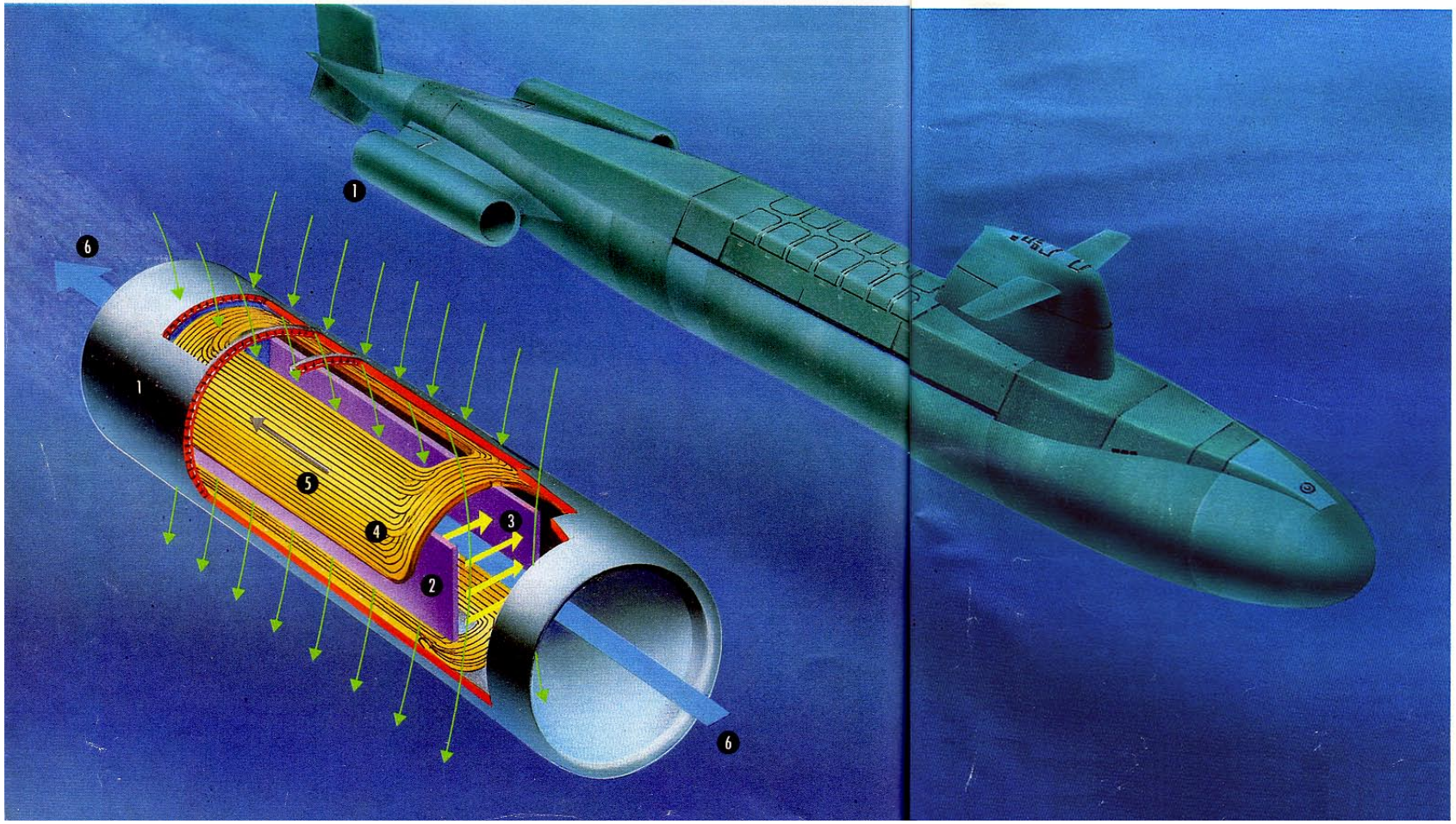
PAS DE MOTEUR, PAS D'HÉLICE, PAS DE GOUVERNAIL...

Déjà une vedette japonaise est à l'essai. Et d'ici quelques années, les sous-marins se déplaceront dans le plus grand silence en exploitant la conductivité électrique de l'eau de mer grâce à de puissants aimants supraconducteurs... La propulsion magnéto-hydro-dynamique (MHD) va peut-être révolutionner les transports navals.

Des sous-marins extrêmement silencieux et capables de bondir à des vitesses très élevées, sans moteur, ni aucune autre pièce mobile, grâce à l'énergie électromagnétique et à l'eau de mer, ce n'est pas de la science-fiction. Ça n'existe pas encore, mais les études sont bien avancées dans plusieurs pays. Depuis quelques années, les recherches sur la propulsion magnéto-hydro-dynamique (ou MHD) ont pris un nouvel essor.

Le principe en est étonnemment simple ; voilà plus d'un siècle et demi qu'on l'a découvert, et il est enseigné au lycée. Prenez un conducteur électrique (par exemple un fil de cuivre), appliquez-lui un champ électrique : le fil sera parcouru par un courant. Maintenant, plongez-le dans un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique au moyen d'un aimant : grâce à l'interaction de ces deux champs, le conducteur subit alors une force électromagnétique, dite généralement de Laplace-Lorenz, dont la direction est perpendiculaire à la fois au champ magnétique et au champ électrique. Si le fil de cuivre est libre, cette force aura pour effet de le déplacer.

Cette force de Laplace-Lorenz s'applique aussi aux conducteurs liquides, ou gazeux... et en particu-



Un sous-marin à réaction

Silence, rapidité et souplesse d'utilisation, tels sont les avantages que l'on attend d'un sous-marin à propulsion magnéto-hydro-dynamique. En attendant qu'il démontre ses capacités, voici comment il avance. A l'intérieur de chaque propulseur en forme de tube (**1**), deux électrodes (**2** et **3**), lorsque le contact est établi, engendrent un champ électrique (**flèches jaunes**) — donc un courant — transversal dans l'eau de mer à l'intérieur du tube ; et un bobinage supraconducteur (**4**) qui, lorsqu'il est alimenté par un courant (**5**), produit dans l'eau un champ magnétique vertical (**flèches vertes**), donc perpendiculaire au champ électrique.

L'interaction de ces deux champs exerce sur l'eau de mer, conductrice (quoique faiblement), une force (**6**), dite de Laplace-Lorenz, perpendiculaire à la fois au champ magnétique et au champ électrique. C'est cette force électromagnétique qui pousse l'eau vers l'arrière. Par réaction, le sous-marin est poussé en avant.

Ce type de propulsion MHD est dit "à conduction et à écoulement interne" : à conduction parce que l'on crée un courant électrique dans l'eau de mer grâce à des électrodes ; à écoulement interne parce que ces champs électrique et magnétique s'exercent sur l'eau de mer à l'intérieur d'un tube.

HÉLÈNE GUILLEMOT

lier à l'eau de mer, laquelle, étant salée, conduit l'électricité, contrairement à l'eau douce. Conclusion : si un bateau est équipé d'un dispositif permettant d'appliquer à l'eau de mer un champ électrique et un champ magnétique, l'eau subira la force de Laplace-Lorenz et se déplacera par rapport au bateau... autrement dit, le bateau avancera ! La propulsion MHD est donc une propulsion "à réaction" : la force exercée sur l'eau, repousse par réaction le bateau.

Si c'est si simple, direz-vous, pourquoi n'y a-t-on pas pensé plus tôt ? On y a pensé, on a même étudié la question de près au début des années 1960 ; mais les résultats de ces travaux étaient plutôt décourageants. Le premier rapport de "prospection sur la propulsion magnéto-hydro-dynamique pour les navires", rédigé en 1962 par un Américain du nom de Phillips, concluait ainsi :

Dans la propulsion MHD, bobinages et électrodes sont 1 000 fois plus conducteurs que le cuivre

« 1 - Avec l'induction magnétique — c'est-à-dire le champ magnétique — la plus élevée qu'il soit possible de créer par les méthodes actuellement disponibles, le système optimal propulserait un sous-marin de 600 pieds à une vitesse de 10 nœuds avec un rendement électrique de 8 %. Obtenir des vitesses ou des rendements appréciables nécessiterait des champs beaucoup plus élevés.

» 2 - La raison de cette pauvre performance est la faible conductivité de l'eau de mer (...).

» 3 - Le mauvais rendement et la faible puissance de ces systèmes les rend peu aptes à être utilisés comme moyen de propulsion. »

L'eau de mer est, de fait, une fort mauvaise conductrice de l'électricité : sa conductivité est environ dix millions de fois inférieure à celle du cuivre ! Et, comme le remarque Phillips, pour compenser cet inconvénient, des champs magnétiques très intenses sont nécessaires, que n'offraient pas les moyens techniques de l'époque.

A cause de ces insuffisantes techniques, peut-être aussi par conservatisme, les recherches se sont donc interrompues vers 1967.

Mais, depuis quelques années, on assiste à un redémarrage brutal des études sur la propulsion MHD. C'est que la situation a changé : la supraconduction a fait de grands progrès. Les supraconducteurs sont des matériaux qui ont la particularité de n'offrir pratiquement aucune résistance à l'électricité, et de laisser passer des densités de courant jusqu'à mille fois supérieures à celle admise par le cuivre.

C'est pourquoi une bobine supraconductrice est capable d'engendrer un champ magnétique des dizaines de fois plus élevé qu'un électroaimant ordinaire, et cela sans échauffement par effet Joule ni grande dépense d'électricité. Ces champs magnétiques élevés permirent donc de relancer les recherches sur la propulsion MHD.

Les Américains furent les premiers, dès le début des années 1980, à reprendre les travaux théoriques sur propulsion. Aujourd'hui leurs recherches (au laboratoire Argonne, dans l'Illinois, entre autres), soutenues par le Département de la Défense, sont consacrées à la réalisation de sous-marins. En effet, les sous-marins militaires sont confrontés à un problème crucial, la discrétion : leurs pièces mécaniques tournantes — moteur, arbre, hélice — engendrent des bruits qui les font repérer par les systèmes de détection. En effet, la rotation de l'hélice entraîne localement une baisse de pression telle que l'eau se transforme en vapeur, et ce phénomène, appelé cavitation, provoque un bruit important et identifiable (***voir photo ci-contre***). On conçoit donc tout l'intérêt d'un sous-marin à propulsion MHD, entièrement silencieux puisque sans hélice ni pièce mobile !

Mais la discrétion n'est pas la seule qualité de la MHD : ce mode de propulsion offre la possibilité théorique d'atteindre des vitesses très élevées, et d'obtenir de très bons rendements énergétiques ; il permet d'envisager la suppression de toute pièce mécanique mobile, y compris le gouvernail, et d'améliorer ainsi les performances hydrodynamiques des bateaux.

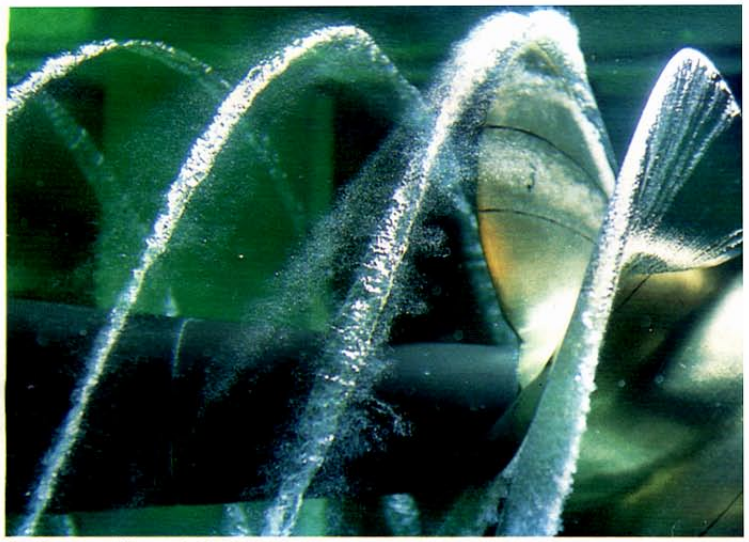
La propulsion MHD ne devrait donc pas se limiter au domaine militaire.

C'est ce qu'ont compris les Japonais, qui se sont lancés très vite dans un important programme expérimental civil, financé par de grandes sociétés privées. A l'université de Kobe, ils ont déjà fabriqué une maquette de vedette équipée de propulseurs de ce type.

Quant aux Soviétiques, qui depuis longtemps ont à Riga (Lettonie) un des plus important centre de recherche au monde entièrement consacré à la MHD des liquides, on ignore où en sont précisément leur travaux, mais il y a de fortes chances pour qu'eux aussi se préoccupent de propulsion.

Depuis peu, la France n'est pas en reste : une petite équipe s'est constituée, il y a plus de deux ans, à l'Institut de mécanique de Grenoble, avec des chercheurs dont certains travaillaient déjà auparavant sur d'autres applications de magnéto-hydrodynamique (***voir encadré p. 86***). Ils bénéficient du concours, sur le campus de Grenoble, de spécialistes des applications métallurgiques de la MHD, de la supraconduction et de l'électrochimie, et sont en collaboration avec Jeumont-Schneider, grand industriel du nord de la France, qui prend en charge la faisabilité industrielle du propulseur et son intégration au bateau.

Dans un premier temps, l'équipe grenobloise se livre à un travail de synthèse théorique : l'analyse exhaustive et comparée de tous les types de propulsion MHD. Car le procédé décrit au début de cet article — un champ électrique plus un champ magnétique perpendiculaire créant une force de Laplace-Lorenz —, qu'on appelle la propulsion "par conduction", n'est pas le seul possible : il existe une seconde voie, celle de la propulsion "par induction".



De l'eau qui bout à froid. Sous la pression d'une cocotte-minute, l'eau se transforme en vapeur au-dessus de 100° C. A basse pression, au contraire, la vapeur est produite à faible température. C'est ce qui se produit à la surface d'une hélice tournant à grande vitesse dans l'eau : la pression chute suffisamment pour que se forment des bulles de vapeur à froid. C'est la cavitation. Ces bulles dégradent les performances de l'hélice et produisent un bruit spécifique, qui gêne la discrétion des sous-marins (voir *Science & Vie* n° 840 p. 50).

L'induction électrique a été découverte par Faraday dans les années 1830 : un champ magnétique qui se déplace ou qui varie créé dans un corps conducteur un courant qu'on qualifie d'"induit". Le propulseur par induction est une application de cette loi de Faraday : on génère dans de l'eau de mer un champ magnétique glissant, en faisant passer un courant alternatif dans un bobinage de forme adéquate : ce champ magnétique "ondule" le long du bobinage. Etant variable, il crée dans l'eau des courants induits, et l'interaction champ magnétique-courant induit se traduit par une force dans l'eau, capable de faire avancer un bateau.

En résumé, la différence entre les deux types de propulseur est que la propulsion à conduction utilise deux champs séparés — un champ électrique créé par des électrodes et un champ magnétique uniforme créé par une bobine —, alors que dans la propulsion à induction, le champ électrique est induit par un champ magnétique glissant, et il n'y a pas d'électrode (c'était la solution envisagée par Phillips dans son rapport cité plus haut).

Outre cette alternative conduction/induction, un autre choix se présente si l'on veut construire un navire ou un sous-marin à propulsion MHD : les champs magnétique et électrique peuvent être créés soit à l'extérieur de la coque, et la force repoussera l'eau à la périphérie du bateau ; soit engendrés à l'intérieur d'un canal traversant le navire, et ils ne s'appliquent qu'à l'eau s'écoulant dans ce canal. A partir de ces deux possibilités, on peut envisager quatre types de propulseurs : à conduction avec écoulement externe, à conduction avec écoulement en canal, à induction avec écoulement externe, à induction avec écoulement en canal. Il s'agit donc de comparer les performances et les caractéristiques de ces quatre scénarios pour pouvoir, dans une seconde phase, faire un choix en fonction des besoins.

Conduction ou induction, laquelle choisir ? Chaque option a ses avantages et ses inconvénients : tout dépend de ce qu'on lui demande. Par exemple, la propulsion par induction a l'avantage de se passer d'électrodes : donc pas de corrosion, pas d'électrolyse et surtout... pas de bulles (celles-ci, on le verra plus loin, peuvent constituer une redoutable source de bruit pour un sous-marin). En revanche, un propulseur à induction est d'un maniement plus difficile. D'une part, chaque fois que l'on change la vitesse, il faut régler le synchronisme du champ magnétique en modifiant sa fréquence si l'on ne veut pas dégrader le rendement ; d'autre part, la marche arrière se fait beaucoup plus difficilement qu'avec la propulsion à conduction. D'une manière générale, cette dernière est plus souple : elle permet d'agir au choix sur le champ magnétique ou sur le champ électrique, alors qu'avec un propulseur à induction les deux champs sont liés et l'on doit agir en même temps sur les courants et sur leur fréquence.

Ecoulement externe ou interne ? Si l'on compare maintenant l'écoulement externe et l'écoulement en canal, ce dernier procédé possède un avantage évident : le rendement électrique peut atteindre 65 à 85 % car les champs restent confinés à l'intérieur d'un conduit ; alors que ce rendement est bien plus faible avec des champs extérieurs au bateau, qui s'éloignent à l'infini et dont l'énergie sert surtout... à

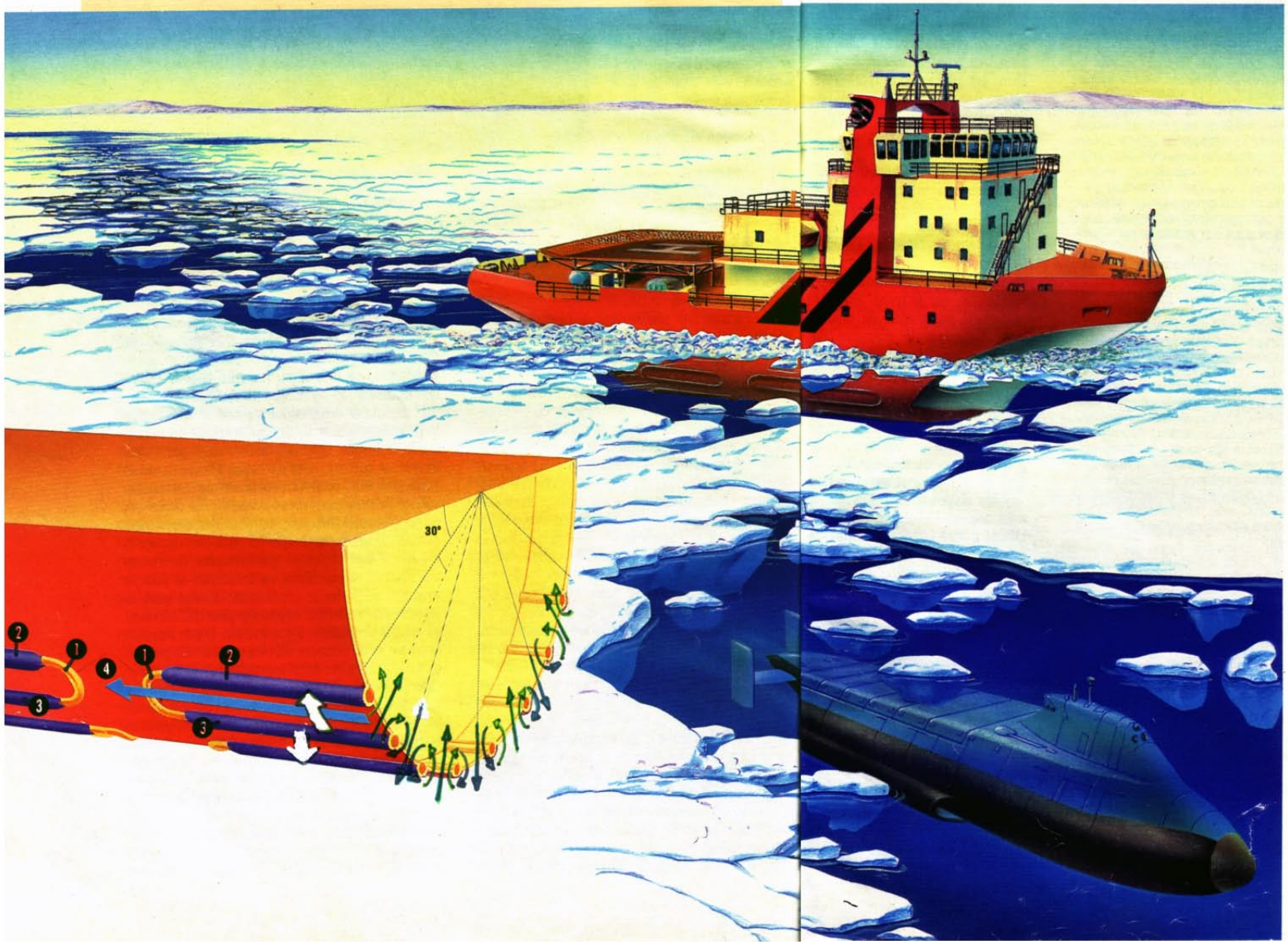
UN BRISE-GLACE ET UN CARGO SOUS-MARIN, DÉJÀ LA MHD SE DIVERSIFIE

Un projet de brise glace à propulsion MHD existe actuellement au Japon. La coque du bateau est semi-cylindrique et porte trois rangées de quatre bobines supraconductrices (**1**) séparées par un angle de 30°. Chaque bobine est surmontée d'une paire d'électrodes, une anode (**2**) et une cathode (**3**).

A cause de la disposition des bobines et de la succession anodes-cathodes, lorsqu'elles sont alimentées en courant, les électrodes produisent des champs électriques tangents à la surface de la coque (**flèche jaune**).

En même temps, les champs magnétiques (**flèches vertes**) créés dans l'eau par les bobines supraconductrices sont dans le sens des rayons de la coque, donc toujours perpendiculaires aux champs électriques. Il en résulte une force de Laplace-Lorenz (**4**) qui s'exerce sur l'eau de mer perpendiculairement aux deux champs, c'est-à-dire suivant l'axe du bateau, ce qui le propulse vers l'avant. Ce type de propulsion MHD est "à écoulement externe", contrairement à celui du sous-marin de la p. 80.

Un cargo sous-marin serait également en projet au Japon. Le type de propulsion MHD ne semble pas encore avoir été arrêté.



"chauffer l'eau de mer". Car dès qu'on s'éloigne un peu trop de la coque, les champs électrique et magnétique ne sont plus perpendiculaires entre eux.

Autre qualité de l'écoulement en canal, appréciable pour les applications militaires, sa plus grande discrétion : des champs électromagnétiques émis à l'extérieur du bateau constitueraient une signature par trop reconnaissable. Mais cette solution présente aussi des inconvénients : l'eau qui propulse le bateau, en circulant dans le canal, subit un frottement supplémentaire dû à la surface mouillée plus importante (celle du canal, plus celle de la coque extérieure). Le rendement hydrodynamique est donc moins bon pour un écoulement en canal que pour un écoulement externe.

Cela dit, que ce soit pour des considérations de rendement, de simplicité d'utilisation ou de discrétion, c'est la propulsion à conduction et en canal qu'ont adoptée les Japonais pour leur vedette civile, de même que les Américains pour leur étude de sous-marin militaire. Les Japonais de l'universuté de Kobe ont également conçu un projet détaillé du brise-glace à propulsion MHD, à conduction mais avec écoulement externe (***dessin ci-contre***). Cela ne signifie pas que la propulsion à induction soit définitivement rejetée, loin de là, car l'absence d'électrode la rend très intéressante — mais à plus long terme, après des recherches approfondies.

Aujourd'hui, les Japonais de Kobe en sont déjà à la seconde maquette de leur vedette (***voir photo p. 87***) dotée de deux propulseurs MHD divisés chacun en 6 secteurs ayant la configuration simple exposée au début de cet article : ici, chaque secteur est constitué d'un canal cylindique de 2,50 m de long et 25 cm de diamètre, avec deux électrodes planes parallèles, si bien que le champ électrique est perpendiculaire au champ magnétique et l'eau s'écoule le long du bateau. Le choix de plusieurs secteurs permet d'optimiser l'efficacité du champ magnétique, car la disposition en anneau réduit les pertes du champ magnéti-

LA MAGNÉTO-HYDRO-DYNAMIQUE EST PARTOUT !

La propulsion des navires et des sous-marins n'est pas la seule application de la MHD ! Le regain d'intérêt pour la propulsion est très récent,mais la MHD fait l'objet de recherches depuis des décennies. Par définition, la magnéto-hydro-dynamique est l'étude des mouvements des fluides conducteurs de l'électricité en présence de champs magnétiques. Bref, c'est un domaine de la physique où se mêlent l'électromagnétisme et la dynamique des fluides, et qui cumule les difficultés de ces deux disciplines.

A dire vrai, la MHD évoque souvent pour les scientifiques un échec technologique. Cette réputation injuste remonte aux années 1960 : les premières recherches d'application de la MHD ont porté sur des convertisseurs d'énergie thermique en électricité, utilisant comme fluide des gaz chauds. Alors que dans les centrales thermiques ou nucléaires, l'énergie mécanique est convertie en électricité grâce à un ensemble turbine-alternateur, un convertisseur MHD transforme directement en courant électrique le mouvement d'un gaz chaud conducteur dans un champ magnétique (les convertisseurs MHD sont une application de la loi d'induction de Faraday — voir texte).

En théorie, ce procédé de conversion était censé améliorer le rendement des centrales thermiques de 40 à 60 %, et un grand effort de recherche et développement lui fut consacré dans plusieurs pays, dont la France. Mais les expériences se heurtèrent à des problèmes techniques énormes dus, entre autres, à la corrosion des conduits et des électrodes en contact avec les gaz à haute température. On a obtenu des résultats plus prometteurs en utilisant comme fluide non plus un gaz, mais un métal fondu. Cependant, les grandes difficultés de la filière gaz avaient discrédité la MHD. En France, les travaux sur la conversion MHD des métaux liquides se sont pourtant développés à petite échelle dans les années 1980, couplés à la recherche spatiale, avec l'étude de générateurs d'électricité MHD pour nos stations orbitales. Mais ces recherches à long terme ont été interrompues lorsque fut prise la décision de construire l'avion spatial Hermès.

Aujourd'hui, la MHD s'applique dans l'industrie nucléaire, où elle est utilisée au pompage du sodium liquide dans les circuits secondaires de refroidissement des surgénérateurs, et dans différents domaines de la métallurgie : le laboratoire de Grenoble qui développe ces applications, le Madylam, contribue aussi à la recherche sur la propulsion.

Dans les expériences sur la fusion thermonucléaire contrôlée, qui se poursuivent depuis des années, les difficultés rencontrées pour la stabilisation et le confinement du plasma relèvent aussi d'un problème de MHD particulièrement ardu.

Dans la nature, étoiles et planètes subissent de gigantesques phénomènes magnéto-hydro-dynamiques lorsque les plasmas chauds ou des métaux liquides rencontrent de puissants champs magnétiques : le champ magnétique terrestre et les champs magnétiques stellaires, la vitesse de rotation des étoiles, les éruptions et vents solaires, les magnétosphères, les rayons cosmiques, relèvent aussi de la MHD.

que (4 teslas au centre des canaux). En revanche cette économie d'énergie électromagnétique se fait au détriment du rendement hydrodynamique, puisque les 6 canaux multiplient d'autant les pertes par frottement sur les parois.

Ce bateau a été construit en vue de démontrer la faisabilité de la propulsion MHD pour des navires de surface, mais des performances bien supérieures seront nécessaires pour le rendre économiquement intéressant.

Les Américains n'en sont pas encore au stade de la maquette pour leur sous-marin. Durant plusieurs années, ils ont mené des études théoriques sur des propulseurs du type à conduction avec écoulement en canal, mais avec diverses configurations géométriques. La plus simple ressemble à celle qu'on vient de décrire pour la vedette japonaise. Dans les autres, les électrodes, les champs et les écoulements adoptent des configurations beaucoup plus compliquées. Pour chaque type de propulseur, les rendements et les performances ont été calculés.

A l'heure actuelle, les Américains sont sur le point de commencer l'expérimentation de propulseurs en grandeur réelle, dans un tunnel en boucle. Celui-ci, long de 15 m, est conçu pour reproduire autant que possible les caractéristiques d'un sous-marin réel, mais le propulseur est immobile, et c'est l'eau qui circule.

La propulsion magnéto-hydrodynamique n'est rentable qu'à grande échelle : elle ne servira jamais à faire avancer des jouets, ou même de petits bateaux ! En effet le rapport des forces électromagnétiques propulsives aux forces visqueuses, qui freinent, est proportionnel au produit du champ magnétique par le diamètre du canal d'écoulement. Pour que ce rapport soit élevé, il faut donc un champ magnétique important et un propulseur de grande taille. Les gros sous-marins lanceurs d'engins mesurent près de 200 m de long pour un diamètre d'une quinzaine de mètres, et doivent atteindre des vitesses de pointe bien supérieure à 20 nœuds. Un propulseur MHD adapté à un tel bâtiment aurait un canal d'une dizaine de mètres de long, pour un diamètre de l'ordre du mètre, et développerait une puissance propulsive de plusieurs dizaines de mégawatts !

Mais on en n'est pas encore là : des problèmes techniques restent à surmonter, et d'abord dans la construction des aimants supraconducteurs, pièces maîtresses du propulseur.

Ces aimants doivent non seulement être puissants, mais aussi suffisament légers. De plus, comme tous les matériaux supraconducteurs, ils doivent être maintenus à une température très basse, proche du zéro absolu, ce qui nécessite un circuit de refroidissement à l'hélium liquide (−269° C) et une isolation thermique parfaite. Mais, tout en étant isolés, les aimants doivent aussi rester très solidement liés au navire, ce qui n'est pas sans soulever des difficultés.

Quant aux électrodes, elles devront résister à la corrosion du milieu marin lorsqu'elles fonctionneront, mais également à l'arrêt — or un sous-marin peut demeurer très longtemps tapi immobile au fond de l'océan...

Par ailleurs, la salinité et la température de l'eau changent beaucoup d'une mer à l'autre et selon la profondeur, et la conductivité de l'eau peut varier d'un facteur deux : cela aussi doit être pris en compte dans la conception. On songe même à rendre le bâtiment utilisable en eau douce pour de courtes durées, en y versant une solution saline pour la rendre conductrice (par exemple pour une remontée d'estuaire) !

Mais les plus grandes difficultés se posent lorsque l'on veut rendre le sous-marin réellement silencieux. On l'a dit, l'absence de pièce mobile telle qu'une hélice est un atout majeur puisqu'on évite le bruit pulsé trop reconnaissable des sous-marins "classiques" ; mais la propulsion MHD émet ses propres "bruits" : en particulier les bulles. En effet le champ électrique qu'on établit entre les deux électrodes produit une électrolyse de l'eau, autrement dit une décomposition chimique qui se manifeste par des bulles d'hydrogène, d'oxygène et de chlore (à cause du sel).

La MHD tiendra-t-elle ses promesses ? Cette vedette japonaise de démonstration devrait permettre un début de réponse à cette question. Longue de 22 m et large de 10 m pour un poids total de 150 tonnes, elle est dotée de propulseurs MHD sous-marins "à conduction et à écoulement interne" (**voir p. 80**) regroupant 6 canaux de 0,25 m de diamètre dotés chacun d'une paire d'électrodes de 2,5 m de long. La poussée annoncée est de 8 000 newtons, et la vitesse maximale de 10 nœuds (18 km/h) avec 10 passagers à bord. Ces performances sont insuffisantes pour un bateau commercial, mais la propulsion MHD en autorise potentiellement de bien meilleures.

On a ainsi calculé qu'un propulseur de sous-marin dégagerait au maximum 1 litre de gaz pour 10 000 litres d'eau passant dans le propulseur, ce qui ne représente qu'une bulle de 2 millimètres de diamètre pour 45 cm³ d'eau. Mais ces bulles, si elles sont placées dans des zones à variation de pression, peuvent se mettre à osciller en émettant un bruit caractéristique ! Aussi doit-on se livrer à la chasse aux bulles dès le stade de la conception du propulseur, en cherchant des électrodes ou des procédés

(suite du texte page 161)

LES TROIS RENDEMENTS DE LA NOUVELLE PROPULSION

La théorie de la propulsion MHD est bien comprise et les calculs assez fiables : pour calculer le rendement d'un propulseur MHD en fonction de tous ses paramètres, on inclut les équations de l'électromagnétisme, celles de la mécanique des fluides et celles de la dynamique, et on tient compte de tous les couplages possibles... Mais, fort heureusement, le problème peut être résolu moyennant quelques simplifications : ainsi, le champ magnétique n'est pas influencé par la vitesse du navire, si bien que la configuration dans l'espace de ce champ reste constante.

Le rendement global d'un bateau a propulsion MHD (c'est-à-dire le rapport entre la puissance de propulsion du bâteau et la puissance électrique que l'on dépense) se subdivise en trois rendements partiels :

- **Rendement électrique** : il prend en compte les pertes électriques par échauffement (effet Joule) dû à la résistance de l'eau de mer et des différents composants du circuit, et par électrolyse... Le rendement électrique est à peu de chose près proportionnel à la conductivité du liquide et au carré de l'intensité du champ magnétique ; c'est pourquoi le recours à des aimants supraconducteurs compense la très faible conductivité de l'eau de mer.
- **Rendement propulsif** : la vitesse de l'eau dans le canal sous l'effet de la force propulsive est généralement plus grande que la vitesse de déplacement du bateau. La différence correspond à des pertes "par glissement" qui ne contribuent pas à la propulsion.
- **Rendement hydrodynamique** : il prend en compte les "pertes visqueuses", autrement dit, les pertes par frottement de l'eau avec les parois du bateau.

Le rendement d'un propulseur dépend de ses caractéristiques physiques (configuration géométrique, dimensions, intensité des champs), mais aussi des conditions de fonctionnement : le rendement est maximal pour des conditions données.

Par exemple, on peut améliorer le rendement propulsif en jouant sur la géométrie du canal, mais cela n'avantagera pas nécessairement les autres composantes du rendement. Le rendement propulsif dépend aussi de la vitesse du bateau, qui est bien évidemment variable... Comme la forme de la tuyère, elle, ne peut être changée, elle doit résulter d'un compromis qui dépendra finalement des performances et caractéristiques demandées.