

La saga de la MHD dans les gaz

Jean-Pierre Petit

Directeur de recherche au CNRS

L'auteur, l'un des meilleurs spécialistes français de la magnétohydrodynamique (MHD), revient ici sur l'histoire de cette technique, en insistant sur ses implications militaires. Pour lui, la MHD civile n'est que la partie émergée d'un iceberg comprenant de nombreuses techniques de pointe intéressantes fortement les militaires.

Dans des articles précédemment publiés dans la revue, le lecteur a pu découvrir certains aspects de cette discipline mal connue : la MHD. Après une éclipse de dix années, celle-ci redevient « à la mode »¹.

Comme évoqué dans les articles précédents, l'idée initiale concernant les techniques MHD, était centrée sur les rendements de conversion, très supérieurs à ceux des centrales conventionnelles, à turbine à gaz, parce que liés au procédé. L'écueil était évidemment les fortes températures à mettre en œuvre pour que le fluide caloporteur, le gaz contenant l'énergie de base, déboulant dans les tuyères des différents générateurs MHD, ait une conductivité électrique suffisante. En règle général le montage différait peu de celui qu'avait utilisé Faraday, des siècles plus tôt, pour essayer d'extraire l'énergie des marées dans l'estuaire de la Tamise. Dans le cours du fleuve lui-même, l'eau douce eut été trop peu conductrice de l'électricité. Seule l'eau salée pouvait convenir. Faraday plaça donc deux électrodes de part et d'autre du fleuve. Le courant liquide dans l'estuaire, lié aux marées, coupait la composante verticale du champ magnétique terrestre (une fraction de gauss). Le fluide était donc le siège d'une force électromotrice VBL où V est la vitesse, B l'intensité du champ magnétique et L la distance entre les électrodes. Il montra effectivement qu'on pouvait, à l'aide de ce générateur MHD, produire un faible courant, d'intérêt industriel dérisoire.

Dans les années 60, les ingénieurs reprirent cette idée en utilisant cette fois des champs plus intenses (10 à 20.000 gauss) et des fluides chauds et denses. Pour accroître la conductivité électrique on adjoignait un faible

pourcentage d'une substance aisément ionisable, en l'occurrence du césium (2%). Deux filières étaient envisagées. La première, dite « à cycle ouvert », consistait à utiliser le gaz issu d'une tuyère où on faisait brûler des hydrocarbures sous pression, le gaz étant alors détendu dans une tuyère supersonique. Une installation de ce type fonctionna par exemple au centre EDF des Renardières, près de Moret-sur-Loing. La seconde, dite en « cycle fermé », visait à utiliser le gaz de refroidissement d'un réacteur nucléaire dit « à haute température » (HTR). Ainsi était conçue la boucle Typhée, construite au CEA de Fontenay-aux-Roses dans les années 70.

Dans les deux approches mentionnées, les problèmes étaient considérables. Il fallait disposer d'électrodes supportant d'aussi fortes températures sans se volatiliser. De nombreux pays, Angleterre, France, Allemagne, Etats-Unis (dans de nombreuses universités), Italie, Hollande, URSS, s'engagèrent dans cette course. Seuls les soviétiques, avec leur générateur U-25, construit à l'Institut Kurtchatov des hautes températures, parvinrent dans les années 70 à mettre en œuvre des installations quasi-opérationnelles, essentiellement grâce aux technologies de pointe qu'ils maîtrisaient, dans le domaine des électrodes en céramique.

Une des surprises de cette communauté internationale de chercheurs MHD fut de découvrir, lors d'un congrès tenu à Boston en 1979, que les Chinois avaient également mené un effort très important dans cette direction, à l'insu de tous, utilisant les deux filières. Lors de ce congrès un chercheur américain avouait sa stupéfaction : « Comment avons-nous fait pour ignorer tout ceci, alors que nous quadrillions sans cesse le territoire chinois avec nos satellites ? »

Hélas, les Américains, traquant tout signe d'activité de pointe sur le territoire chinois, recherchaient des installations qui auraient été semblables aux leurs, c'est-à-dire des ensembles de bâtiments aux formes géométriques régulières, jouxtant un parking automobile important. Mais les ima-

ges montrées par les Chinois étaient fort différentes et il apparut à ces spécialistes qu'un centre de recherche de pointe en MHD, dans ce pays, ressemblait à une vieille cimenterie et que le volume de son activité devait être évalué par l'importance du nombre de bicyclettes attenantes aux bâtiments...

L'émergence des générateurs MHD est liée à la maîtrise des matériaux résistant aux hautes températures. Mais elle est aussi directement liée à l'intensité du champ magnétique appliqué. A cette époque, les champs, produits soit par des solénoïdes conventionnels, soit par des dispositifs à supraconducteurs, étaient trop faibles. Les progrès récents réalisés en matière de supraconduction vont donc relancer la question dans les années ou décennies à venir, immanquablement.

Une solution consistait à essayer de mettre le gaz en état « bitempérature », dans lequel la température du « gaz d'électrons » était notablement supérieure à celle du gaz lui-même, déterminée par les « espèces lourdes ». L'idée fut lancée en particulier aux États-Unis par Kerrebrock. Ce concept ne doit pas surprendre le lecteur. Il possède dans son bureau ou dans son appartement de tels systèmes bitempératures, qui sont tout simplement... les tubes au néon. On sait que ces tubes, en fonctionnement, restent froids, par opposition aux lampes à incandescence, alors que le « gaz d'électrons » est à plusieurs milliers de degrés.

Tout ceci est en détails dans ma bande dessinée *Pour quelques ampères de plus*, dans la série des aventures d'Anselme Lanturlu. Le champ électrique appliqué accélère les rares électrons « libres », non liés aux atomes, existant dans le gaz. Comme le gaz est raréfié, le libre parcours moyen est alors suffisamment important pour que ces électrons acquièrent une énergie cinétique suffisante, au cours de cette course, pour arracher des électrons liés aux atomes neutres. Il se crée alors d'autres électrons libres qui pourront être accélérés à leur tour, donnant ce qu'on appelle une « avalanche électronique ». Dans un tube au néon un état de régime se crée. Les électrons rapides percutent alors l'enduit fluorescent tapissant le tube, qui émet de la lumière. Lorsque la tension est coupée, tous ces électrons retournent immédiatement sur leurs atomes d'origine (désionisation).

Les calculs montrèrent qu'une telle situation pouvait être réalisée, dans des gaz denses, le champ électrique, électromoteur, étant le « champ apparent » V égal au produit V (vitesse) par B (champ magnétique). Les « électrons secondaires » étaient alors produits par la semence alcaline, à bas potentiel d'ionisation (césium). Ce procédé est inemployable pour la conversion directe. En effet, les produits de combustion sont constitués de molécules s'excitant facilement (dont principalement le gaz carbonique). Cette excitation, suivie aussitôt d'une désexcitation radiative, a pour effet d'empêcher la montée en température du gaz d'électrons, donc le

développement de cette « ionisation non-thermique ». Seuls les cycles fermés pouvaient convenir. On utilisait alors comme fluide de conversion un gaz rare, essentiellement de l'hélium, dont le potentiel d'excitation était suffisamment important pour rendre ces pertes négligeables. On avait calculé que la température électronique pourrait atteindre deux fois celle du gaz, voire plus. C'est sur cette base qu'avait été construite la coûteuse et complexe installation Typhée.

Mais en 1965, au congrès de Newcastle, Velikhov, jeune et brillant chercheur devenu par la suite vice-président de l'Académie des Sciences d'URSS, fit des prédictions théoriques alarmantes (qui ne furent pas à l'époque prises au sérieux). Selon lui le fluide de conversion devait être le siège d'une instabilité « électrothermique » à développement très rapide, qui devait compromettre l'opération. Il s'agissait de ce que l'on pourrait appeler une « turbulence électronique ». L'ionisation devenait alors très inhomogène et le milieu se présentait alors comme un « mille-feuille » avec alternance de couches très riches en électrons et de couches faiblement conductrices de l'électricité.

Le drame était que cette instabilité naissait dès que le champ magnétique devenait trop intense (pour le spécialiste, dès que le « paramètre de Hall dépassait une valeur critique calculée par Velikhov, proportionnelle à B).

Ce phénomène se manifesta effectivement, au grand dam de ceux qui avaient misé sur cette formule a priori élégante. Les photographies des veines, prises à l'aide de caméras ultra-rapides, révélaient un plasma hautement inhomogène, stratifié, qui tenait plus du « condensateur » que d'un conducteur électrique normal. Les performances des générateurs subirent le contrecoup de ce nouveau phénomène et les projets s'avèrent non-rentables. Certaines pompes à vide, à palettes, primitives, possèdent un dispositif de contrôle de l'ionisation, sous la forme d'une simple diode : une ampoule de verre contenant deux électrodes mises sous tension. Lorsque la pression égale



Les illustrations de cet article sont tirées de bande dessinée de Jean-Pierre Petit *Le Mur du Silence*, dans la série des aventures d'Anselme Lanturlu (Editions Belin, 8 rue Férou, Paris 75006.).

celle de la pièce, le courant ne passe pas. Puis, dès que celle-ci baisse, la décharge devient visible. Enfin, lorsque la pression tombe aux alentours d'un centième de millimètre de mercure, la lueur disparaît : il n'y a plus assez de gaz pour assurer le passage d'un courant notable. C'est ainsi que les chercheurs peuvent contrôler à peu de frais, de manière approximative, la pression atteinte. Si vous approchez de cette ampoule de verre un aimant permanent puissant, vous verrez la décharge se stratifier et apparaître des « piles d'assiettes », inclinées par rapport à l'axe de la décharge, qui sont la signature caractéristique de l'instabilité de Velikhov.

Toujours est-il que les puissances extraites et les rendements des générateurs MHD bitempératures s'avèrent dérisoires. C'est à cette époque (1965) que je devins chercheur dans un laboratoire du CNRS, l'Institut de Mécanique des fluides de Marseille. Dans celui-ci on avait créé des sortes de simulateurs de cette conversion MHD. On travaillait sur de l'argon pur à 10.000°C, sous une pression d'un bar, déboulant dans une minuscule veine MHD, de la taille d'une grosse boîte d'allumettes, à des milliers de mètres par seconde, à vitesse supersonique. Le champ était produit par un solénoïde alimenté, pendant deux millièmes de seconde, par une batterie de condensateur. Le lecteur peut se demander comment une telle installation pouvait tenir à des températures aussi fortes. Mais il s'agissait d'expériences impulsives, de très brèves durées (200 millièmes de seconde). Le gaz était mis en mouvement par un explosif, dans ce qu'on appelait un « tube à choc », l'ensemble évoquant une sorte de canon à gaz chaud, de 6 mètres de long. Ces dispositifs furent mis en œuvre aux Etats-Unis par Zauderer et en France par Inglesakis. Les chercheurs qui se noyaient dans les problèmes technologiques contemplaient avec effarement nos tuyères en plexiglas et nos électrodes en cuivre rouge. Les rendements étaient importants et les puissances extraites considérables. La « boîte d'allumettes » produisait plusieurs mégawatts électriques, mais hélas pendant des temps très brefs.

À cette époque, le CEA nous demanda de tenter de réaliser des fonctionnements bitempératures, l'idée émanant de l'ingénieur Solbès. Tout le monde s'attendait à voir naître l'instabilité de Velikhov et pensait que cela serait une façon commode de l'étudier.

Dès cette époque, j'étais devenu assez fin théoricien pour pouvoir maîtriser les différents tenants et aboutissants de cette instabilité d'ionisation. Je m'étais d'ailleurs lié d'amitié avec Velikhov et avec son collaborateur Golubev, ce qui m'avait permis de progresser rapidement dans la compréhension du phénomène. Je calculais que si l'ionisation pouvait être établie suffisamment rapidement, ceci ramenait ce paramètre de Hall en dessous de sa valeur critique et qu'il existait alors une « une plage de stabilité ». Si l'ionisation gagnait de vitesse l'instabilité, le tour était joué ; cette idée fonctionna au premier essai et cela mérite d'être conté. Toute l'équipe avait chargé les condensateurs et le « canon à gaz » pour l'essai, en 1966. Le préposé aux mesures s'attendait à des valeurs d'intensité débitée assez faibles et avait réglé ses appareils d'enregistrement en conséquence. Mais les spots des oscilloscopes Tectronix partirent dans la nature et il fallut refaire des essais avec de nouveaux réglages. Au troisième essai, à la fin de la matinée il devint clair que la machine fonctionnait cette fois avec une température de gaz de « seulement » 6000 degrés et une température électronique proche des 10.000 et débitait toujours des mégawatts. Inglesakis était sceptique. Je suggérais alors d'adjoindre 2% de gaz carbonique dans le mélange, indiquant que ce gaz devrait refroidir le gaz d'électrons, comme évoqué plus haut, ce qui fut immédiatement le cas. Tout ceci fut publié au colloque international de MHD de Varsovie, en 1967 et surprit beaucoup nos collègues étrangers.

Une telle idée aurait dû être exploitée et développée, mais à l'époque la MHD battait de l'aile en France et le gouvernement, frappé par la récession, avait décidé de faire des coupes sombres dans certains budgets de recherche. Typhée, qui n'avait

rien produit de bon, fut démantelée. Mais nos recherches furent aspirées, elles aussi, dans ce maelström. Je quittais mon laboratoire pour rejoindre l'observatoire de Marseille. Après mon départ, un de mes étudiants, Jean-Paul Caressa, reprit ces travaux à son compte et obtint un prix scientifique international, le prix Worthington.

Des recherches furent néanmoins poursuivies quelques années par d'autres chercheurs de l'IMFM, Fontaine et Forestier, qui concernaient cette fois l'accélération. Il ne s'agissait plus de rechercher un fonctionnement bitempérature, mais simplement d'accélérer le plasma lors de son passage dans la « boîte d'allumettes ». Des résultats spectaculaires furent obtenus. Le gaz, de l'argon à 10.000°C, sous une pression d'un bar, pénétrait dans la tuyère MHD à 2700 mètres par seconde et ressortait, 8 centimètres plus loin, à 8000 mètres par seconde !

La propulsion MHD avait fait l'objet de nombreuses études dans le monde dans les années précédentes. On sait que le rendement d'une fusée est directement lié à la vitesse d'éjection des gaz. C'est la raison pour laquelle sont apparus les propulseurs à mélange d'hydrogène et d'oxygène liquides (cryogéniques), où les vitesses d'éjections peuvent atteindre 2500 mètres par seconde, et qui tendent maintenant à détrôner les fusées à propergol solide.

L'idée sous-jacente d'une propulsion MHD appliquée à la conquête spatiale concernait les voyages de longue durée, style Terre-Mars. La théorie indiquait que ces rendements propulsifs étaient inadéquats pour des mises en orbite brève et ne convenaient qu'à des croisières interplanétaires de longue durée, qui permettaient de tirer le meilleur parti du moindre gramme de propulsif. Ces recherches furent interrompues lorsque le projet de conquête du sol martien fut abandonné.

Au début des années 70, ces études de MHD gaz civiles connurent donc une désaffection dans tous les pays. Mais ceci fut sans effet sur les recher-

