume de gaz élevé par rapport au volume total), sous forme de mousse. On crée celle-ci dans le mélangeur et on la détruit dans le séparateur ; elle a une durée de vie d'un dixième de seconde, le temps de la traversée dans la tuyère M.H.D. Argonne a testé plusieurs agents à surface active ou poudres pour produire la mousse, l'étape suivante étant de la tester dans un générateur expérimental.

Le premier modèle L.M.M.H.D. du monde fut le HT-1 construit à Argonne. Au cours d'essais, le HT-1 a fonctionné pendant une durée totale de 325 heures à des températures allant de 200°C à 540°C, avec un flux monophasé (sodium liquide) et un flux biphasé (sodium liquide et azote gazeux).

Au Japon, le département d'ingénierie nucléaire de l'Université d'Osaka conduit des essais sur les effets du champ magnétique dans les générateurs L.M.M.H.D. En effet, le courant de Faraday généré par le métal liquide conducteur étant beaucoup plus important dans la L.M.M.H.D. que dans les systèmes M.H.D. à plasma, l'effet Hall, produit par ce courant de Faraday, est également plus important. Les Japonais étudient les effets de pincement dans le fluide et la formation de bulles dans le flux à deux phases.

C'est en Union soviétique que les programmes M.H.D. furent les plus ambitieux. L'Institut des Hautes Températures de l'Académie des Sciences et l'Institut de l'Énergie Atomique à Kurchatov étudièrent toutes les formes possibles d'applications de la conversion M.H.D. avec des sources de chaleur d'origine nucléaire.

Un groupe de savants soviétiques annonça, lors d'une visite aux Etats-Unis en 1979, qu'ils étudiaient quatre à cinq mélanges différents de métaux liquides, parmi lesquels : le système monophasé avec plusieurs types de liquides ; un système à métal liquide

mélangé avec de la vapeur injectée ; des systèmes biphasés semblables à ceux des Etats-Unis ; différents systèmes utilisant des mousses ; et d'autres modèles prometteurs, en particulier un modèle qui utilise le combustible nucléaire comme fluide de travail.

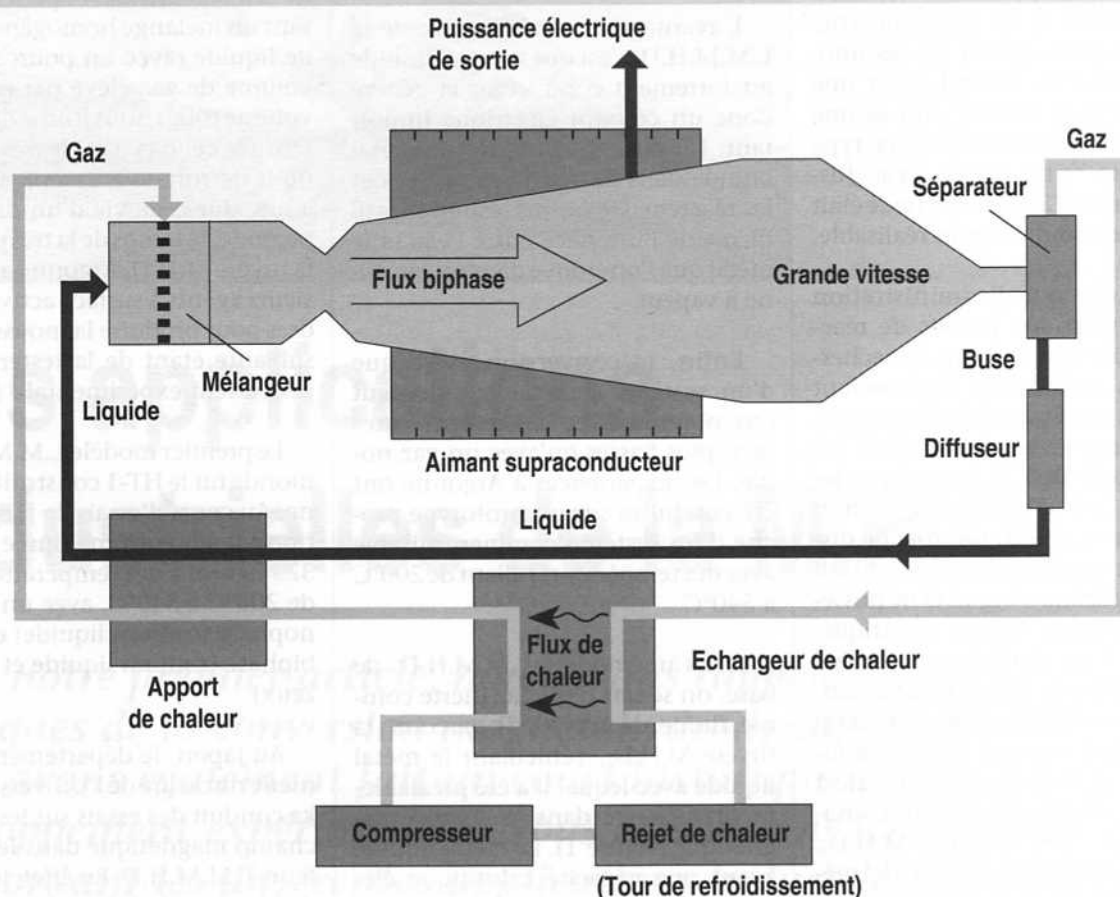
Presque tous les modèles de L.M.M.H.D. qui ont été développés pourraient être pleins d'avenir. En fait, aux Etats-Unis, la seule contrainte est l'indisponibilité de réacteur rapide et de réacteur à haute température, ce qui n'a pas, malgré tout, empêché les scientifiques de concevoir des réacteurs à fission plus adaptés à la conversion M.H.D.

Les réacteurs à cavité

Richard Rosa, l'un des scientifiques les plus créatifs dans le domaine de la M.H.D. a décrit dans un livre ses idées sur les générations futures de technologies nucléaires M.H.D. Rosa, qui a construit le réacteur Mark I d'Avco, souhaitait atteindre des températures très élevées dans les réacteurs nucléaires.

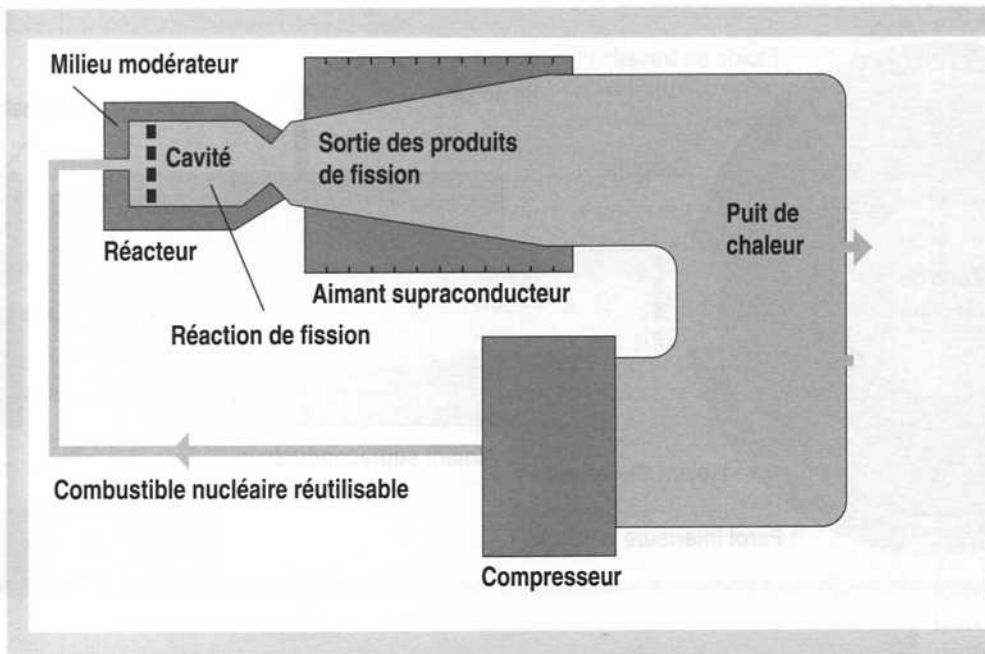
Un de ses projets était le réacteur avec cavité ou à régulateur externe (Figure 2). Si, explique-t-il, une quan-

Figure 1 - Système de puissance M.H.D. et métal liquide



Dans un système M.H.D. à métal liquide, on applique la chaleur au fluide de travail gazeux et au métal liquide. On les mélange ensuite avant d'entrer dans la tuyère M.H.D., où l'on extrait électriquement la puissance. Le fluide biphasé est ensuite accéléré à grande vitesse, afin que le gaz et le liquide puissent être séparés. Dans ce concept, le gaz est repris et régénéré par un échangeur de chaleur afin que l'énergie restant dans le gaz sous forme de chaleur puisse être renvoyée dans le cycle. Le métal liquide est récupéré par un diffuseur, où sa vitesse est ralentie et sa pression accrue ; après réchauffement, il retourne au mélangeur.

Figure 2 - Réacteur à cavité nucléaire à conversion M.H.D.



Dans un réacteur à cavité (modéré de façon externe), on utilise les produits de la réaction de fission nucléaire comme fluide de travail dans une conversion directe M.H.D. Dans ce concept simplifié, la chaleur des gaz de sortie du générateur M.H.D. peut être utilisée dans un échangeur de chaleur pour fermer le cycle du système. Le concept permet aussi la réutilisation du combustible nucléaire.

tité suffisante de combustible uranium sous forme de gaz, de liquide, ou de poussières était injectée dans la cavité, et mélangée avec un propulseur ou un gaz de travail, le mélange dans le réacteur pourrait atteindre de très hautes températures. Le point de fusion de l'uranium se situant autour de 1400° K, si cette température était atteinte, le combustible, avec quelques additifs chimiques qui accroîtraient l'ionisation, pourrait donc lui-même être utilisé comme fluide de travail. La densité du combustible injecté permettrait l'auto-entretien de la réaction en chaîne, qui serait contrôlée en employant, par exemple, du béryllium, du carbone ou de l'eau lourde.

D'autres chercheurs ont essayé d'adapter le réacteur à cavité à la propulsion de fusées. Mais, cette application est bloquée par le fait qu'elle obligerait à éjecter un combustible nucléaire. En effet, pour atteindre la masse critique, il faut plus de combustible que l'on n'en consomme pendant la durée de vie du réacteur.

Pour un générateur d'électricité à cycle fermé, le combustible nucléaire et le gaz de travail seraient mélangés et injectés dans la tuyère M.H.D. Les molécules gazeuses d'uranium se condenseraient à un moment donné du

cycle, après quoi, il serait possible de les séparer du gaz de travail. Dans tous les cas, le combustible nucléaire resterait à l'intérieur du système et serait réutilisé.

La conversion M.H.D. par induction

Le Dr. Erik Witalis de l'Institut suédois de Recherche de la Défense Nationale, à Stockholm, a publié un texte en 1979 dans lequel il explique les avantages de la conversion M.H.D. par induction par rapport à la conversion M.H.D. par conduction.

Tous les modèles de M.H.D. décrits utilisent des électrodes pour conduire un courant de Faraday ou courant M.H.D. provoqué par effet Hall dans le fluide conducteur. Un facteur important qui limite l'efficacité de la conversion tient à la conductibilité électrique du fluide, bien que celle-ci puisse être améliorée en utilisant des aimants supraconducteurs à champ magnétique élevé. De plus, les modèles les plus répandus de tuyère en diagonale nécessitent un conditionnement du courant parce que les tensions ne sont pas réparties également le long des tuyères. Enfin, le courant produit dans la tuyère est un

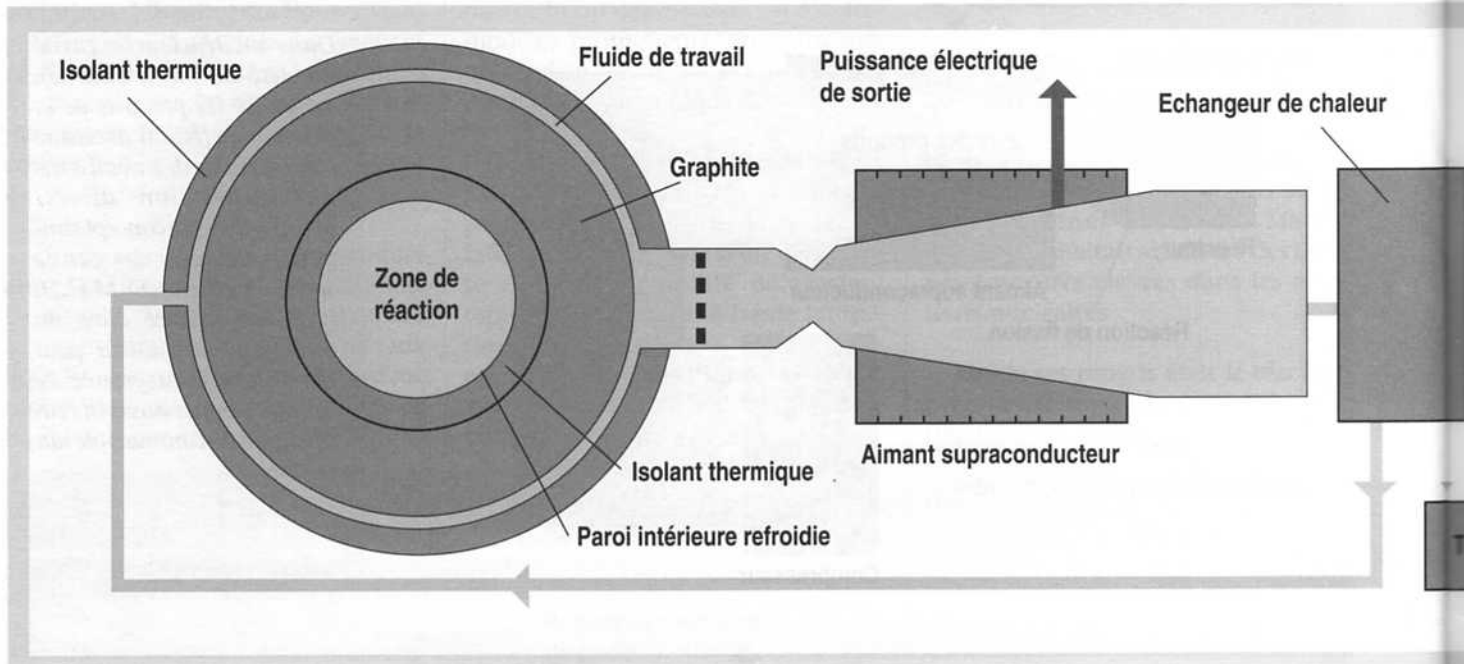
courant continu et doit passer par un convertisseur à courant alternatif avant d'être délivré au réseau.

L'on peut avoir un courant par induction dans le cas où l'interaction entre le gaz (ou le conducteur) et le champ magnétique externe est non-stationnaire : soit le flux est soumis à un champ magnétique oscillant, soit le fluide est pulsé ou oscillant dans un champ constant. Il se crée alors une différence de potentiel à chaque extrémité du conducteur dans le premier cas, et un courant induit peut être récupéré dans le second cas.

Erik Witalis fait référence aux travaux réalisés en 1957 par S.A. Colgate et R.L. Aamodt, qui proposèrent un système M.H.D. par induction d'un « flux véritablement non constant, par exemple de vapeur d'uranium enrichi oscillant dans la tuyère d'un générateur M.H.D. reliant deux cavités de réacteur à cœur gazeux, ou encore, deux chambres à explosion ».

Witalis explique ce concept : « L'idée était que la haute densité réalisée dans l'une des deux chambres permettrait au gaz fissile d'atteindre la masse critique, d'exploser, de pousser le gaz de fission fortement ionisé jusqu'à l'autre chambre où le même processus se produirait, etc. Pendant les années 60,

Figure 3 - Un système M.H.D. conventionnel avec



ce concept également appelé le réacteur « Poof-Poof » faisait sourire ».

Au milieu des années 70, l'académicien soviétique E.P. Velikhov développa une idée similaire pour les réacteurs à fusion dans lesquels se produisent des micro-explosions de réactions thermonucléaires par radiation laser ou par rayons de particules chargées.

En 1979, Witalis proposa un projet qui n'était qu'une modification et une amélioration du schéma de Colgate et d'Aamodt. Il suggéra, afin d'augmenter la conductibilité électrique du fluide — chose encore plus importante dans le cas de la M.H.D. par induction que par conduction —, d'utiliser un composé de fluorure d'uranium comme combustible pour les réacteurs à cœur gazeux. De plus, des sels alcalins pourraient être ajoutés au flux de gaz pour augmenter l'ionisation thermique aux températures relativement basses de 1200°C à 1700°C

Witalis émit l'idée que des poussières métalliques pourraient être utilisées pour accroître encore la conductibilité électrique : chaque particule métallique serait entourée d'un nuage d'électrons résultant de l'émiss-

sion thermique. En d'autres termes, la température ne serait pas suffisamment élevée pour ioniser les particules de métal elles-mêmes mais les électrons « libres » des particules de métal seraient portés à des températures de 2200°C. Comme le remarque Witalis, ce procédé est très complexe et « les expériences de ce genre pour la M.H.D. sont rares ».

Ce type de conversion directe révolutionnerait entièrement l'efficacité et donc la rentabilité de la conversion de la chaleur provenant d'une centrale électrique nucléaire. S'il n'y a pas eu d'expérience pour ces systèmes, c'est simplement parce que les technologies avancées dans le domaine du nucléaire ont été arrêtées pour des raisons politiques, et cela dans pratiquement tous les pays.

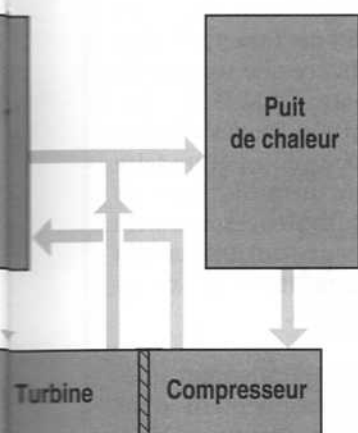
2. La fusion nucléaire

La combinaison idéale serait évidemment une source d'énergie utilisant comme combustible des particules électriquement chargées et avec système M.H.D. employant ces parti-

cules pour convertir directement l'énergie en électricité. Dans les années 70, l'on prévoyait que la première génération des réacteurs à fusion utiliserait une réaction deutérium-tritium, celle-ci produisant 77% de l'énergie sous forme de particules neutres et le reste sous forme de particules alpha, c'est-à-dire d'hélium chargé positivement. Dans le cas de la fusion deutérium-deutérium, 70 à 80% de l'énergie produite se présenterait sous forme de particules chargées électriquement. Mais la conversion M.H.D. est déjà envisageable avec la première génération de réacteurs de fusion, qu'ils soient basés sur le confinement magnétique ou inertiel.

Au début des années 60, lors de la première conférence sur la M.H.D., ceci fut évidemment objet de discussions : les scientifiques du Laboratoire de Physique des Plasmas de Princeton et du Laboratoire de Radiation de Lawrence, travaillant sur la fusion, firent un exposé sur les développements de la fusion. Entre la fin des années 60 et le début des années 70, des percées importantes furent réalisées aussi bien dans le confinement que dans la montée en température, stimulant d'autant les études de systèmes de fusion M.H.D., aux Etats-Unis et en Union soviétique.

un réacteur de fusion



La chaleur engendrée par une réaction de fusion peut être utilisée dans un système M.H.D. en boucle fermée identique à celui d'un réacteur à haute température. Dans ce concept, la zone de réaction est entourée d'une couverture de graphite qui transfère la chaleur de fusion directement au fluide de refroidissement (un gaz rare). La chaleur restant dans le fluide de travail après le cycle M.H.D. peut être récupérée par un échangeur de chaleur connecté à un turbocompresseur, et le fluide de travail est réutilisé.

3. La propulsion

C'est cependant dans un domaine pour le moins inattendu que les premières applications de la M.H.D. se sont avérées les plus spectaculaires.

En effet, en juin 1992, la technologie de la M.H.D. était à la une des journaux spécialisés suite à la réalisation du bateau japonais Yamato 1. Ce prototype, long de 30 mètres, est propulsé par deux « moteurs-M.H.D. », c'est-à-dire des moteurs qui ne contiennent aucune partie mobile.

L'idée géniale utilisée par l'équipe japonaise, qui a conçu Yamato 1, est de se servir d'un effet « secondaire » de la M.H.D. En effet, lorsqu'une différence de potentiel électrique est générée par le circuit du système M.H.D., la température et la vitesse du fluide décroissent. Inversement, si l'on applique un courant dans un fluide électriquement conducteur entouré d'un champ magnétique, la vitesse du fluide augmente. En se servant de l'eau de mer, qui contient du sel dissous, comme fluide conducteur, les moteurs M.H.D. de Yamato 1 propulsent le bateau grâce à l'éjection de l'eau par l'arrière, exactement comme un ballon lorsque l'air s'échappe par un trou.

Mais, examinons la genèse de cette application. C'est en 1985 que la Fondation *Ship and Ocean*, au Japon, créa un comité de Recherche et Développement afin d'élaborer les techniques applicables à la propulsion M.H.D. pour bateaux. Depuis, plus de 40 millions de dollars ont été consacrés à la conception et la construction de Yamato 1. En fait, d'après son principal concepteur, le Professeur Seizo Matora, le projet avait éga-

Deux concepts de base de réacteur à fusion furent étudiés pour la conversion directe. Le premier est à réaction de fusion à l'équilibre, tandis que le second est le modèle pulsé. Ce dernier est très important pour la recherche dans les armes du futur et a beaucoup intéressé les Soviétiques. Déjà en 1977, l'on s'interrogeait pour savoir si les modèles de fusion à pulsion avec M.H.D. n'étaient pas utilisés pour produire d'énormes impulsions électriques servant aux armes à laser antimissiles.

Les réactions à l'équilibre

Les réactions à l'équilibre concernent essentiellement les réacteurs de type tokamak, mais des méthodes similaires pourraient être appliquées pour n'importe quel réacteur à fusion de deutérium-tritium.

Si l'on utilise un cycle de conversion M.H.D. fermé, comme décrit ci-dessus avec un gaz inerte comme fluide de travail, la température élevée de la fusion pourrait accroître l'ionisation et donc l'efficacité de conversion par rapport au réacteur nucléaire traditionnel qui utilise des

températures bien plus faibles. Kantowitz et Rosa ont décrit un tel système (Figure 3).

Ce couplage entre un système conventionnel M.H.D. et un réacteur à fusion nécessiterait un tapis de graphite autour de la zone de réaction pour absorber les neutrons et les rayons X et pour chauffer un gaz de travail tel que l'hélium. Comme le graphite ne contient pas de produit fissible et comme il a de bonnes propriétés de structure jusqu'à 2500°C, un tel système devrait pouvoir être opérationnel pendant une longue durée.

Avec une température de l'hélium de 2200°C en sortie, des estimations ont montré que l'efficacité du cycle serait supérieure à 60%.

Rosa et James R. Powell du Laboratoire national de Brookhaven ont conçu un système M.H.D. pour la fusion, combinant une turbine à gaz et un cycle à vapeur, qui aurait une efficacité estimée de 75%. Ils ont également examiné la possibilité de produire de l'énergie pulsée en faisant circuler le fluide d'hélium de travail et de refroidissement, seulement quand le réacteur se trouve entre les phases d'allumage du plasma.

lement pour dessein de stimuler les ingénieurs des chantiers navals — une industrie en stagnation — afin qu'ils développent de nouveaux bateaux techniquement difficiles à réaliser.

Cependant l'intérêt pour la propulsion M.H.D. navale remonte aux années 60, en particulier aux Etats-Unis.

A l'époque, les milieux militaires étaient très intéressés à remplacer les systèmes conventionnels de propulsion par des systèmes silencieux, pour leurs opérations sous-marines. Le premier brevet de propulsion M.H.D. navale fut alors déposé en 1961 par W.A. Rice. Cependant, le principal obstacle était la faible puissance des aimants, limités à des champs de 2 teslas, ce qui est insuffisant pour propulser un bateau d'une taille acceptable. Il fallut attendre le développement d'aimants supraconducteurs suffisamment fiables avec un champ d'au moins 6 teslas pour rendre la technologie M.H.D. applicable à ce domaine.

L'avantage essentiel des systèmes de supraconductivité réside dans le fait qu'ils ne produisent pas de pertes de chaleur. Une fois qu'un courant est envoyé à travers des bobines supraconductrices, réalisées dans un alliage niobium/étain, il suffit de peu d'énergie pour maintenir l'aimantation, dans la mesure où l'aimant est maintenu à la température cryogénique de l'hélium — environ 4°K (ou -269°C) — utilisé ici comme refroidisseur.

Les Japonais se sont donc lancés dans un programme intense de recherche sur la supraconductivité afin de permettre son application dans les domaines à usages commerciaux, tel les systèmes M.H.D., le système de transport à lévitation magnétique, les générateurs et les moteurs industriels, ainsi que pour d'autres applications spéciales comme les ascenseurs magnétiques.

Ils ont également lancé un programme très ambitieux dans le développement et la production de matériaux nouveaux permettant la supra-

conductivité à des températures élevées. L'idée était de pouvoir diminuer le poids des systèmes ainsi que leur besoin en énergie. En effet, d'une part le poids est un facteur important pour la propulsion M.H.D. navale, comme d'ailleurs pour les applications dans l'espace, et d'autre part, étant donné qu'il est meilleur marché de maintenir une température de 77°K (-196°C) en utilisant de l'azote liquide que celle de 4°K (-269°C) avec l'hélium utilisé actuellement, les nouveaux matériaux supraconducteurs deviendraient peu coûteux.

Cependant, il fallut surmonter beaucoup de défis techniques avant que la propulsion M.H.D. navale ne puisse devenir une réalité. Il fallait des aimants supraconducteurs performants et fiables ainsi que leurs équipements annexes, des électrodes qui résistent au chlore de l'eau de mer, du matériel de construction léger remplaçant l'acier, et un profil hydrodynamique.

Les deux moteurs M.H.D. identiques de Yamato 1, construits par deux sociétés différentes, ce qui est remarquable en soi, sont situés sur les deux côtés de la poupe du bateau, bien au-dessous du niveau de l'eau afin de diminuer les turbulences.

Suite à des études approfondies sur le type de construction géométrique le plus efficace pour les systèmes M.H.D., les architectes ont décidé de diviser le système de circulation de l'eau en six circuits séparés à l'intérieur du moteur, chacun avec une paire d'aimants dipôles magnétiques supraconducteurs.

Les spécifications pour la construction du bateau-test demandaient que les deux moteurs apportent suffisamment de puissance pour le faire avancer à une vitesse de 8 nœuds. Les architectes ont calculé qu'il fallait une force de l'ordre de 8000 Newtons pour déplacer à cette vitesse un bateau d'une longueur de 30 mètres, d'un poids net de 280 tonnes et transportant 10 passagers. Etant donné que l'efficacité de conversion de ce système expérimental M.H.D. était estimée à 50%, les deux moteurs devaient, ensemble, produire une pous-

sée de 16.000 N.

Dès son premier essai en mer, en juin 1992, Yamato 1 atteignit une vitesse de 7,5 nœuds, très proche de son objectif. Il finit son programme de tests à la fin de l'été 1992 et, l'évaluation des résultats terminée, la fondation Ship and Ocean démarra la construction de Yamato 2, plus grand et plus efficace que son prédécesseur. Les « bateaux M.H.D. » futurs devraient atteindre des vitesses supérieures à 100 nœuds, et ne faire pratiquement aucun bruit. Ce sont justement les turbulences induites par leurs propulseurs, qui limitent les bateaux actuels aux vitesses maximales de 30 à 35 nœuds.

Les Japonais sont également intéressés par le développement d'un submersible à propulsion M.H.D. pour le transport de marchandises. A une profondeur de 15 à 30 mètres en dessous de la surface de l'eau, le freinage diminue et il n'y a plus de contrainte climatique. En fait, le Professeur Motora estime que la vitesse d'un tel bateau sera alors virtuellement illimitée. Le transport maritime pourrait remplacer de manière rentable le transport aérien coûteux, pour les marchandises périssables et à valeur ajoutée élevée. C'est un aspect crucial pour une île comme le Japon, qui ne peut pas utiliser, pour son commerce international, des systèmes de transport terrestre comme la voie ferrée.

Cependant, l'expérience de Yamato 1 a procuré aux scientifiques, ingénieurs, architectes et industriels japonais bien plus qu'un mode révolutionnaire de transport. Le projet a largement fait progresser l'art et la technologie de la supraconductivité, la conception des bateaux, la conversion directe d'électricité par M.H.D., et bien d'autres applications. De plus, le projet a démontré la faisabilité de la M.H.D. pour des systèmes de grande taille. Il a suscité de vives réactions aux Etats-Unis : le Dr. Michael Petrick, du Argonne National Laboratory (Illinois), a déclaré que Yamato 1 était « provocateur dans sa simplicité », et la propulsion M.H.D. est maintenant réexaminée. ■