



## 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 résout 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.

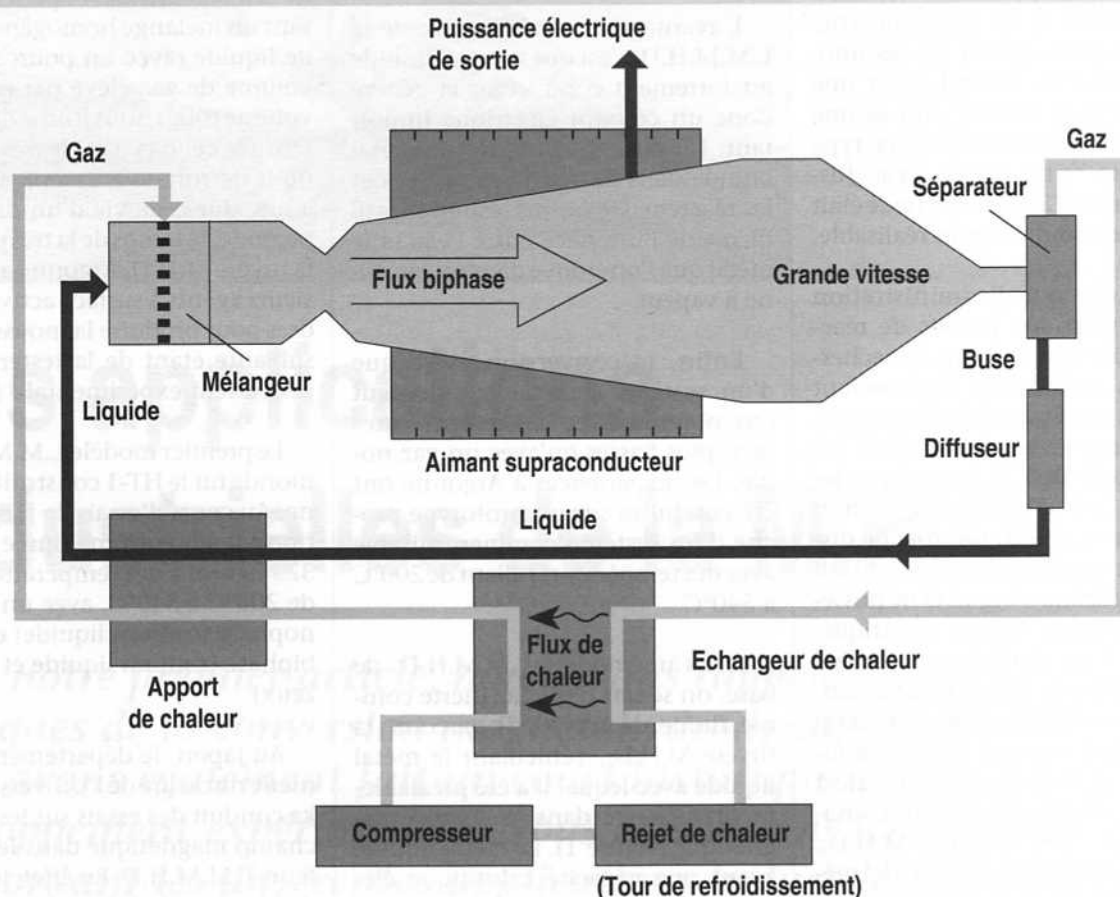
Presque tous les modèles de L.M.M.H.D. qui ont été développés pourraient être pleins d'avenir. En fait, aux Etats-Unis, la seule contrainte est l'indisponibilité de réacteur rapide et de réacteur à haute température, ce qui n'a pas, malgré tout, empêché les scientifiques de concevoir des réacteurs à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

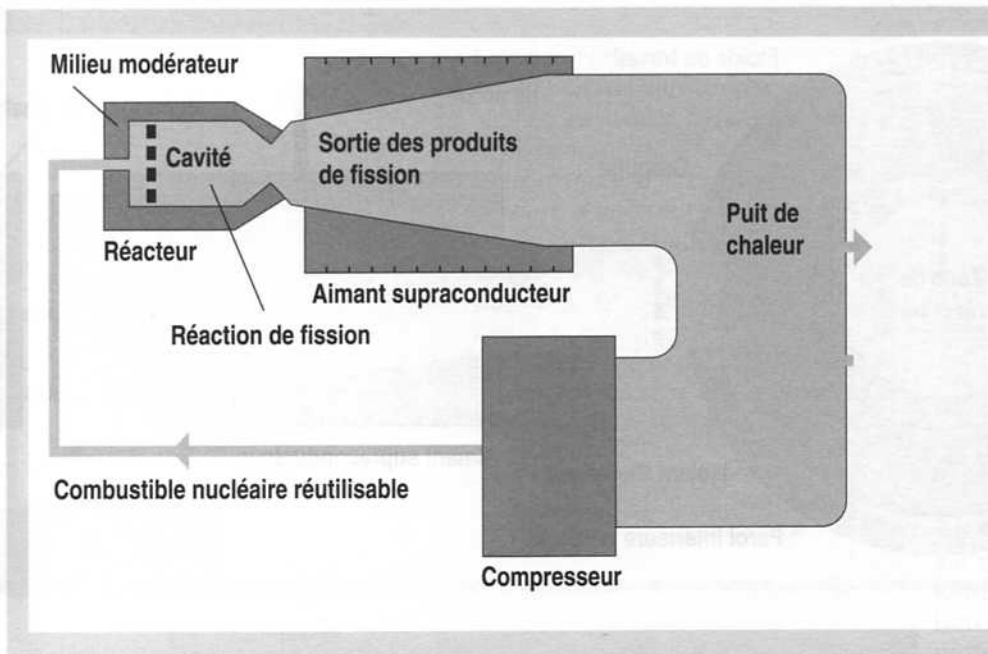
Un de ses projets était le réacteur avec cavité ou à régulateur externe (Figure 2). Si, explique-t-il, une quan-

**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,

