

Etude d'une pompe magnétohydrodynamique

Méconnue du grand public, la technologie magnétohydrodynamique nous a véritablement interpellé par sa capacité à mettre en mouvement des fluides sans aucune partie mobile, de manière non intrusive et silencieuse. Très éloignés des représentations ordinaires de pompes, ces systèmes offrent des possibilités qui nous sont apparues particulièrement innovantes.

Les accélérateurs magnétohydrodynamiques se distinguent parmi les actionneurs propres encore à exploiter. De la propulsion aux circuits de refroidissement, les propriétés de cette technologie ne nécessitant ni pétrole, ni partie mobile, présentent de conséquents avantages de propreté, sécurité, et durabilité dans les domaines relevant des enjeux sociétaux actuels.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- TRIFA Marwane

Positionnement thématique (ETAPE 1)

PHYSIQUE (Mécanique), PHYSIQUE (Physique Ondulatoire), PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire).

Mots-clés (ETAPE 1)

Mots-Clés (en français)	Mots-Clés (en anglais)
<i>Magnétohydrodynamique</i>	<i>Magneto-Hydrodynamics</i>
<i>Mécanique des fluides</i>	<i>Fluid mechanics</i>
<i>Electromagnétisme</i>	<i>Electromagnetism</i>
<i>Forces de Laplace</i>	<i>Laplace forces</i>
<i>Pompe électromagnétique</i>	<i>Electromagnetic pump</i>

Bibliographie commentée

Depuis les années 1960, la MHD fait l'objet de nombreuses études et expérimentations, visant à mieux comprendre son fonctionnement et à optimiser différents types d'accélérateurs MHD aux applications industrielles variées.

Le principe physique de la MHD se fonde sur l'action d'un champ électrique et magnétique dans un fluide ionique, dont résulte une force de Laplace appliquée au dit fluide [3]. De fait, le champ électrique met en mouvement de sens opposé les charges positives et négatives du fluide, induisant une densité de courant, sans déplacement global du fluide. Ces charges sont ensuite déviées dans la même direction et sens par le champ magnétique. Les forces de Laplace résultant alors du produit de la densité de courant et du champ magnétique, permet la mise en mouvement du fluide [1][2]. L'étude de la MHD est donc celle de couplages plus ou moins poussés entre la mécanique des fluides

et l'électromagnétisme[3][4].

Les géométries des accélérateurs MHD sont diverses, selon l'application industrielle envisagée pour ce mode de propulsion de fluide. Ils se présentent souvent sous la forme d'une tuyère à écoulement interne [3][6], bien que d'autres alternatives à écoulement externe soient envisageables. Dans l'optique d'une propulsion marine, la poussée imposée au fluide, par exemple dans une tuyère, permet de propulser un bateau ou sous-marin par conservation de la quantité de mouvement. De fait, un bateau japonais à propulsion MHD est né dans les années 90, le Yamato 1 [7], et bien que le rendement de tels propulseurs reste faible, l'existence de ce bateau illustre les possibilités offertes par la MHD. Elle est en effet déjà employée dans le domaine spatial, l'éjection de plasma à très grande vitesse permettant également la propulsion.

Cependant la propulsion n'est pas son seul domaine d'application : elle permet notamment de pomper des fluides conducteurs sans s'encombrer de parties mécaniques [2], ce qui présente une dimension sécuritaire très avantageuse pour l'entraînement de métaux liquides, comme dans les systèmes de refroidissement de centrale nucléaire. Ce fut notamment le cas dans la centrale Superphénix, un circuit magnétohydrodynamique y permettant la circulation de sodium, le liquide caloporteur. De surcroît, la résistance aux hautes températures des pompes à induction, dites ALIP, et leur faible usure en font un choix technologique particulièrement durable dans l'industrie[9]. Des micro-pompes MHD sont également utilisées dans le domaine biomédical pour la manipulation de fluides dans des dispositifs microscopiques. L'étude de micro-réacteurs en résonance magnétique (RMN) est notamment rendue possible par l'utilisation de tels systèmes [8]. Ces domaines d'applications tournés vers les enjeux sociétaux de demain, justifient ainsi l'intérêt porté à cette technologie.

Néanmoins, la physique des accélérateurs MHD étant particulièrement complexe, la compréhension et l'étude des écoulements dans de telles tuyères est primordiale pour envisager efficacement ces applications industrielles[9]. La recherche étudie ainsi le couplage des équations d'électromagnétisme et de mécanique des fluides, auxquelles s'ajoutent des contraintes physico-chimiques plus ou moins négligeables [5], liées à la corrosion des électrodes utilisées. Dès lors, la géométrie et matériaux de la tuyère, le volume et la nature du fluide mis en mouvement, l'amplitude des champs électrique et magnétique, ou encore la conductivité du fluide sont autant de paramètres à exploiter pour déterminer un modèle d'accélérateur MHD au contrôle et rendement suffisants pour être viable industriellement [2][6].

Dans le cadre de la MHD en eau de mer, dite résistive, le couplage électromagnétique est faible : seul le champ magnétique diffusé par les aimants utilisés est considéré, celui induit par les charges en mouvement dans le fluide étant négligeable du fait de la faible conductivité de l'eau. L'étude d'une pompe MHD en eau salée, présentant ainsi de nombreuses simplifications théoriques comme matérielles, a donc été retenue. L'élaboration de cette pompe permettra d'illustrer la viabilité d'une telle technologie en comparaison aux solutions actuellement retenues, en terme de contrôle d'écoulement et de rendement.

Problématique retenue

On retiendra pour nos TIPE la problématique suivante : Quels sont les paramètres influant sur l'écoulement d'eau salée dans une pompe magnétohydrodynamique ?

Objectifs du TIPE

-Construire une maquette de pompe magnétohydrodynamique

-Etablir par la mesure les champs électriques et magnétiques dans la tuyère

-Avec le module PIVLab de Matlab, effectuer un suivi vélocimétrique de traceurs dans le fluide en écoulement lors du fonctionnement de la pompe

-Etablir un modèle de comportement de la pompe à partir des profils de vitesse ainsi mesurés

-Confronter ce modèle à une simulation effectuée à l'aide du solveur ANSYS Fluent

-Valider la représentativité du modèle et conclure quant aux paramètres influant l'écoulement étudié.

Références bibliographiques (ETAPE 1)

- [1] L.P.AOKI, M.G.MAUNSELL, H.E.SCHULZ : A magnetohydrodynamic study of behavior in an electrolyte fluid using numerical and experimental solutions : 2012, Université de Sao Paulo, DOI : 10.5380/reterm.v11i1-2.62001, URL : https://www.researchgate.net/publication/272167957_A_magnetohydrodynamic_study_of_behavior_in_an_electrolyte_fluid_using_numerical_and_experimental_solutions
- [2] O.M. AL-HABAHBEH, M. AL-SAQQA, M. SAFI, T. ABO KHATER : Review of magnetohydrodynamic pump applications : 2016 Faculty of Engineering, Alexandria University, DOI : 10.1016/j.aej.2016.03.001
- [3] J.P.THIBAUT : Propulsion MagnetoHydroDynamique (MHD) en eau de mer : La Revue 3EI n°94, Octobre 2018
- [4] C.TROPHIME : Modélisation numérique du couplage MagnétoHydroDynamique (M.H.D.) fort - Application à la propulsion M.H.D. navale. Electromagnétisme. : INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE de GRENOBLE, 1995. Français. fftel-01340645f
- [5] P. BOISSONNEAU : Magnetohydrodynamics propulsion: a global approach of an inner DC thruster : 1999, DOI : 10.1016/s0196-8904(99)00072-2
- [6] D.CEBRON, S.VIROULET, J.VIDAL, J-P.MASSON, P.VIROULET : Experimental and theoretical study of magnetohydrodynamic ship models : 2017, PLoS ONE 12(6): e0178599. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178599>
- [7] Y.SASAKAWA, S.TAKEZAWA, Y.SUGAWARA, Y.KYOTANI : The superconducting MHD-propelled ship Yamato-1 : 1995, NASA. Johnson Space Center, Proceedings of the 4th International Conference and Exhibition: World Congress on Superconductivity, Volume 1, URL :

<https://ntrs.nasa.gov/citations/19960000249>

[8] A.HOMSY : Design, Microfabrication, and Characterization of MHD Pumps and their Applications in NMR Environments : 2006, Université de Neuchâtel, URL :

https://www.researchgate.net/publication/33683303_Design_Microfabrication_and_Characterization_of_MHD_Pumps_and_their_Applications_in_NMR_Environments

[9] J.E. NIEMINEN, C.O.MAIDANA : First Studies for the Development of Computational Tools for the Design of Liquid Metal Electromagnetic Pumps : Nuclear Engineering and Technology (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2016.07.002>, URL :

https://www.researchgate.net/publication/305750682_First_Studies_for_the_Development_of_Computational_Tools_for_the_Design_of_Liquid_Metal_Electromagnetic_Pumps

DOT

[1] Début Mars 2020 : Découverte de la MHD et des enjeux de contrôle de ces écoulements au travers de la lecture des références [2] et [3]. Réflexion sur le protocole et le choix des matériaux nécessaire à la construction d'une maquette de pompe MHD.

[2] Septembre 2020 : Construction d'un premier circuit hydraulique simplifié pour tester la visibilité des phénomènes MHD en eau salée. Impression en 3D de cages pour maintenir et sécuriser les aimants en néodyme.

[3] Début Novembre 2020 : Rétrécissement du circuit et ajouts de virages. Premières mesures de tension et de sa chute importante aux bords des électrodes. Première modélisation théorique par un écoulement de Poiseuille suite à la lecture de [9], mais infructueuse car simplifiant trop le problème.

[4] Fin Novembre 2020 : Etude des réactions électrochimiques responsables des chutes de tension, et de l'influence de la conductivité sur les tensions ainsi mesurées dans le fluide.

[5] Décembre 2020 : Suivi vélocimétrique et test de traceurs dans le fluide. Etablissement des profils de vitesse de l'écoulement avec le module PIVLab de Matlab. Deuxième modélisation théorique sur Python par discrétisation des équations partielles régissant l'écoulement vues dans [1], aux résultats incohérents car l'influence géométrique des virages n'était pas prise en compte.

[6] Janvier 2021 : Mesures supplémentaires de vitesses pour différentes tensions et conductivités. Découverte du solveur multiphysique ANSYS Fluent capable de simuler l'écoulement MHD, suite aux échanges avec le Laboratoire Ampère de l'Ecole Centrale de Lyon. Prise en main personnelle du logiciel.

[7] Février 2021 : Simulation concluante de l'écoulement. Venue au Laboratoire Ampère pour discuter de la pertinence de la modélisation. Comparaison du modèle de comportement expérimental aux résultats numériques.

[8] Mars 2021 : Production de la présentation finale.