

# M.H.D. : une technologie du futur mise au placard

1ère partie

Marsha Freeman  
Gil Rivière-Wekstein

*La magnétohydrodynamique a longtemps été l'enfant chéri des ingénieurs russes. Elle a été également étudiée aux Etats-Unis et en France, mais rapidement abandonnée. Rares sont ceux qui croient encore au potentiel de cette technologie. Son fantastique potentiel ne mérite pourtant pas un abandon aussi rapide. Les auteurs rappellent les éléments physique de base de cette technologie et font l'historique de son développement expérimental. Dans une deuxième partie, à paraître dans notre prochain numéro, ils examineront les applications industrielles possibles.*

**S**i cette fin de siècle semble être marquée par une course technologique provoquant des bouleversements importants dans la robotique, l'informatique et les communications, nous sommes pourtant fort loin de l'optimisme scientifique des années 50 et 60. Des moteurs à propulsion nucléaire pour la colonisation de Mars à l'énergie contrôlée et inépuisable de la fusion thermonucléaire en passant par les trains à lévitation magnétique parcourant Los Angeles-New York en une demi-heure, tout semblait alors possible pour l'humanité. Les limites étaient simplement celles qu'imposait notre imagination.

Ce ne fut pas l'irréalisme des projets de l'époque, mais plutôt le changement progressif dans les choix politiques en Europe et surtout aux Etats-Unis qui arrêta — momentanément, espérons-le — l'enthousiasme scientifique de l'après-guerre.

C'est également le cas en ce qui concerne les recherches liées à la magnétohydrodynamique (M.H.D.). A l'exception de quelques résistants disséminés de par le monde, rares sont ceux qui croient encore aux possibilités technologiques que cachent ces trois lettres. Et pourtant...

Et pourtant, imaginez une méthode de production électrique qui doublerait la quantité d'électricité engendrée par une tonne de charbon, de gaz naturel ou d'uranium ! Imaginez que de surcroît cette technologie ne produise pratiquement pas de pollution !

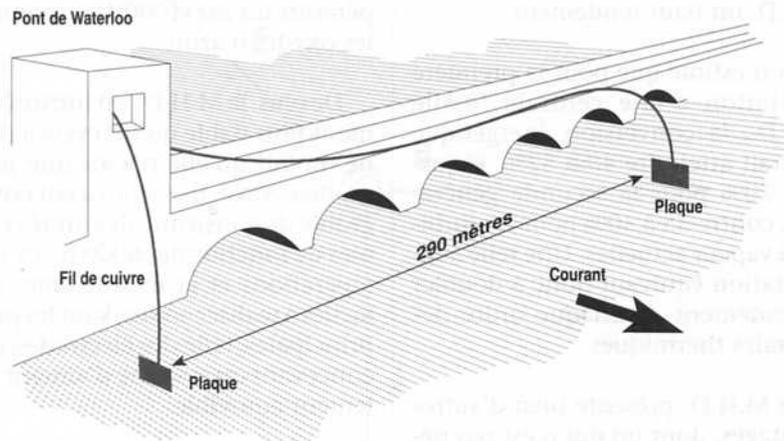
Telle était effectivement l'idée des chercheurs qui, depuis la fin des années 50, travaillaient à un extraordinaire projet : la conversion directe d'énergie. En effet, dans toutes les formes actuelles de centrales thermiques (gaz, charbon, nucléaire), la conversion de l'énergie calorifique en énergie électrique s'accomplit grâce à un système de turbines à vapeur, technologie développée depuis plus d'un siècle et demi. Or, grâce à la déclassification des secrets militaires concernant la bombe H, on a pu entreprendre des recherches sérieuses pour maîtriser l'énergie de fusion. Cependant, on ne pouvait en aucun cas envisager l'utilisation d'une turbine à vapeur à basse température pour la conversion d'énergie dégagée par un plasma de plusieurs millions de degrés.

C'est alors que des savants comme l'Américain Arthur Kantrowitz virent dans le phénomène bien connu de l'interférence entre champ magnétique et champ électrique l'opportunité de développer un mode de conversion d'énergie nouveau, révolutionnaire.

L'idée d'utiliser cette interférence pour produire de l'électricité remonte en fait à 1832, lorsque l'Anglais Michael Faraday tira un fil de cuivre, long de 290 mètres, au-dessus de la Tamise, fixant à chaque extrémité du fil une plaque métallique plongée dans l'eau (**Figure 1**). Faraday écrit dans son journal : « (...) l'eau du fleuve entre les plaques ferma le circuit et, étant en mouvement, devrait produire grâce à l'induction magnéto-électrique un courant repérable ». En effet, le galvanomètre que Faraday avait connecté au fil de cuivre indiqua l'existence d'un faible courant.

L'explication de ce phénomène fait appel à des notions de dynamique des fluides et d'électromagnétisme

Fig. 1 - L'expérience de Faraday



Michael Faraday réalisa en 1832 la première expérience démontrant qu'on pouvait produire un courant électrique par conversion directe. Le fluide chargé en mouvement est ici constitué par l'eau salée de la Tamise ; le champ magnétique externe est celui de la Terre ; et les électrodes qui permettent de recueillir le courant de Faraday sont les plaques métalliques immergées dans le fleuve.

postérieures à Faraday. Une force, appelée force de Lorentz (**Figure 2**), est engendrée lorsqu'un fluide traverse un champ magnétique, perpendiculaire à sa direction. Agissant sur le fluide, elle sépare les ions (particules chargées positivement) des électrons (particules chargées négativement) ; la différence de potentiel ainsi générée produit un courant électrique, le courant de Faraday. (**Figure 3**)

Lorsque Faraday fit ses expériences, il démontra l'existence de ce phénomène pour les fluides conducteurs mais également pour tous les corps conducteurs. En fait, il fit la plupart de ses travaux, en dehors de l'expérience du Pont de Waterloo sur la Tamise, avec des métaux conducteurs liquides, comme le mercure.

Dès la fin des années 50, ce principe a été appliqué à de nombreux projets : la propulsion d'engins spatiaux, la recherche géophysique, la réalisation de systèmes générateurs d'électricité portables où la taille et le poids imposent des restrictions, la

conversion directe d'énergie dans les centrales thermiques, nucléaire ainsi que la fusion thermonucléaire.

Cependant, le domaine dans lequel le développement des systèmes M.H.D. a reçu la plus grande attention à l'échelle internationale est sans aucun doute la conversion électrique pour les centrales thermiques à charbon ou à gaz.

## La M.H.D. pour les centrales thermiques

Le principal avantage de la M.H.D. par rapport aux turbines à vapeur vient du fait qu'elle permet d'avoir un rendement supérieur en électricité grâce à une température bien plus élevée. En effet, la limite extrême pour des turbines à vapeur est de 1000°C, limite due aux contraintes des matériaux et à la rotation des énormes engins. Or, pour ioniser partiellement le combustible fossile de manière à ce qu'il puisse servir de fluide conducteur dans un généra-

teur M.H.D., il faut obtenir des températures de combustion de l'ordre de 2000°C. De cette température de 2000°C à l'entrée, le gaz qui traverse le générateur M.H.D. tombe à environ 1000°C. C'est ce différentiel important qui donne à la conversion M.H.D. un haut rendement.

L'on estime que pour la première génération d'une centrale fossile M.H.D., la conversion énergétique pourrait atteindre 48 à 52% et jusqu'à 70% pour la seconde génération, contre 35 à 40% pour les turbines à vapeur actuelles. Une telle augmentation équivaut donc à doubler le rendement de chaque unité des centrales thermiques.

La M.H.D. présente bien d'autres avantages, dont un qui n'est pas négligeable : son impact sur l'environnement est minime. En effet, les températures de combustion sont tellement élevées que les résidus polluants sont fortement réduits (jusqu'à 90%). Ensuite, les expériences ont montré que si l'on ajoute du potassium au fluide conducteur afin d'accroître sa conductibilité, ce potassium se lie chimiquement avec tous les sulfures du charbon, réduisant ainsi les émissions

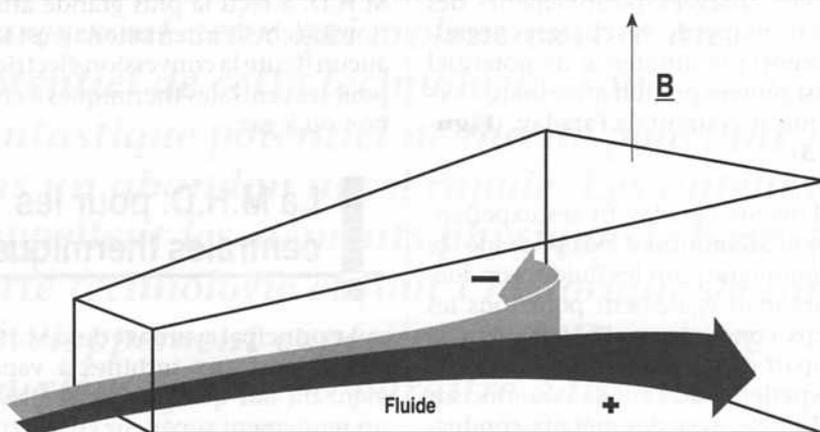
de dioxyde de soufre de 99%. Il n'y a donc plus besoin de filtre ! Enfin, on peut également réduire les émissions d'oxyde d'azote en diminuant simplement la quantité d'air dans le brûleur. Et de plus, l'on a remarqué que la forte baisse de température du gaz (1000°C) décompose les oxydes d'azote.

De plus, la M.H.D. est intrinsèquement plus fiable qu'un cycle à turbine du fait qu'elle n'a aucune partie mobile. Ainsi, il est tout à fait envisageable de construire des unités capables de fonctionner 6000 heures. Les réparations et la maintenance sont faciles à réaliser en stockant les pièces principales, telles les électrodes, et en concevant un système d'aimant facilement amovible.

Avec tous ces avantages en perspective, il n'était pas difficile de convaincre les pouvoirs publics et privés d'investir dans la recherche M.H.D.

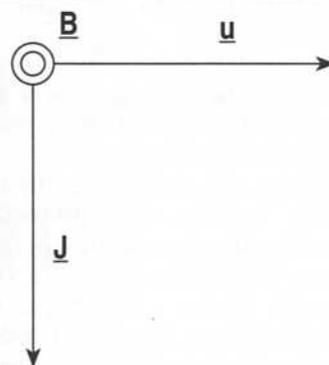
Les principaux travaux de recherches et d'expériences se sont concentrés sur différents types de tuyères, sur l'accroissement du champ magnétique et de la conductibilité du fluide.

**Fig. 2 - La force de Lorentz**



Lorsqu'un flux de particules chargées passe dans un champ magnétique  $B$ , dont la direction fait un angle droit avec celle du flux, une force s'exerce sur les particules chargées. Cette force de Lorentz sépare les particules selon leur charge, positive et négative, et fournit donc le potentiel électrique à partir duquel on peut obtenir un courant en connectant une charge.

**Figure 3**  
**Le courant de Faraday**



Le courant de Faraday dans un M.H.D. résulte de l'action de la force de Lorentz sur les particules d'un fluide ionisé. Le courant généré est perpendiculaire à la direction du mouvement du fluide et au champ magnétique externe.

## Les tuyères

Plusieurs types de tuyères M.H.D. ont été étudiés afin de maximaliser la production électrique provenant de l'interaction complexe entre le champ magnétique et le champ électrique.

Le premier, et le plus simple, est le générateur dit de Faraday, qui extrait simplement le courant produit par la force de Lorentz, sans utiliser ni le courant de Hall (voir Figure 4) ni la poussée du courant de Faraday dans le générateur.

Si les électrodes situées le long de la tuyère forment une nappe unique de matériau conducteur, le courant de Hall (produit parallèlement au flux du fluide travail) va provoquer un court-circuit. Afin de modérer l'effet Hall, Avco et Westinghouse ont développé depuis 1959, des configurations d'électrodes de Faraday segmentées, qui sont individuellement isolées. (Figure 5) Le générateur de Hall a été conçu et testé au début des années 60. Mais, en court-circuitant

le courant de Faraday, on provoque une perte importante de puissance, ce qui représente un désavantage certain.

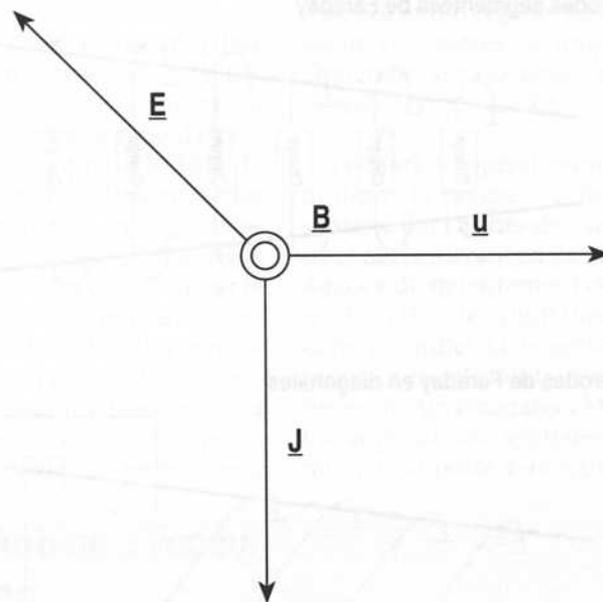
Un autre système semblait être plus prometteur : les électrodes disposées en séries diagonales étaient capables de capturer très efficacement le courant de Faraday. La charge est placée entre le début et la fin de la tuyère, alors que les paires d'électrodes sont placées sur le chemin du champ électrique provenant de l'effet Hall.

Le problème majeur des électrodes réside dans le fait qu'elles doivent résister à l'environnement corrosif dû au charbon gazéifié et aux températures élevées. Plusieurs expériences ont été élaborées pour résoudre ce problème, entre autres en utilisant des scories de charbon comme « enduit » sur les électrodes de cuivre. Cette idée fut testée par le prototype Avco Marck VI. Le Dr Edward Scannell, ancien directeur du programme M.H.D. de Reynolds Metals, a conçu par ailleurs plusieurs modèles d'électrodes à gaz ou à plasma.

## La température de combustion

La température étant le principal paramètre déterminant le degré de conductibilité du gaz, il est possible, en préchauffant l'air utilisé lors de la combustion, d'augmenter de manière appréciable sa conductibilité. Si différents types de préchauffage ont été envisagés comme, par exemple, un système indépendant employant un combustible propre ou l'utilisation d'un système d'échangeur de chaleur entre le gaz de la M.H.D. et l'air, les efforts ont plutôt porté sur le recyclage du gaz de la M.H.D. dans la chambre de combustion. La société américaine Fluidyne Corporation de Minneapolis travailla sur des systèmes de préchauffage de l'air et a réalisé, en 1978, une simulation d'un système M.H.D. avec un échangeur de chaleur de haute température pendant une période de 900 heures. Malheureusement, ce ne fut pas suffisant pour une utilisation commerciale. De leur côté, les Soviétiques ont

Fig. 4 - L'effet Hall



Le courant de Faraday crée un champ électrique autour de lui qui fait apparaître une force de dérive que l'on appelle l'effet Hall.  $E$  étant le champ électrique induit, l'effet Hall agit comme un « frein » au courant de Faraday,  $J$  Le champ magnétique  $B$  va de la page vers le lecteur ; le courant de Faraday, le champ magnétique et la direction du mouvement du fluide,  $u$ , sont tous perpendiculaires deux à deux.

## L'effet Hall et le nombre de Reynolds

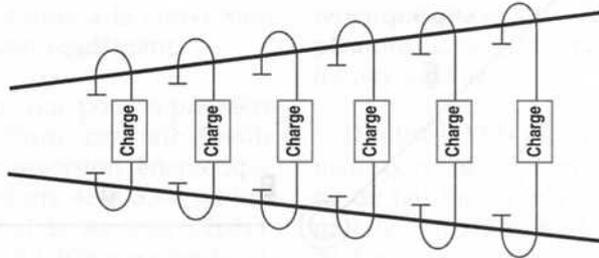
En 1879, Edwin H. Hall, de l'université Johns Hopkins, découvrit qu'il existait, dans le cas de figure décrit, une relation plus complexe : « l'effet Hall ». Il démontra qu'autour du courant de Faraday se crée un nouveau champ électrique, proportionnel à la densité du courant et à la force du champ magnétique, perpendiculaire au courant, mais parallèle à la direction du fluide. Le champ ainsi induit tend à contrebalancer le courant produit par le champ magnétique.

En 1883, Osborn Reynolds étudia différents effets secondaires se produisant dans ce genre d'expériences. Il se pencha en particulier sur le problème de l'apparition subite de turbulences dans les fluides et démontra qu'il était possible de décrire le comportement d'un fluide quelconque en matière de turbulence par un nombre « sans dimension », fonction de la viscosité du fluide (sa résistance interne) et de son inertie.

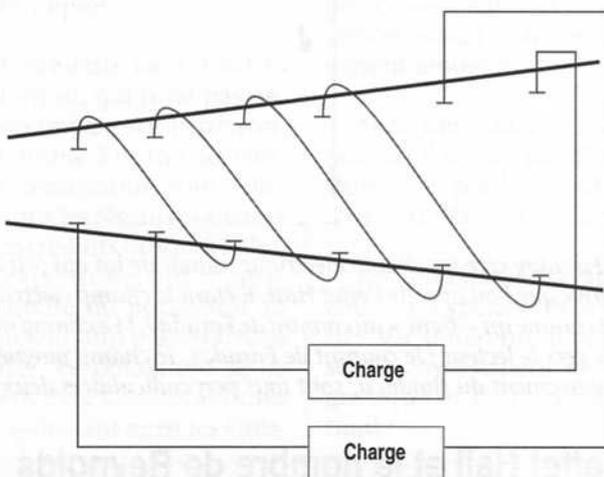
Par exemple, si on en choisit les dimensions et la vitesse de façon à obtenir le même « nombre de Reynolds », un flux d'air et un flux d'eau traversant des orifices similaires se comporteront de manière semblable. Le nombre de Reynolds est en effet dépendant de la dimension de l'orifice (longueur et largeur) et de la vitesse des fluides. Il existe également un « nombre de Reynolds magnétique » qui dépend des paramètres de perméabilité (le rapport entre la densité magnétique du flux et la force du champ magnétique externe), de la conductibilité électrique, de la vitesse du fluide et de la taille du conduit. Si l'on connaît le nombre de Reynolds d'un système, on peut maintenir le fluide dans des conditions de non turbulence et avoir ainsi une efficacité maximale de la conversion énergétique.

**Fig. 5 - Les différentes configurations d'électrode**

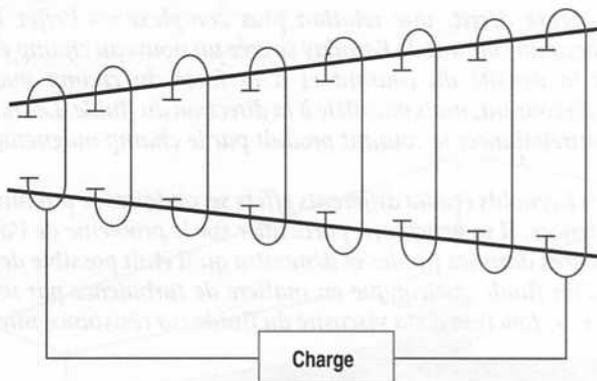
a) Electrodes segmentées de Faraday



b) Electrodes de Faraday en diagonales



c) Hall

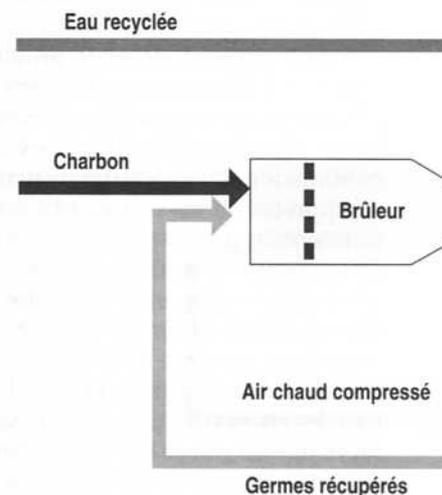


Dans le générateur à électrodes segmentées, chaque électrode placée sur la paroi de la tuyère est connectée à une électrode qui lui est directement opposée. Les charges sont placées entre chaque paire d'électrodes. Le générateur plus communément utilisé connecte ses électrodes en diagonale. La charge est placée comme indiqué sur la figure et le courant recueilli est le courant de Faraday affecté par l'effet Hall. Dans la configuration de Hall, la charge est connectée entre les électrodes d'entrée et de sortie mais le courant de Faraday qui traverse la tuyère en largeur est court-circuité.

élaboré un système qui ajoute de l'oxygène lors de la combustion afin d'accroître la température.

## La puissance du champ magnétique

Outre la conductibilité électrique du gaz et la configuration des électrodes, le troisième facteur déterminant pour l'efficacité de la M.H.D. reste la puissance du champ magnétique. Les systèmes conventionnels d'aimants refroidis à l'eau ne peuvent atteindre qu'une puissance de 3 teslas (1 tesla correspond à 10.000 gauss), or une centrale M.H.D. nécessite des aimants d'une puissance de 5 à 7 teslas minimum.



Pour que la centrale produise plus d'énergie que celle qui est nécessaire à l'alimentation des aimants, il faut obligatoirement passer par la technologie des supraconducteurs. Ce sont les japonais qui réalisèrent les premiers un générateur utilisant des aimants supraconducteurs, (le ETL Mark V). Ceux-ci ont atteint une puissance de 5 teslas et servant de laboratoire aux expériences sur la M.H.D.

En 1974, le laboratoire national de l'Argonne construisit un aimant supraconducteur de 40 tonnes qui fut envoyé à Moscou pour être testé sur l'installation soviétique U-25, tandis que la réalisation d'un aimant supraconducteur de 7 mètres de long et de 4 mètres de haut fut commencée en 1978 par General Electric et le MIT.

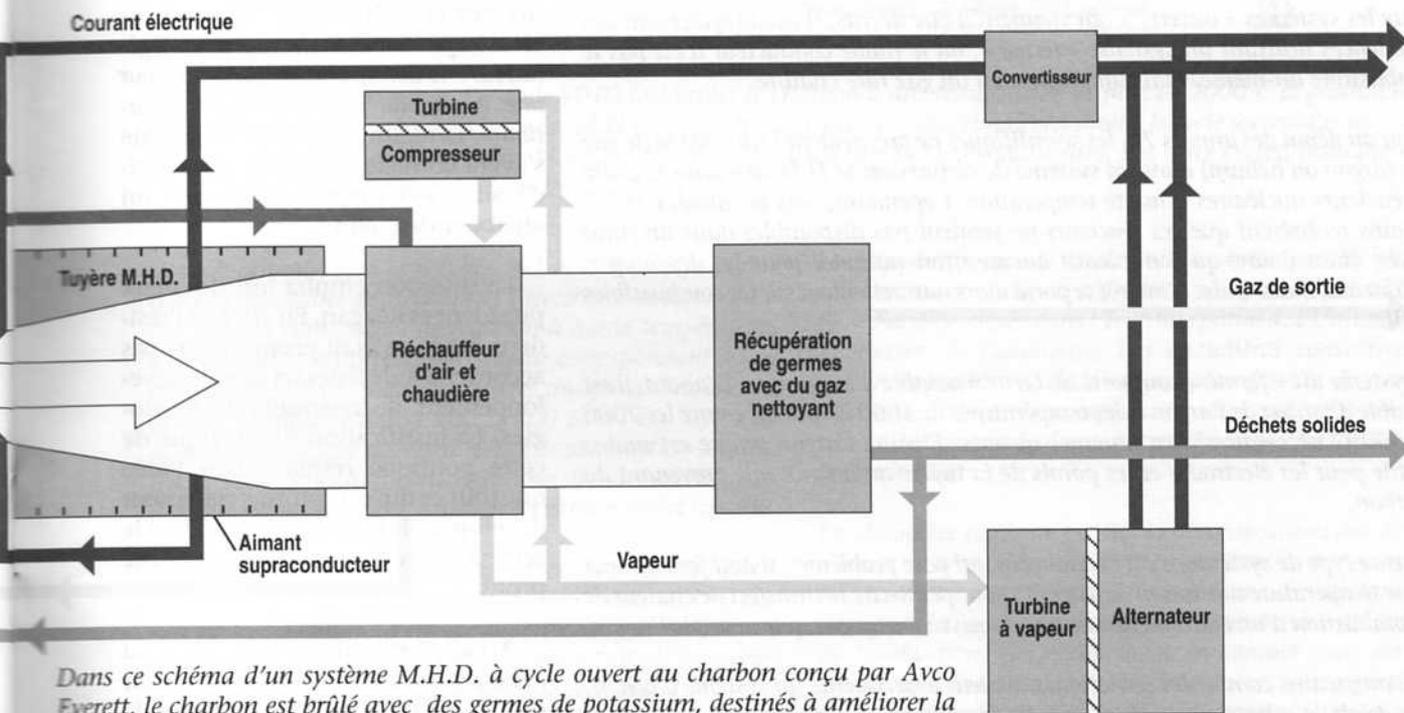
## Expériences de générateurs M.H.D.

C'est sous la direction d'Arthur Kantrowitz que l'Avco Everett Research Laboratory (Massachusetts) a mené depuis 1959 une série d'expériences sur des générateurs M.H.D. de plus en plus grands afin de tester les différents composants, et en particulier la tuyère. Le premier générateur d'Avco, le Mark I, fut construit par le Dr Richard Rosa. Il atteignit une puissance crête de 11,5 kilowatts et réussit à maintenir un niveau de puissance de 10 kW pendant 10 secondes. La tuyère était longue de 50 centimètres avec 40 paires d'électrodes séparées.

Le Mark II, construit en 1960 avec le soutien de l'American Electric Power Services Corp, atteignit un niveau de puissance de 1,5 MW en employant un combustible à base d'alcool et d'oxygène. Sa tuyère mesurait 1,5 mètres de long, l'aimant atteignait 32.000 gauss et le débit moyen était de 2,7 kg/s.

Le Mark V, opérationnel en 1965, utilisant le même combustible, fut soutenu par l'armée de l'air américaine et par le Advanced Research Project Agency du département de la Défense. En effet, les militaires voyaient dans ce projet la possibilité de démontrer la faisabilité d'une grande fusée avec un générateur M.H.D. pour les applications spatiales. Le débit moyen fut porté à 45 kg/s, avec une

## g 6 - Schéma d'un dispositif combinant une turbine à vapeur et un dispositif M.H.D. à cycle ouvert



Dans ce schéma d'un système M.H.D. à cycle ouvert au charbon conçu par Avco Everett, le charbon est brûlé avec des germes de potassium, destinés à améliorer la conductivité électrique, et accéléré ensuite dans le tunnel M.H.D. Le courant généré le long de la tuyère est dirigé vers un convertisseur qui permet de passer ensuite sur le réseau alternatif. L'eau est chauffée grâce à la chaleur résiduelle du générateur M.H.D., de même que l'air qui retourne au brûleur.

La vapeur produite va ensuite dans une turbine conventionnelle ; le gaz restant est nettoyé et les germes sont récupérés pour être recyclés. Le gaz nettoyé est ensuite éjecté à l'air libre et le générateur à turbo-alternateur produit du courant qui vient s'ajouter à celui généré par le système M.H.D.

puissance obtenue de 32 MW pendant 1 à 2 seconde. Le système d'aimant consommait 8,5 MW.

C'est vers le milieu des années 70 que le Mark VI d'Avco fut construit. Ce prototype simulait du combustible-charbon en employant un combustible-pétrole dans lequel on avait injecté des cendres. En 1976, le Mark VI fonctionna sans interruption pendant 95 heures avec une puissance de 200 kW mais avec beaucoup de problèmes, et en particulier le fait que les scories encrassaient fortement les murs du conduit. On conçut de nouvelles électrodes afin d'avoir une distribution uniforme du courant et les parois de la tuyère furent réalisées en céramique.

Deux années plus tard, le Mark VI tourna pendant 250 heures avec une puissance de 220 kW et avec une puissance crête de 500 kW.

Les recherches sur la M.H.D. progressaient donc bien au niveau international : le Marck VI d'Avco avait fonctionné pendant 250 heures consécutives, le U-25 soviétique à base de gaz naturel avait atteint une puissance de 20,4 MW pendant une période de 30 minutes, et le Mark V japonais avait utilisé, pour une courte durée, un aimant supraconducteur. D'autres applications avaient été expérimentées à plus petite échelle.

Sous la direction du Dr William Jackson, le projet de l'Administration américaine en charge de la recherche et du développement électrique, l'ERDA, était de construire pour 1978 le CDIF, *Component Development Integration Facility*, à Montana. Les parties clefs devaient être testées et intégrées dans un seul bloc utilisant du charbon comme combustible, un prototype de 50 MW thermiques. Un second prototype,

de 250 MW thermiques, le *Engineering Test Facility*, était planifié pour 1982 ; et un réacteur commercial de 1000 MW devait voir le jour en 1989. Les sociétés électriques pourraient alors commencer à commander des unités de production à M.H.D.

## Coup de frein sur les programmes

Au moment même où l'on envisageait d'étudier la faisabilité d'un système M.H.D. commercial, l'Administration Carter nomma James Schlesinger à la tête du nouveau département de l'Energie (DOE). Sa première décision fut de limoger William Jackson de son poste de dirigeant du programme fédéral de M.H.D. Selon Schlesinger, il n'y avait pas de « *solution technologique* » à la crise énergétique.

## Le cycle fermé de M.H.D. à combustible fossile

*Outre les systèmes « ouverts » qui viennent d'être décrits, il existe également des expériences utilisant un système « fermé », où le fluide conducteur n'est pas le combustible lui-même, mais un plasma ou un gaz rare chauffé.*

*Jusqu'au début des années 70, les scientifiques ne prévoyaient l'utilisation de gaz rare (argon ou hélium) dans un système de conversion M.H.D. que dans le cadre de réacteurs nucléaires à haute température. Cependant, vers les années 1975, certains réalisèrent que ces réacteurs ne seraient pas disponibles dans un futur proche étant donné qu'il n'y avait aucun effort national pour les développer, surtout aux Etats-Unis. L'intérêt se porta alors naturellement sur les combustibles fossiles.*

*Le système dit « fermé » comporte un certain nombre d'avantages. D'abord, il est possible d'ioniser de l'argon à des températures de 1000 à 1500°C contre les 2000 à 2500°C nécessaires aux systèmes ouverts. Ensuite l'argon propre est moins hostile pour les électrodes et les parois de la tuyère qu'un gaz sale provenant du charbon.*

*Dans ce type de système, c'est l'échangeur qui pose problème : il doit fonctionner à une température minimum de 1000°C pour permettre le transfert de chaleur de la combustion d'un charbon de nature corrosive vers un gaz, par exemple l'argon.*

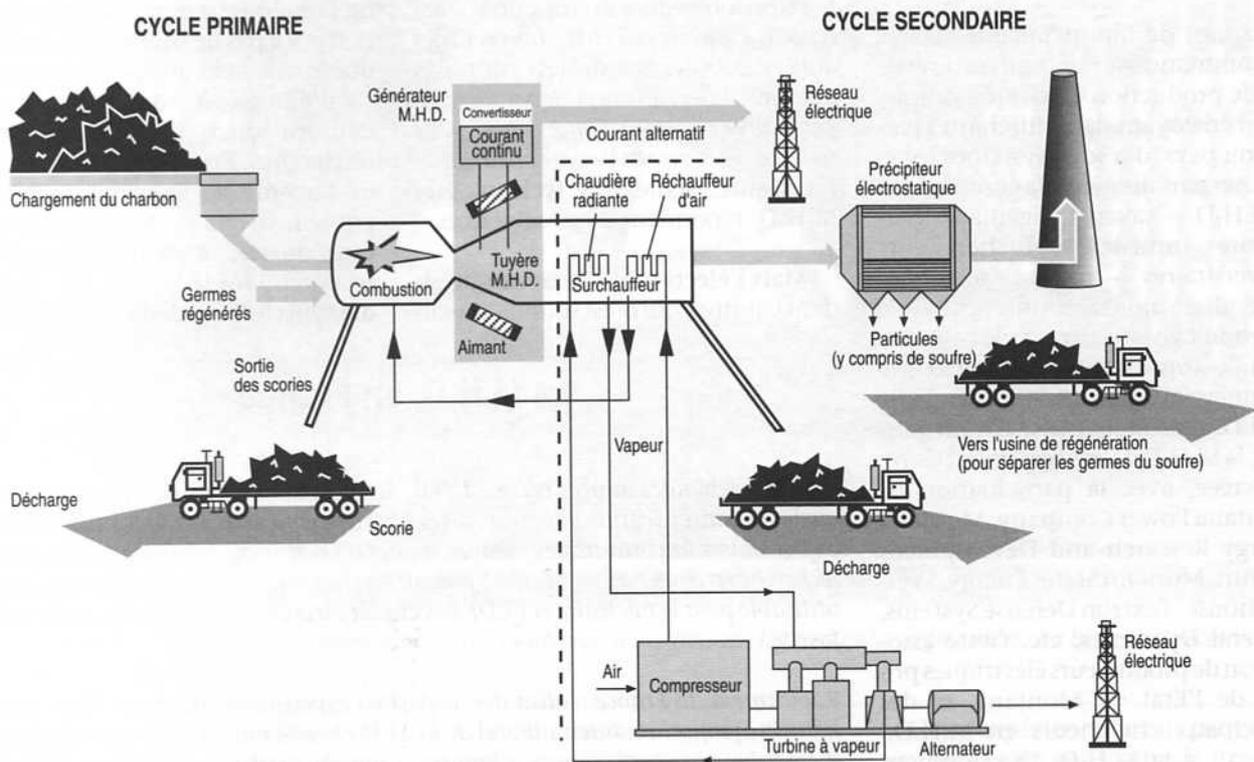
*Les Américains comme les Soviétiques avaient expérimenté un système d'échangeur de chaleur basé sur l'idée d'un « lit de cailloux en céramique ». La chaleur émise par le combustible fossile est accumulée dans des cailloux en céramique et transférée au gaz d'argon lorsque celui-ci passe à travers l'échangeur de chaleur. Le laboratoire de science spatiale de General Electric, à Valley Forge en Pennsylvanie, a un programme de cycle fermé depuis 1972, et poursuit ce type d'expériences depuis 1975. Le Lewis laboratory de la NASA, à Cleveland en Ohio ainsi que l'université de Technologie de Eindhoven aux Pays-Bas ont également réalisé des essais sur ce type de système fermé.*

Trois ans après le début de la présidence Carter, en janvier 1979, un rapport déposé par la Commission ad hoc sur la technologie M.H.D. concluait que « *l'état de la technologie M.H.D. ne donne aucune garantie pour une éventuelle future commercialisation* ». Evidemment, cette prophétie s'avéra correcte, puisqu'il était décidé, suite à ce rapport, de ne plus lui attribuer de crédit !

La situation empira lors des deux présidences Reagan. En effet, le Président Reagan s'était promis de ne pas accorder d'aide fédérale pour le développement de nouvelles technologies. La justification idéologique de cette politique résidait dans l'idée que tout ce qui est commercialement développable peut être financé par le secteur privé qui en tirerait ensuite profit.

A l'approche de la réélection du Président Reagan, il était donc clair que le DOE n'approuverait pas la construction d'un site pilote M.H.D. Et effectivement, en 1984, il annonça qu'on enterrait l'idée d'une expérience grandeur nature sur un site intégrant toutes les technologies et composants nécessaires au système M.H.D. au profit d'une autre idée, le « *proof-of-concept M.H.D.* » (preuve

Fig. 7 - La faisabilité d'un procédé M.H.D.



Un système de conversion d'énergie MHD fait brûler le charbon à une température de plus de 2000°C et produit de l'électricité directement dans la tuyère M.H.D. A gauche, on figure le cycle primaire. A droite, le cycle secondaire recycle le gaz chaud sortant de la tuyère M.H.D. dans des turbines à vapeur conventionnelles. Les deux cycles, primaire et secondaire, produisent de l'électricité.

Le cycle primaire sera testé à la CDIF de Montana, démontrant la possibilité de produire de l'électricité directement à partir de la combustion de charbon à haute température. Ceci sera fait en utilisant un brûleur correspondant à une centrale de 50 MW thermiques, avec une possibilité d'étendre ces résultats jusqu'à 200 à 300 MW. La tuyère de démonstration, qui convertit le gaz de combustion en électricité, sera menée de façon à optimiser sa durée de vie, c'est-à-dire le nombre total d'heures de fonctionnement continu.

Le diffuseur du cycle secondaire, placé en sortie de tuyère, relie les cycles primaire et secondaire de l'usine M.H.D. Elle sert surtout à réduire la vitesse de sortie des gaz de la tuyère avant qu'ils n'entrent dans la chaudière, qui est connectée ensuite à la turbine à vapeur du cycle secondaire.

Le contrôle de la puissance et la mise en forme du signal électrique produit par les électrodes placées le long de la tuyère sont effectués par un sous-système contrôle-commande réalisé par Westinghouse pour le CDIF. Ce sous-système comprend aussi le convertisseur qui permet de passer du courant continu au courant alternatif utilisable sur le réseau.

La récupération de la chaleur transportée par les gaz de combustion en sortie du diffuseur sera testée à la Coal Fired Flow Facility, située dans l'Institut spatial de l'Université de Tennessee, à Tullahoma. Les chaudières convectives et radiantes produisent de la vapeur pour générer du courant électrique de façon conventionnelle, dans un turbo-alternateur ; elles servent également à préchauffer l'air utilisé pour la combustion.

La chaudière radiante permet la décomposition des oxydes d'azote en azote élémentaire et en oxygène, ce qui permet de respecter les normes de pollution aérienne. Le surchauffeur dégage de la vapeur par le refroidissement convectif des gaz de combustion. Cet équipement en contact avec des gaz chauds doit être capable de résister à de hautes températures et à l'environnement corrosif des germes de potassium, ajoutés pour accroître la conductivité électrique du gaz de charbon.

Le système de récupération des germes, permettant de réutiliser le potassium, est en développement par TRW. Des précipiteurs électrostatiques conventionnels permettront de retirer toutes les particules restant dans le gaz de sortie.

par la conception). Pour diminuer les frais, il fallait, disait le DOE, tester séparément trois sous-systèmes : le cycle primaire, le cycle secondaire, et la régénération. (Figure 7)

Partant du fait qu'aucune société ne commanderait un nouveau système de production électrique simplement en voyant dans différentes parties du pays, des sous-systèmes fonctionner parfaitement, la communauté M.H.D. — savants, ingénieurs, partenaires industriels et chercheurs universitaires — proposa une nouvelle idée : ajouter à une centrale à charbon existante, un cycle primaire M.H.D. afin d'avoir un premier site commercial utilisant la technologie M.H.D. aux Etats-Unis. Un an plus tard, la M.H.D. Development Corp. fut créée, avec la participation de Montana Power Company, Montana Energy Research and Development Institut, Montain States Energy, Westinghouse, Textron Defense Systems, General Dynamics, etc. Cette association de producteurs électriques privés, de l'Etat du Montana, et des principaux chercheurs en M.H.D., donnait à la M.H.D. Development Corp. tous les atouts pour relever le défi.

En 1987, le DOE finança des études examinant la possibilité de « réaménager » certaines centrales à charbon. Ces études, achevées en 1989-90, ont confirmé la faisabilité technique d'un tel projet ; il ne restait qu'à savoir d'où allaient provenir les 600 millions de dollars estimés nécessaires à la réalisation.

L'Administration Bush, en 1989, s'engagea dans un nouveau programme, intitulé « Clean Coal Technology demonstration » (démonstration de technologies propres pour le charbon), et débloqua à cet effet plusieurs milliards de dollars. Mais, jusqu'à présent, les 42 projets de R&D, qui ont reçu 4,6 milliards de dollars, n'ont étudié que de simples améliorations dans les équipements existants de contrôle de pollution.

Le 6 juillet 1992, le DOE entama sa cinquième et dernière « offre de prospection » auprès des industries pour des projets « Charbon-propre ». Les

projets sélectionnés devaient bénéficier d'aides fédérales pour un total de 568 millions de dollars. La publication officielle de ces projets devait se faire en mai 1993, et d'après le DOE, la sélection se fera en fonction « des besoins d'énergie et d'environnement des années 2000 ». Les projets proposés doivent « faire avancer de manière significative les performances d'efficacité tout en préservant l'environnement ». En réalité, seules les technologies M.H.D. répondent à ces exigences.

Mais l'élection du nouveau président Clinton, qui n'est soumis à aucu-

ne obligation envers les décisions de ses prédécesseurs, vient encore bouleverser le calendrier. Depuis lors, chaque négociation budgétaire voit les conseillers de la Maison Blanche, de la même trempe que Schlesinger (« il n'y a pas de solution technologique, on ne peut que partager la pénurie d'énergie »), cherchent à arrêter définitivement les programmes de recherches. Des députés convaincus de l'avenir de la technologie sont parvenus à chaque fois à sauver quelques miettes. Mais deux équipes de recherche sur le M.H.D. ont déjà été démantelées en deux ans et les bud-

## La M.H.D. en France

*C'est au début des années 60 que l'EDF, le CEA, la CGE, l'Institut du Pétrole et quelques autres institutions françaises étudièrent la M.H.D. Après des travaux exploratoires importants, les premiers bancs d'essais furent construits divisant la recherche en deux parties : le CEA prenait en charge le cycle fermé éventuellement utilisable pour le nucléaire et l'EDF s'occupait du cycle ouvert pour la combustion fossile.*

*Rapidement, la France réalisa des dispositifs expérimentaux, et, en 1964, pays-hôte du Symposium international de la M.H.D., elle mit en service un des bancs d'essai les plus performants d'Europe : celui du Centre de Recherche EDF des Renardières, avec une puissance thermique de 10 MW et un champ magnétique de 3 teslas. C'est là que furent testés plusieurs types de tuyères : la tuyère de Faraday, la tuyère à effet Hall ainsi que la tuyère dite « de Montardy » avec des électrodes inclinées qui fut ensuite employée dans les réalisations à plus grande échelle aux Etats-Unis et en URSS.*

*La France n'était donc pas en reste.*

*Malheureusement, vers la fin des années soixante, l'EDF d'abord, le CEA ensuite, décidèrent d'arrêter progressivement les travaux sur la M.H.D., évoquant plusieurs raisons techniques : d'abord la corrosion dans la tenue des électrodes provenant du sodium et du potassium ; ensuite le fait que le courant généré est un courant continu de basse tension qui doit donc ensuite être reconverti en courant alternatif pour le transport ; et enfin le fait que l'augmentation du rendement n'était estimée qu'à 5 à 10%, résultat que l'on peut très bien obtenir avec un cycle combiné à gaz (c'est-à-dire deux turbines).*

*Si ces problèmes sont réels, il faut plutôt se tourner vers la logique de rentabilité financière et l'absence de pensée à long terme pour comprendre l'arrêt des recherches. Ce n'est plus l'apport de la M.H.D. dans les technologies de l'avenir comme la fusion, qui devient le critère fondamental, mais simplement le fait que le prix du charbon et du pétrole étaient relativement bas, et surtout le fait que la France ait choisi le nucléaire comme filière principale pour la production électrique. Or, du côté du nucléaire, le CEA estima que la M.H.D. ne pourrait s'appliquer ni aux centrales alors développées, ni même aux types futurs de réacteurs à haute température, étant donné l'impossibilité de chauffer suffisamment le gaz conducteur. N'étant plus rentable pour le charbon, du fait de la baisse des prix, ni utilisable à moyen terme pour le nucléaire, la M.H.D. vit l'intérêt qu'on lui portait s'estomper.*



La tuyère de l'U-25 soviétique. Les protubérances rondes sur les côtés sont les électrodes segmentées. La tuyère est recouverte de briques en céramique.

gets accordés à celles qui restent ne permettent même pas de terminer la réalisation de projets déjà très avancés, sans parler d'en entamer de nouveaux.

## Les programmes de l'ex-URSS

Du côté russe, la M.H.D. ne se porte pas particulièrement bien, même si les efforts se poursuivent en dépit des grandes difficultés politiques et économiques que traversent les Etats de l'ex-URSS.

L'Institut des températures élevées (IVTAN) à Moscou poursuit encore un programme sur la génération d'électricité par M.H.D. quoiqu'il se trouve lui aussi dans une situation d'incertitude, de chaos budgétaire et de réorganisation.

En 1961, l'URSS construisait le premier petit prototype d'essai et un an plus tard, l'académicien Alexandre Cheindline, directeur de l'IVTAN, annonçait un futur programme de recherche avec deux grosses installa-

tions. Contrairement aux études faites dans le reste du monde, centrées uniquement sur le générateur M.H.D., les chercheurs soviétiques avaient étudié l'ensemble des problèmes dont dépend la mise en pratique de la M.H.D., et ils construisirent un modèle complet, le U-02, dès 1964.

L'étape suivante était naturellement la réalisation d'une installation semi-industrielle : l'U-25 fut opérationnel avec une puissance de 20 MW, dès 1971 ! Il fonctionne avec un aimant supraconducteur réalisé par le laboratoire américain d'Argonne. En effet, à l'époque les Etats-Unis et l'Union soviétique avaient établi une collaboration étroite dans le domaine de la M.H.D. Cette collaboration prit forme avec l'accord signé par le président Nixon et le président du Présidium Nikoli Podgorny, en 1974, sur l'énergie non-nucléaire, mais l'Administration Carter y a mis fin lors de l'invasion des Soviétiques en Afghanistan, en 1979.

Le U-25 permit la réalisation de nombreuses expériences donnant aux scientifiques russes une expérience unique dans la M.H.D.

Cette expérience devait permettre aux Russes de construire le premier groupe M.H.D. industriel au monde, prévu pour le quinquennat de 1981-85.

Mais le discours du Président Reagan du 23 mars 1983 — annonçant l'Initiative de défense stratégique — bouleversa les programmes de recherches soviétiques. Il était devenu impératif de faire un effort supplémentaire dans le domaine de la recherche militaire sur les armes à laser, au détriment des recherches civiles. La construction, à Riazan, du générateur M.H.D. de 250 MW avec sa turbine à vapeur standard de 300 MW consommant du gaz naturel ne fut pas achevée et les équipements des laboratoires annexes sont encore attendus.

Cependant, lors du 30ème colloque sur la M.H.D., le Symposium on Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics (SEAM), tenu à Baltimore (Etats-Unis), en juin 1992, le Dr E.M. Shelkov, directeur-adjoint d'IVTAN, a exprimé les espérances que ses confrères russes plaçaient dans leur programme M.H.D.

Il a tout d'abord expliqué que les équipements du laboratoire de l'Institut, y compris son générateur M.H.D., unique au monde, seraient réorganisés et améliorés. Le générateur U-25, qui produisait dans le passé l'électricité pour le réseau de Moscou, va maintenant vendre à la fois son électricité et sa production de chaleur aux industries moscovites. C'est ainsi, a expliqué Shelkov, que tous les instituts de l'Académie des Sciences essaient de financer leurs projets et leurs chercheurs.

En plus du générateur principal fonctionnant au gaz naturel, le U-25, un prototype dérivé U-25G utilisant du charbon est en cours de réalisation. Ce prototype moderne, conçu avec un aimant supraconducteur italien, devrait produire 25 à 35 MW d'énergie thermique.

Shelkov a expliqué que l'Institut bénéficierait également d'autres sources de revenus grâce aux retombées industrielles de la recherche sur la M.H.D., par exemple, les brûleurs et les dispositifs de préchauffage à haute-température, utilisés dans la M.H.D. pour brûler efficacement le combustible fossile. L'on estime que les dispositifs de préchauffage permettent d'accroître le rendement de la production de coke pour la sidérurgie de 20 à 25 %.

Un autre prototype, le U-25M, devait être construit en 1993. Il avait été élaboré par le ministère russe de l'Energie. Les essais auraient dû se dérouler en été, à cause de l'insuffisance chronique d'énergie et de chaleur nécessaire au fonctionnement de l'industrie au Nord de Moscou pendant les mois de novembre à mars. Malheureusement, l'état de chaos dans lequel se trouve l'Etat russe, du fait de la thérapie de choc que le FMI lui applique depuis trois ans, a mené à l'annulation de tous ces projets.

## Complexes «énergie-technologie»

La vision la plus passionnante développée autour du concept M.H.D., fut décrite par Shelkov lorsqu'il ima-

gina un système de production électrique par M.H.D. intégré à d'autres industries, par exemple chimiques ou métallurgiques.

Lorsque un site M.H.D. utilise un mélange d'air et d'oxygène pour sa combustion, une quantité variable d'azote est produite. Stabilisé, par exemple par combinaison avec de l'oxygène, l'azote devient utilisable pour les fertilisants agricoles. Un complexe chimique, construit à côté du centre de production électrique pourrait alors produire de l'ammoniac et de l'oxyde d'azote, ainsi que du soufre élémentaire, sous-produit du charbon brûlé.

Ce concept d'industrie entourant et intégrant un site énergétique a été élaboré au début de l'ère de l'énergie nucléaire sous le nom de Nuplexe. L'idée de ces nuplexes, de ces complexes agro-industriels basé sur l'énergie nucléaire, était de pouvoir donner tout à la fois de l'électricité, des technologies avancées et de nouvelles industries aux parties du monde encore sous-développées. L'électricité aurait alors révolutionné leur niveau de vie et leur mode de travail.

Shelkov et ses collègues estiment que ces complexes M.H.D. intégrant énergie et technologies, en particulier production d'électricité et usines chimiques, pourraient faire diminuer d'un facteur deux le coût de l'électricité grâce à la vente de produits chimiques. Voilà qui devrait donner encore plus d'arguments, même à ceux pour qui les problèmes de rentabilités sont déterminants ! ■

**Dans notre prochain numéro, la deuxième partie de cet article :  
« Les applications industrielles de la M.H.D. »**

# FUSION

*La science, passionnément !*

**Directeur de publication**  
Christophe Lavernhe

**Directeur de rédaction**  
Philippe Messer

**Rédacteur en chef**  
Emmanuel Grenier

**Secrétaire de rédaction**  
Anne-Marie Desachy

**Rédaction**  
Pierre Bonnefoy,  
Edouard Calloux,  
Paul Deheuvels,  
Marsha Freeman,  
Paul Gallagher,  
Marjorie Hecht,  
Jean-Jacques Monot,  
Yves Paumier,  
Gil Rivière-Wekstein,  
Charles Stevens.

**Conseillers de rédaction**  
Jacques Cheminade,  
Dino de Paoli,  
Ralf Schauerhammer,  
Jonathan Tennenbaum,  
Friedwardt Winterberg.

**Ont participé à ce numéro**  
Catherine Brannan,  
Philippe Jamet.

**Contact Presse et service abonnement**  
Pierre-Yves Guignard

**Dépôt légal**  
5ème bimestre 1994  
Commission paritaire n° 63876

Imprimerie Fricotel - 88000 Epinal

**Fusion (membre de l'OJD)**  
53 rue d'Hauteville 75010 Paris  
Tél. : (1) 42.46.72.67  
Fax : (1) 42.46.72.60  
Fusion est publié par les Editions Alcuin,  
53 rue d'Hauteville - 75010 Paris.

**Crédit photo**  
Bettman Archive : p.15 ; IHI : p.39, 40 ;  
ISAS : p.42, 45, 46 ; Mitsubishi : p. 30-31,  
34, 38 ; Nasa : p.2 ; Nasda : p. 36 ;  
NEC : p.33 ; RMN - Arnaudet :  
couverture, p. 4 ; Gil Rivière-Wekstein :  
p.2 ; Phil Ulanowsky : p.21.