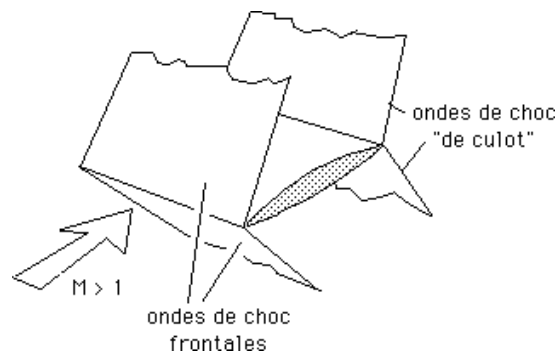


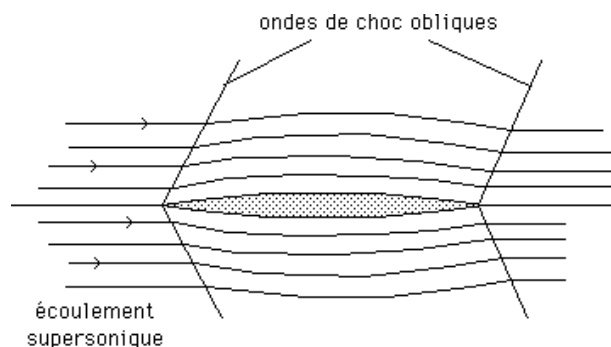
Cent Microsecondes pour changer notre vision de l'Univers

Le vol supersonique sans "bang".

Imaginons un profil lenticulaire immergé dans un courant gazeux supersonique. Des ondes de choc (attachées) vont se créer, des ondes planes. Deux de ces ondes partiront du bord d'attaque et deux autres se localiseront au voisinage du bord de fuite. En perspective :

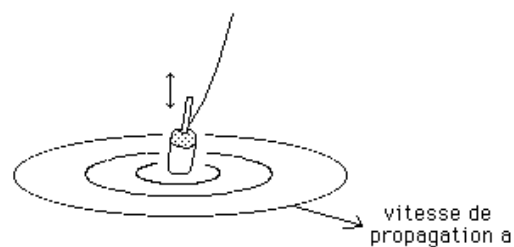


Vue de profil :



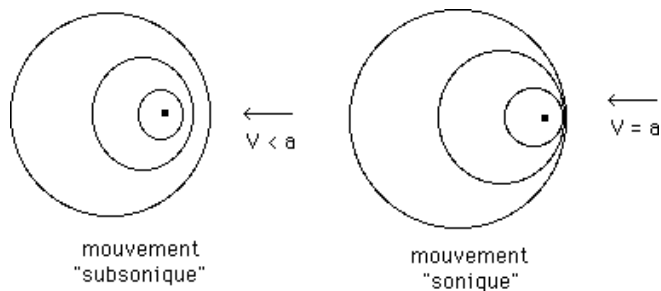
Analogie hydraulique.

Il existe une façon très simple de comprendre, par analogie, le mécanisme de formation des ondes de choc. Dans un écoulement liquide à surface libre, la propagation des ondes de surface est équivalente à celle du son dans un gaz. Prenons par exemple une masse fluide au repos. Un pêcheur à la ligne surveille son bouchon et tire légèrement sur son fil. Ce flotteur va osciller et entraîner le départ d'ondes circulaires, qui vont se propager à une vitesse de l'ordre de quelques centimètres par seconde :



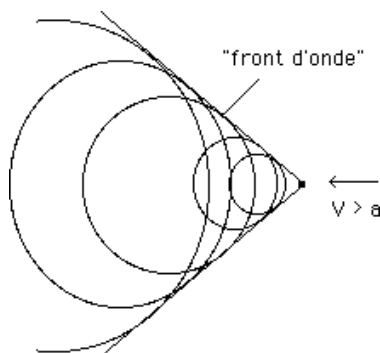
Dans votre baignoire, vous arriverez au même résultat en déplaçant de bas en haut un cure-dent, ou une allumette.

Si le fluide est en mouvement (vue du dessus), ces ondes circulaires, qui n'ont pas été émises au même moment, vont se décentrer :



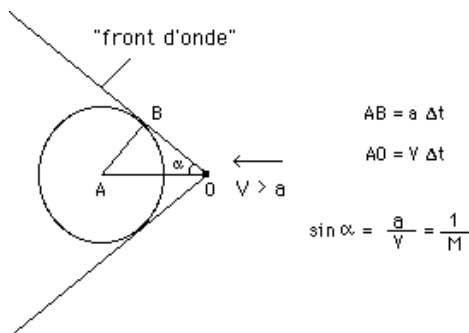
L'image de droite correspond à un mouvement "sonique". Les ondes sonores sont l'image d'une perturbation de pression dans un gaz. Ces expériences d'analogie hydraulique, jadis enseignée à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique (Supaéro), dont je suis issu, faisaient l'objet de travaux pratiques.

Que se passe-t-il quand le fluide se déplace à une vitesse supérieure à la vitesse de propagation des ondes de surface ? On obtient le schéma ci-après :



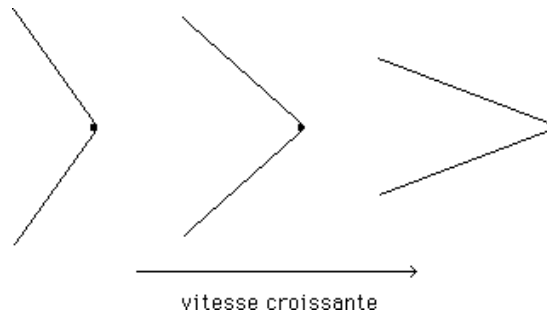
Les perturbations émises par l'objet vont avoir tendance à s'accumuler selon une deux lignes issues de l'objet.

Tout le monde n'a pas un cours d'eau à portée de la main. Aussi, au lieu de considérer un objet immobile placé dans un courant liquide on peut tout aussi bien déplacer celui-ci et obtenir le même résultat. Vous ferez de même dans l'eau de votre baignoire, en déplaçant votre allumette, ou la pointe de votre cure-dent en bois, plus pointue. Se formeront alors ce qu'on appelle des "ondes de Mach". Si on connaît la vitesse a de déplacement des ondes de surface et la vitesse V de déplacement de l'objet, il est facile de calculer l'angle de Mach α .

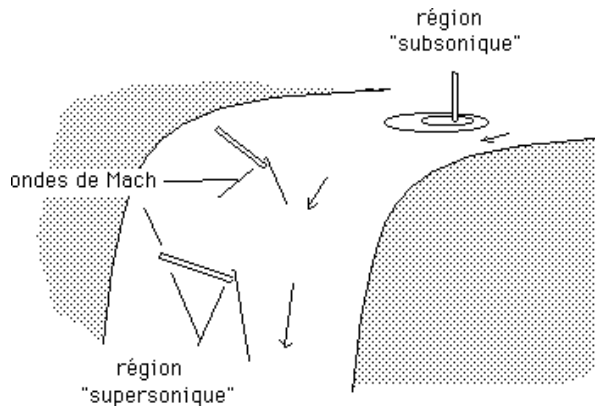


Inversement, si on mesure cet angle α on peut calculer la vitesse V du fluide.

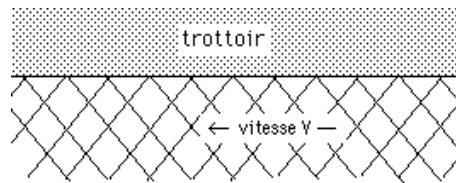
Ces ondes de Mach seront d'autant lus couchées que cette vitesse V est élevée.



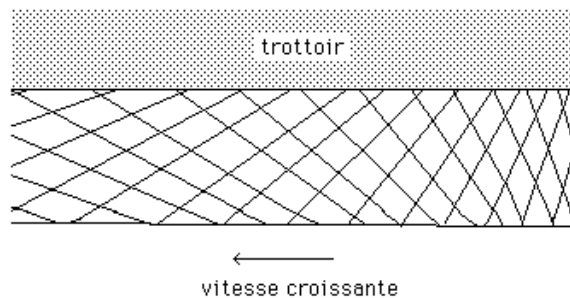
Un déversoir est un excellent laboratoire d'hydraulique où la vitesse V est variable, croissante vers l'aval. Si on place son allumette dans l'eau, on observera ceci :



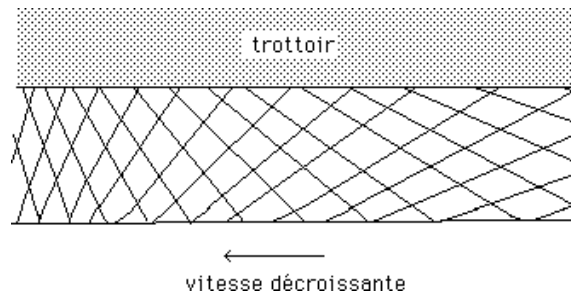
Un autre "laboratoire d'hydraulique" est constitué par un caniveau. Les aspérités présentes à la surface verticale du trottoir, en contact avec l'eau en écoulement, entraînent le départ d'ondes de Mach, de même que celles qui bordent l'autre extrémité du canal liquide. La surface de l'eau est ainsi striée par ce réseau d'onde, qui indiquent à la fois la direction et la vitesse de l'écoulement. Le fluide s'écoule selon la bissectrice intérieure des ondes de Mach. SI l'écoulement, dans le caniveau, s'effectue à vitesse constante, la surface liquide se trouve striée d'ondelettes, d'ondes de Mach, formant des "hachures parallèles" :



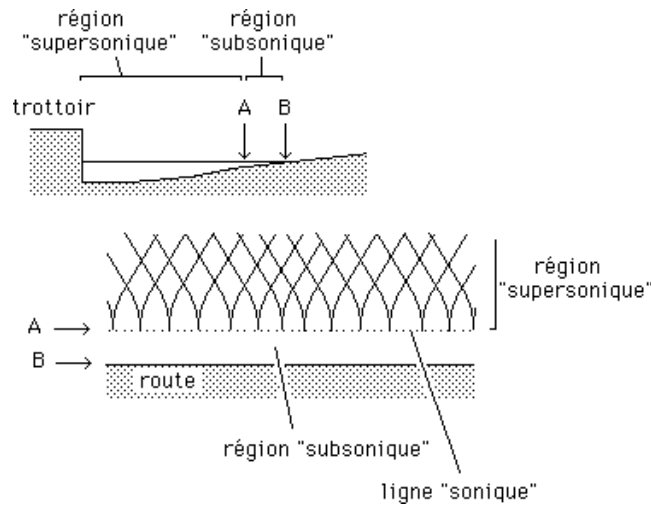
Si la vitesse de l'eau croît, vers l'aval, parce que la déclivité croît, les ondes vont se coucher :



Phénomène inverse s'il y a ralentissement du fluide, parce que la pente diminue :



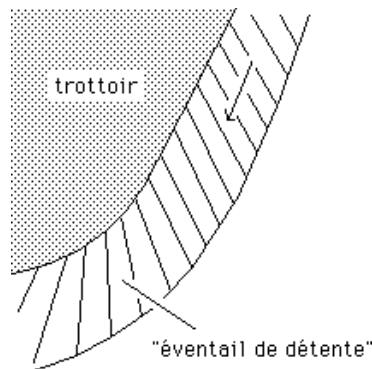
Ce ralentissement, dans un caniveau, peut être dû au frottement de l'eau sur le sol, quand la profondeur devient assez faible. Si vous regardez de près un écoulement, vous observerez ceci :



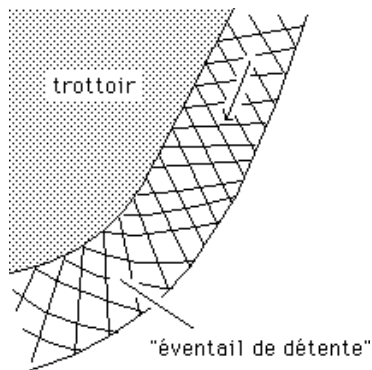
Les ondes de Mach se redressent au fur et à mesure qu'on approche du "bord de l'eau", le frottement sur le sol ralentissant l'écoulement. Quand les ondes deviennent perpendiculaires à l'écoulement, la vitesse s'est abaissée jusqu'à celle de la propagation des ondes de surface. L'écoulement est devenu "subsonique". Dans cette région les ondes de mach disparaissent. Si vous plongez une allumette ou une épingle à cheveux dans l'écoulement, vous pourrez le vérifier.

Il y a ainsi beaucoup de choses à apprendre de l'observation des caniveaux.

Si le caniveau tourne, on aura deux cas de figure. Voici le premier :



En prenant ce virage, l'eau va s'accélérer. On obtient ce qu'on appelle en mécanique des fluides un "éventail de détente". Le fait que les caractéristiques se couchent signalent cette accélération. Corrélativement, la hauteur l'eau, équivalant à la pression dans un gaz, va baisser. On peut compléter ce dessin en faisant figurer la deuxième famille d'ondes de Mach :

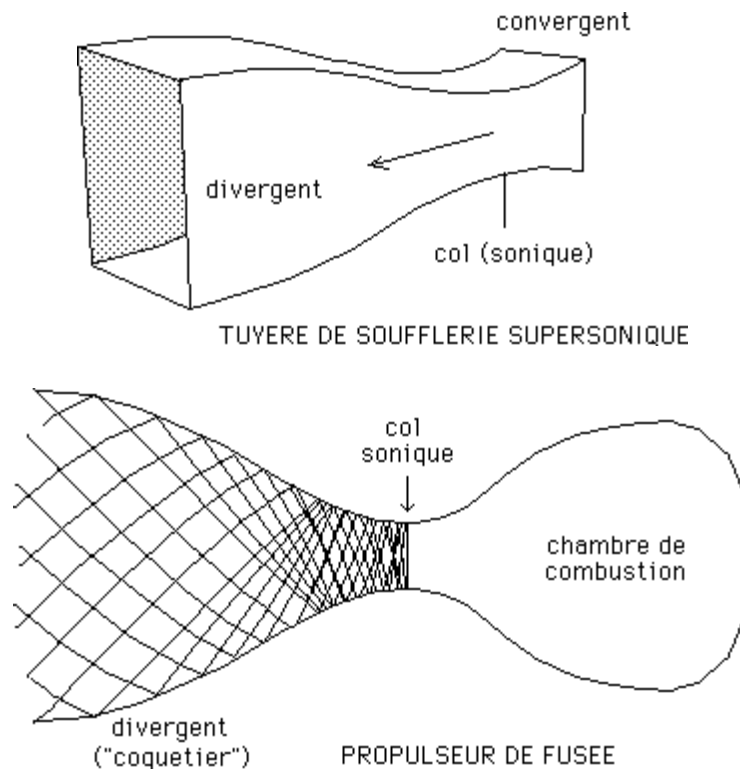


Pour en savoir plus sur la MHD, se référer à la bande dessinée que j'ai publiée en 1983 aux Editions Belin, 8 rue Férou, Paris 75006. Vous pouvez avoir également la version-cd de cet album sur le "Cd-Lanturlu". Accès au bon de commande en cliquant sur l'icône en bas de page.

The book cover features the title "Les aventures d'ANSELME LANTURLU" in yellow and white on a blue background, with a cartoon character. Below is the main title "LE MUR DU SILENCE" in large black letters, followed by "par Jean-Pierre Petit" in red. The cover includes a cartoon of a bird with a speech bubble, a window icon, and a CD icon. The publisher's logo "BELIN" is visible. At the bottom, there are navigation arrows and the text "Sommaire" and "page d'accueil".

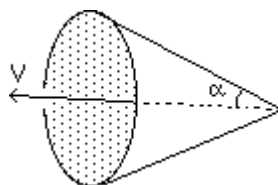
Compteur initialisé le 1° juin 2000 22613

Dans le divergent d'une tuyère supersonique (par exemple bidimensionnelle) le gaz est accéléré :



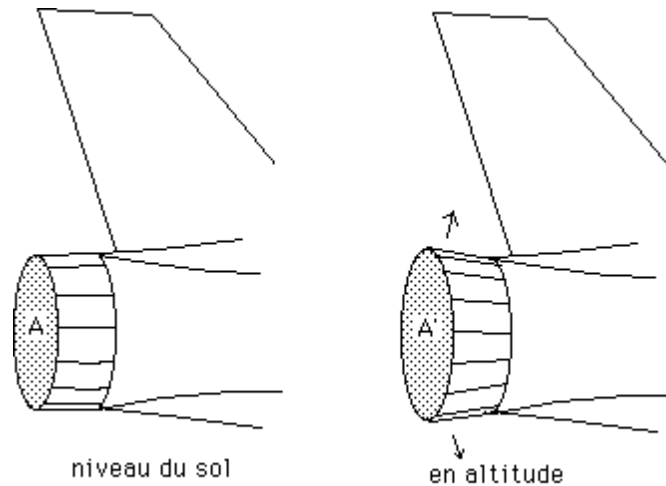
Ci-dessus les ondes de Mach dans le divergent d'un propulseur de fusée. Ces ondes semblent se réfléchir sur la paroi. Ceci est lié à une condition de compatibilité concernant l'écoulement à la paroi : la bissectrice intérieure des deux ondes de Mach, ou caractéristiques, représente la direction de l'écoulement, qui doit être tangente à la paroi.

La vitesse du son est atteinte au col. En amont, le gaz est à vitesse subsonique. Il est accéléré dans le divergent et la pression baisse. On moteur fusée fonctionnera avec un rendement d'autant meilleur que la vitesse d'éjection sera élevée. Mais il y a une contre-partie : il faut également que les gaz soient éjectés à une pression égale à la pression ambiante, à l'altitude où ces propulseurs fonctionnent. On appelle ceci "l'adaptation de la tuyère". Si le divergent est trop prononcé, le gaz sera éjecté à une pression inférieure à la pression ambiante (atmosphérique) et apparaîtront des ondes de choc de recompression. Les ondes de Mach s'appellent aussi les "caractéristiques" de l'écoulement. Dans un moteur fusée, à symétrie de révolution, ces ondes de Mach sont cônes. Ceci signifie qu'en tout point de la tuyère, si on disposait un obstacle fixe, de la taille d'un grain de sable, il engendrerai une onde de Mach de forme cône.



Le vecteur vitesse correspondrait alors au demi-angle au sommet du cône. Plus le nombre de Mach serait élevé et plus ce cône de Mach serait pointu.

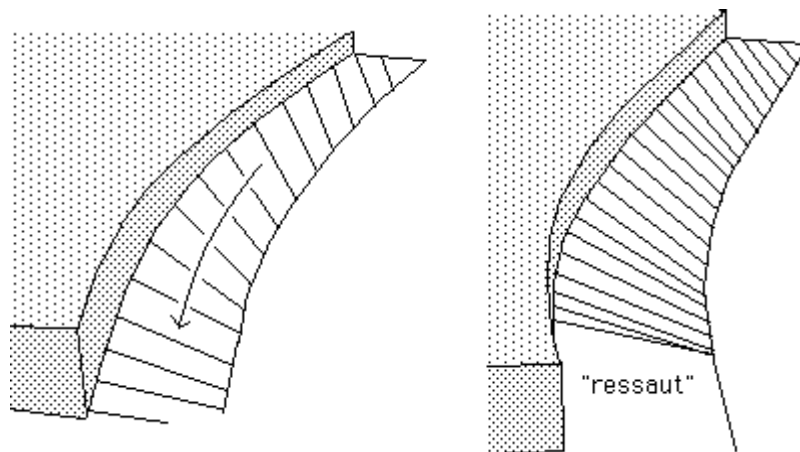
Les moteur à réaction des avions sont équipés de tuyère à section variable, dont le divergent s'ouvre au fur et à mesure que l'altitude s'accroît et que la pression ambiante baisse.



La section de sorte A' est supérieur à A

Les divergents des tuyères des moteurs à réaction sont munies de "pétales" qui s'ouvrent à l'aide de vérins hydrauliques, au fur et à mesure que la pression diminue, ceci étant directement commandé par une mesure barométrique. La vitesse d'éjection étant plus élevée, ces moteurs ont un meilleur rendement en haute altitude.

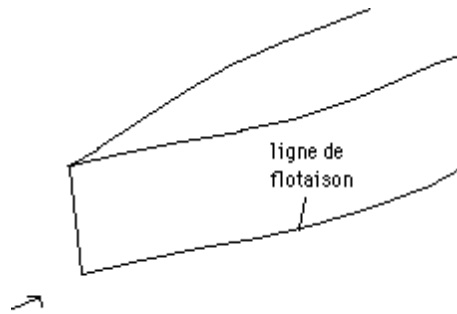
Mais revenons à notre caniveau. Que se passe-t-il lorsque le virage se présente comme ceci :



A gauche le "convergent" n'est pas trop prononcé. Les caractéristiques (ondes de Mach) tendent à se resserrer, mais elles ne se recouper pas (sinon hors de l'écoulement lui-même. Il y a diminution du "nombre de Mach local", de la vitesse et accroissement de la hauteur d'eau (équivalent de la pression dans un gaz).

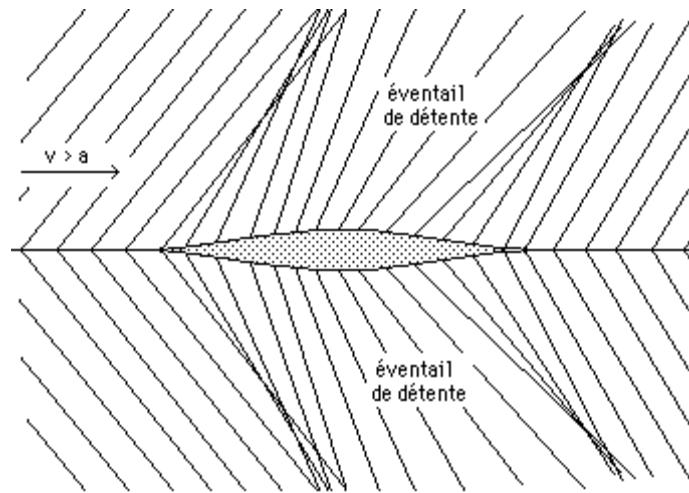
A droite le virage est trop prononcé. Les ondes de Mach tendent à se recouper. Apparaît un "ressaut" liquide, analogue d'une onde de choc dans un gaz. L'écoulement connaît une discontinuité. En aval de l'onde de choc, la vitesse décroît brutalement, à la traversée du ressaut-onde.

L'étrave d'un navire est aussi un "convergent". Si le navire se meut à une vitesse faible, inférieure à la vitesse de propagation des ondes de surface (donc en "subsonique") les ondes de Mach n'existent pas. Corrélativement, le niveau de l'eau reste constant.



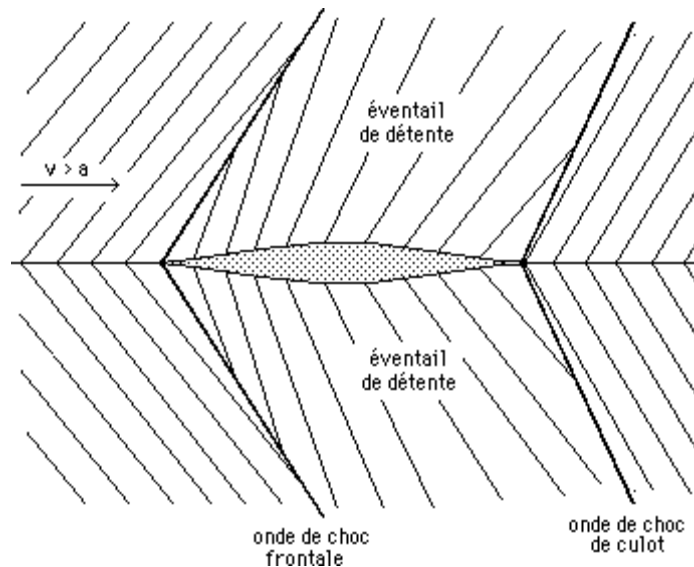
déplacement d'une carène à faible vitesse

A plus forte vitesse ($V > a$) on peut, à l'aide d'un ordinateur, calculer dans un écoulement bidimensionnel la géométrie des ondes de Mach, théoriques. On constate qu'elle se recoupe, tendent à se focaliser :



profil d'aile lenticulaire

Sur le dessin ci-dessus, on a calculé les ondes de Mach théoriques dans un écoulement gazeux, en résolvant les équations de la mécanique des fluides (Navier-Stokes) autour d'un profil d'aile lenticulaire, immergé dans un courant gazeux supersonique, à l'aide d'un ordinateur (1979). On constate que les ondes de Mach tendent à se focaliser. On n'a représenté qu'une famille d'ondes. Ces lieux de focalisation sont "les lieux de naissance" des ondes de choc. En effet ces ondes de Mach sont des ondelettes de compression. L'écoulement ci-dessus n'est donc pas physiquement réaliste. On notera la présence de deux éventails de détente sur les flancs du profil. Deux systèmes d'onde de choc apparaîtront donc :

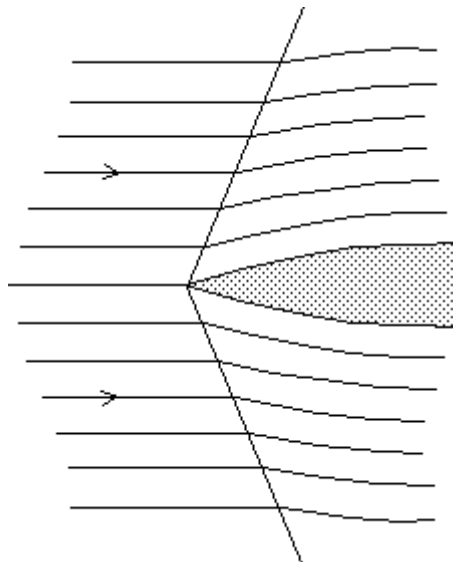


En aval des ondes de choc, le gaz est "choqué", recomprimé, et sa vitesse diminue. Ce phénomène s'effectue sur une épaisseur très faible : quelques centièmes de millimètre.

En aval de l'onde de choc frontale, après avoir été décéléré brutalement le gaz est réaccélééré en continu, selon un "éventail de détente". Il est même "suraccélééré", au point qu'une seconde onde de choc, dite onde de choc de culot, doit s'établir au bord de fuite du profil pour redonner, en aval, la pression ambiante, selon le principe évoqué dans ma bande dessinée "Le Mur du Silence" (voir le "CD-Lanturlu") :

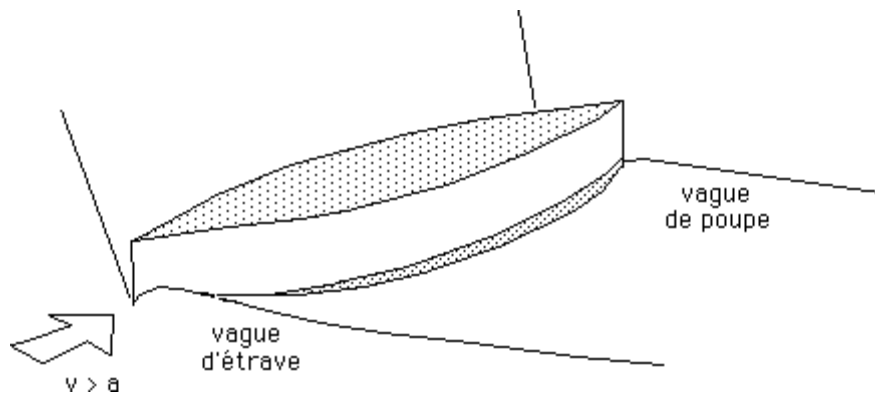
On est prié de laisser le gaz dans l'état où on l'avait trouvé en entrant.

Le vecteur vitesse subit aussi une discontinuité en direction, si le bord d'attaque est un dièdre :



(phénomène analogue au bord de fuite, si celui-ci est également en forme de dièdre).

Voyons ce que cela donne en analogie hydraulique.

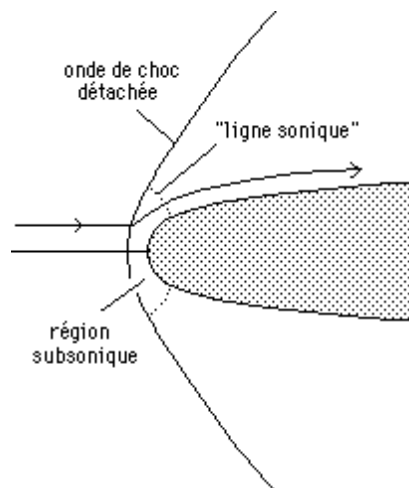


On voit que la suraccélération de l'eau, sur les flanc du navire, fait apparaître la partie de la coque située au repos en dessous de la ligne de flottaison.

Ces systèmes d'ondes (en écoulement gazeux ou dans ces écoulements liquides à surface libre) modifient la distribution de la pression autour du profil ou de la carène. Il en résulte *une traînée d'onde* qui s'ajoute à la traînée de frottement. Lors qu'une croisière supersonique (comme par exemple lors d'un vol du Concorde) la traînée d'onde devient si importante qu'elle excède largement la traînée de frottement. Le vol supersonique est donc grand consommateur d'énergie et les appareils doivent alors être équipés de moteurs puissants. De même, ces vols supersoniques ne peuvent être opérés qu'en altitude, sinon la traînée d'onde deviendrait prohibitive. Un avion à réaction ne peut guère dépasser Mach 1,2 au ras du sol.

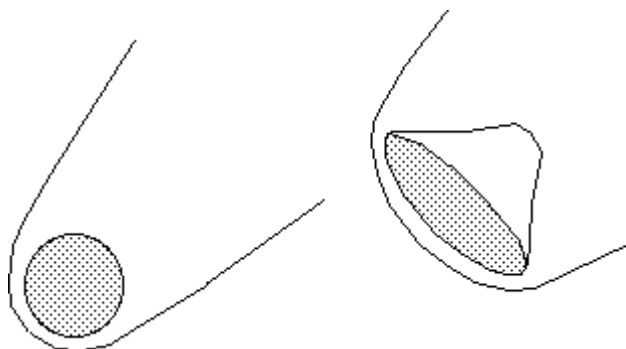
Où va cette énergie ? Elle se dissipe de deux manière. Les engins supersoniques créent un "bang" très intense, qui distribue cette énergie très loin d'eux, de même que l'onde de choc créée par un explosif dissipe cette énergie à grande distance. L'onde de choc provoque aussi un échauffement de l'air, mais la dissipation sous forme sonore est majoritaire.

Nous avons ici présenté un système "d'ondes attachées". Si la partie frontale de l'appareil est émoussée (nez ou bords d'attaque des ailes et de l'empennage, dans le cas de la navette spatiale) l'onde de choc s'établit à une certaine distance de l'objet. La vitesse étant nulle au "point d'arrêt" de l'écoulement, celui-ci devient subsonique en aval de l'onde, puis la réaccélération s'opère.



La recompression du gaz, en aval d'une onde de choc, s'accompagne d'un échauffement. La température au "point d'arrêt" croît très rapidement avec le nombre de Mach (comme son carré). Les avions supersoniques subissent donc, sur leurs parties frontales (nez, bords d'attaque) de fortes contraintes thermiques. Bien que ceci entraîne un accroissement de traînée, les nez ou bord d'attaque doivent ainsi être émoussés à nombre de Mach très élevé (régime hypersonique) pour répartir l'afflux de chaleur. Se souvenir du nez très émoussé d'un engin expérimental comme le X-15.

Dans le cas de corps de rentrée, ça n'est pas gênant puisqu'on recherche au contraire le freinage. Les capsules de rentrée russes sont simplement sphériques. Les capsules américaines présentent un important "bouclier thermique", ou s'opère une ablation partielle du matériau (ils ne sont pas conçus pour servir plus de quelques minutes et doivent être remplacés après chaque rentrée, si la capsule est réutilisée).



Nous nous sommes posés, en 1975, le problème d'une possible évolution supersonique, et même hypersonique (jusqu'à Mach 15) en air dense, au ras des toits. Avec un système conventionnel (propulseur fusée ou moteur à réaction, style stato-réacteur, plus bouclier thermique, ou parties frontales réfrigérées à l'hélium liquide) ces croisières à très haute vitesse sont totalement inenvisageables. Aucun système ne pourrait encaisser un tel afflux de chaleur ni fournir la poussée nécessaire pour vaincre une traînée d'onde aussi importante.

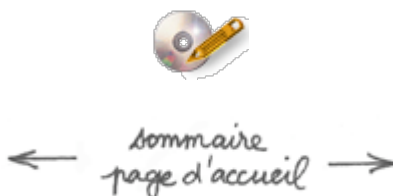
J'ai été le premier à suggérer que la MHD puisse résoudre ce problème (note aux Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de 1975 et article dans Science et Vie en 1976). Il est assez choquant de voir certains groupes de gens reprendre à leur compte cette idée, sans la moindre citation de ce travail de précurseur et lorsqu'un ancien technicien, parfaitement incompetent en la matière, déclare à la télévision, comme tout récemment :

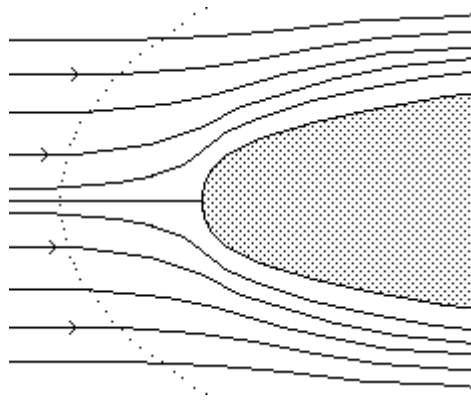
- Nous savons maintenant comment faire évoluer des engins à vitesse supersonique, sans qu'ils ne créent d'onde de choc.

la chose devient proprement ridicule. Mais disons que la chose est assez courante, dans les milieux technico-scientifiques.

Dès 1975 nous nous sommes donc demandé comment les ondes de choc, créatrices à la fois d'un fort afflux de chaleur et d'une forte traînée d'onde pourraient être carrément éliminées. Pour aborder ce problème, il est nécessaire de bien comprendre pourquoi ces ondes de choc se forment.

Lorsqu'un objet pénètre dans une masse gazeuse à vitesse subsonique, ce sont les ondes sonores qui "préviennent" le gaz de sa venue. Lorsqu'un objet, même émoussé, pénètre dans un gaz à vitesse subsonique, ce dernier commence à s'écarter bien avant que l'objet ne soit sur lui :

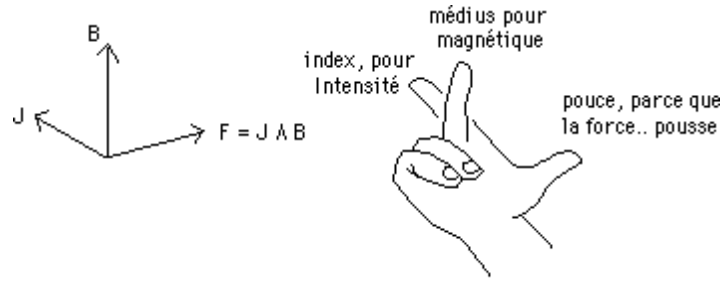




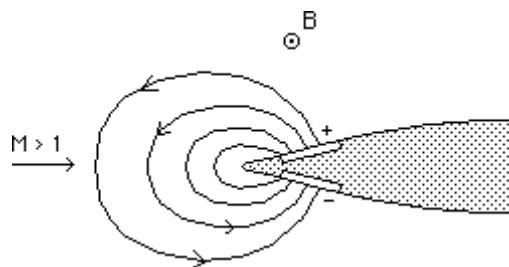
La ligne pointillée est censée représenter la région où le fluide amorce son mouvement d'écartement pour laisser place à l'objet.

En supersonique ces ondes sonores ne peuvent plus "informer le fluide" avant que l'objet ne soit sur lui. Le gaz est alors "pris par surprise" et sa réaction est de former des ondes de choc. L'idée était donc de trouver un moyen d'agir à distance, en amont de l'objet, pour manipuler le gaz en l'incitant à laisser place.

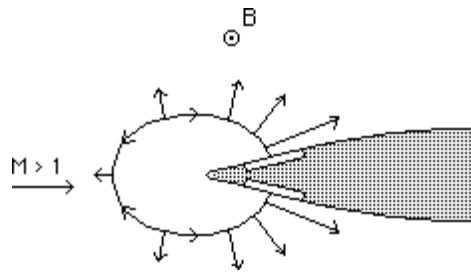
Une première solution se réfère à la pénétration d'un profil d'aile dans de l'air, à vitesse supersonique. On sait que l'effet de l'impact de cet objet sur l'air entraîne son ralentissement brutal. Il paraissait donc logique de faciliter l'écoulement gazeux le long du profil, au voisinage du bord d'attaque, tout en amorçant le ralentissement du gaz en amont. Ceci est possible en appliquant un champ magnétique perpendiculaire au plan de figure en disposant deux électrodes pariétales, comme indiqué. Les lignes du courant électrique s'écoulant dans le gaz sont indiquées. Il en résulte une force de Laplace (de Lorentz, pour les anglo-saxons), qui obéit à la "règle des trois doigts".



LA "REGLE DES TROIS DOIGTS"



Ci-après, l'allure générale du champ des forces électromagnétiques, perpendiculaires au lignes du courant électrique.



On gagne ainsi sur trois plans :

- Face à l'engin, on commence à ralentir le fluide en amont.
- On amorce un mouvement d'écartement du fluide.
- On facilite son écoulement le long de la paroi.

La force électromagnétique par unité de volume est $J B$, où B est l'intensité du champ magnétique, exprimée en teslas (un tesla égale dix mille gauss), et J la densité de courant électrique, en ampères par mètre carré. La force est alors exprimée en newtons par mètre cube.

Une intensité qui serait simplement d'un ampère par centimètres carré (dix mille ampères par mètre carré), conjuguée avec un champ de 10 teslas, donnerait une force de dix tonnes par mètre cube de gaz, suffisante pour imposer à l'écoulement les effets souhaités.

La force est la plus intense au voisinage des électrodes où le courant se concentre et où la densité de courant est la plus élevée.

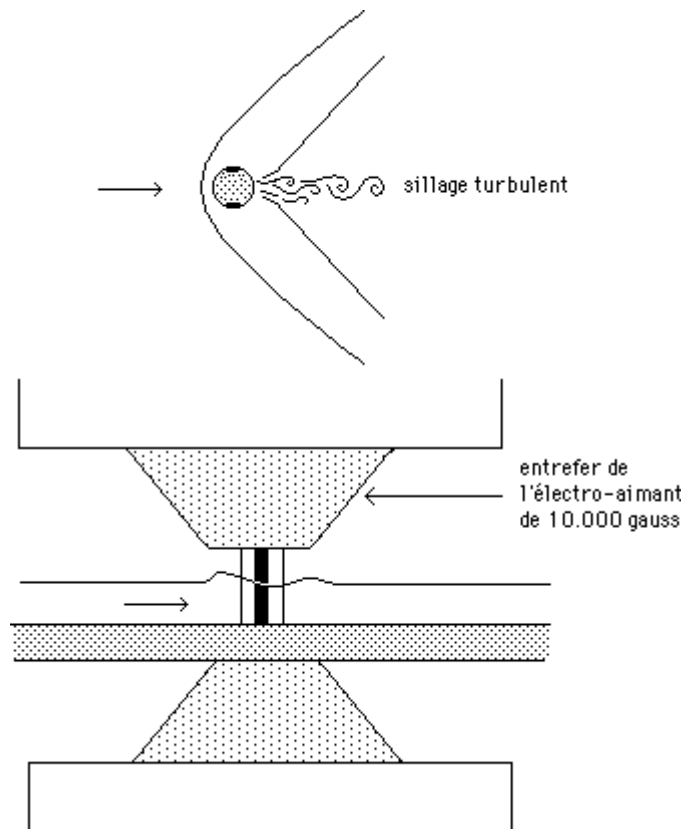
Le problème est évidemment de faire passer un tel courant électrique dans un milieu qui est a priori un excellent isolant, à température normale : l'air. Nous aborderons ce problème par la suite.

Dans un premier temps, en 1976, nous avons opté pour des simulations fondées sur des expériences d'hydraulique. Le fluide était de l'eau acidulée (pour la rendre plus conductrice de l'électricité). Restait à dimensionner l'expérience. Nous disposons d'une installation de champ magnétique donnant un tesla dans quelques centimètres cubes. La vitesse de l'écoulement était de 8 cm par seconde. La densité de l'eau étant de 1000 kg/m³ il est possible de calculer la valeur minimale de J telle que le paramètre d'interaction :

$$\eta = \frac{J B L}{\frac{1}{2} \rho v^2} \gg 1$$

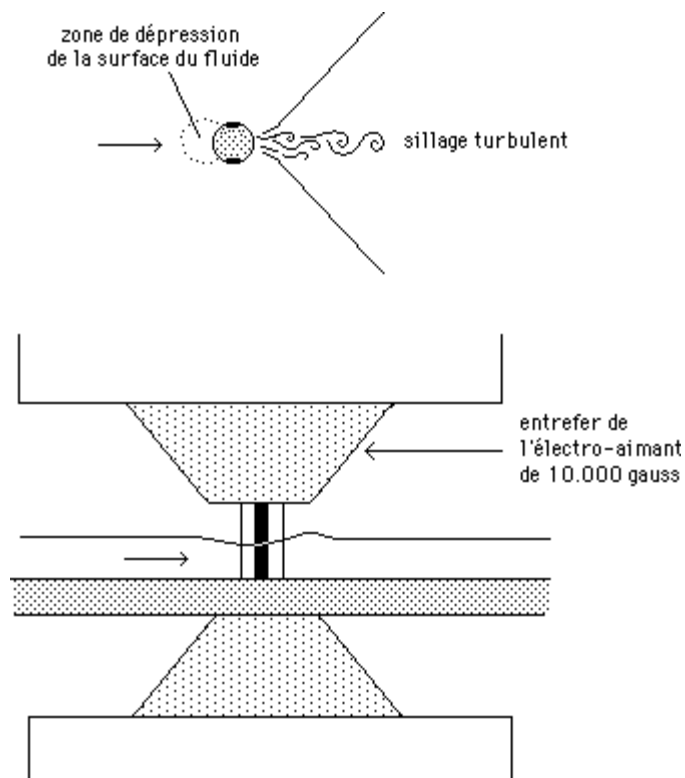
où L est une dimension caractéristique de la maquette.

L'annihilation de la vague d'étrave fut opérée au premier essai (1976). Nous opérâmes sur des maquettes lenticulaires, mais les premiers essais furent effectués sur une maquette cylindrique, sur laquelle on obtenait une vague d'étrave simulation une onde de choc détachée, s'établissant à distance d'un obstacle cylindrique :

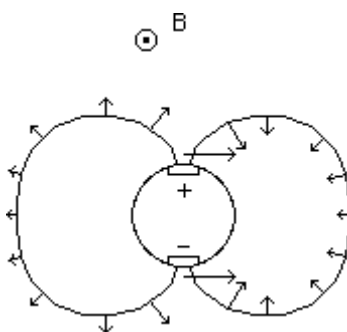


Toujours avec un champ magnétique perpendiculaire au plan de figure, l'annihilation de la vague d'étrave fut obtenue à l'aide de deux électrodes disposées comme indiqué sur la figure. La disposition des pièces polaires de l'électro-aimant est également figurée. Diamètre de la maquette : 7 mm. Largeur des électrodes incrustées dans la paroi : 2 mm.

La figure ci-dessus montre les ondes en l'absence de forces électromagnétique, et la suivante, après annihilation de la vague frontale.

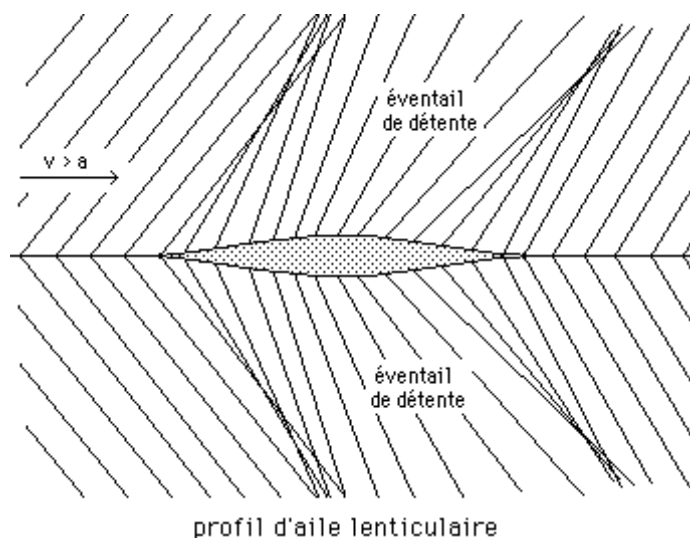


Les forces de Laplace, liées au passage du courant dans l'eau acidulée, combinée avec le champ magnétique transverse correspond à la figure ci-après :

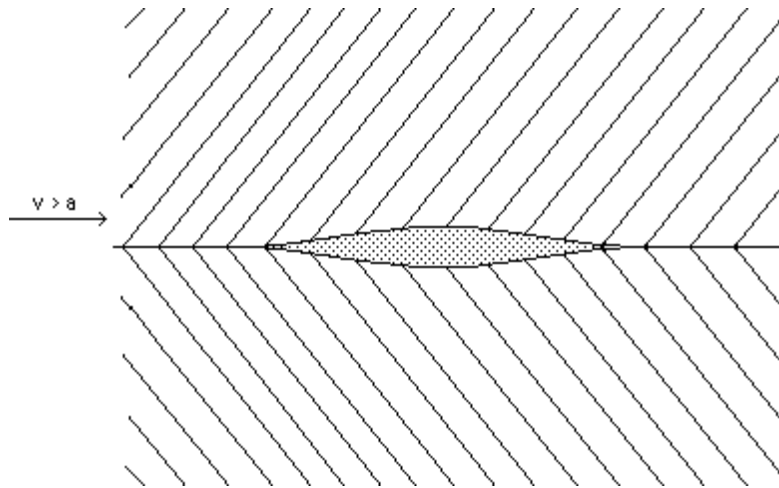


Ces forces sont particulièrement intenses au voisinage des électrodes, où le courant se concentre (densité de courant J maximale). En amont, elles produisent un ralentissement du fluide. Mais ce champ de force n'est pas adéquat pour provoquer l'annihilation totale du système d'ondes. Dans les expériences menées avec un obstacle cylindrique, muni d'une seule paire d'électrodes, ces ondes étaient simplement concentrées en aval de la maquette. Cependant, comme indiqué sur la figure, il était suffisant pour créer une dépression au "point d'arrêt", démontrant qu'un tel système pourrait en outre être utilisé pour la propulsion MHD.

La suppression de l'ensemble du système d'ondes peut être assuré, comme cela put être vérifié, toujours à l'aide de ces simulations hydrauliques, autour d'une maquette lenticulaire, en utilisant cette fois trois paires d'électrodes. En effet, si on se réfère à une figure précédente on voit que l'apparition des ondes de Mach résulte du télescopage des ondes de Mach, en deux régions, en amont et en aval.



Nous avons été les premiers (thèse de doctorat de Bertrand Lebrun) à introduire le concept-clé de régularisation d'un écoulement supersonique à l'aide des forces de Laplace en imposant autour d'une maquette un système d'ondes de Mach parallèles :

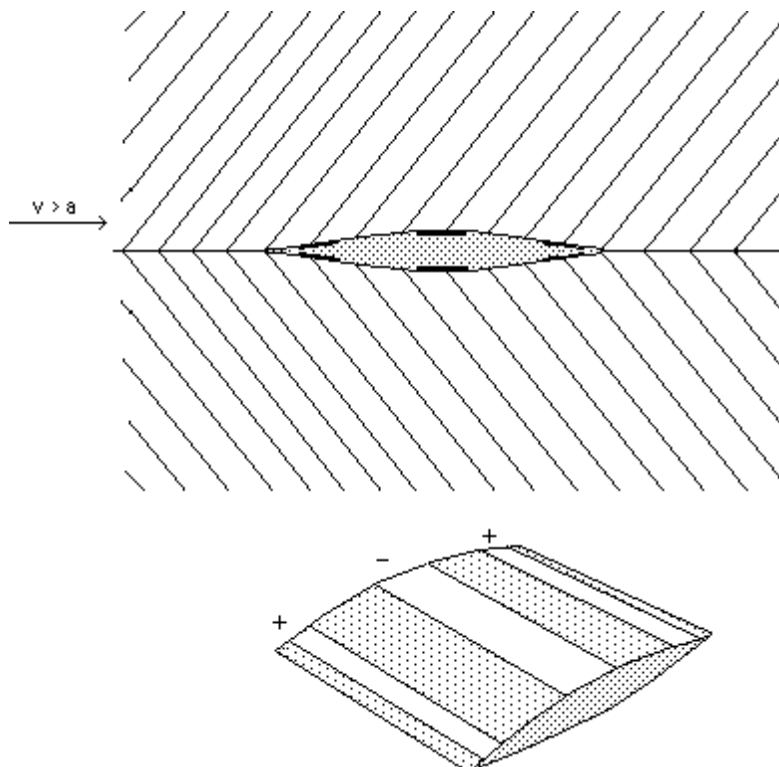


La seconde famille de caractéristiques, d'ondes de Mach, n'a pas été représentée.

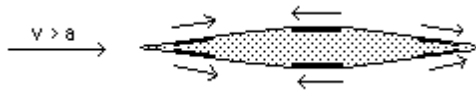
Trois actions sont donc nécessaires :

- Empêcher les ondes de Mach de se redresser au voisinage du bord d'attaque de la maquette, en accélérant le fluide dans cette région.
- Les empêcher de se coucher (dans "l'éventail de détente") sur le flanc de celle-ci.
- Enfin réaccélérer de nouveau au voisinage du bord de fuite.

D'où un système de trois électrodes pariétales :



Le champ magnétique était perpendiculaire au plan de figure, mais de manière à créer le champ de force adéquat, il fut nécessaire (dans les simulations effectuées sur ordinateur) de "sculpter" celui-ci, ce qui aurait été faisable en utilisant plusieurs solénoïdes conjugués. Au voisinage des électrodes, les forces de Laplace étaient disposées schématiquement comme ci-après :



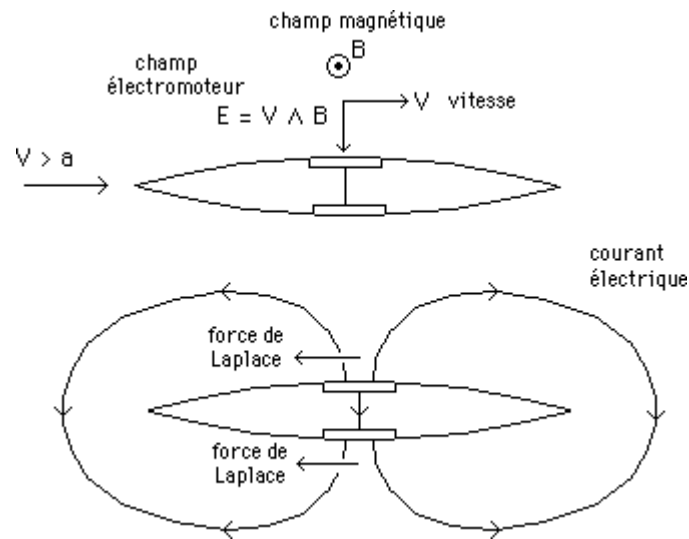
La thèse de Lebrun (publication au 7^o colloque international de MHD de Tsukuba, Japon et au 8^o colloque international de Pékin, 1990, ainsi que dans la revue The European Journal of Physics) démontra la faisabilité théorique de l'opération. Ce résultat est intéressant sur plus d'un point. En effet, lorsqu'on accélère le fluide, on lui fournit de l'énergie, alors que lorsqu'on le ralentit, c'est lui qui en fournit. Pourquoi ? Parce que le défilement du fluide le long de la maquette à la vitesse V implique une force électromotrice $V \times B$. Cette force tend à créer une densité de courant $J = s (V \times B)$ où s est la conductivité électrique qui, conjuguée au champ magnétique selon la force de Laplace

$$J \times B = s (V \times B) \times B$$



← sommaire →
page d'accueil →

Par exemple, si on immergeait une telle maquette en ne la dotant que d'une seule paire d'électrodes, la paire centrale, et en mettant celle-ci en court circuit, il s'en suivrait un passage de courant, se bouclant dans le gaz, qui aurait pour effet de ralentir fortement celui-ci :



Un tel profil d'aile, immergé dans un gaz fortement conducteur de l'électricité (ou rendu conducteur de l'électricité) se comporte comme un "générateur MHD" de forte puissance. C'est un "convertisseur MHD". D'où vient l'énergie ? C'est simplement l'énergie cinétique du fluide et la puissance extraite s'accompagne d'une perte d'énergie cinétique dans le fluide, de son ralentissement naturel.

En 1965 nous mettions en œuvre des générateur électrique MHD, opérant une conversion directe de l'énergie cinétique d'un fluide dans une "tuyère MHD du type de Faraday". La géométrie est différente, mais le principe est le même. Ci-après, le schéma d'un générateur MHD de Faraday, avec sa veine de section carrée.

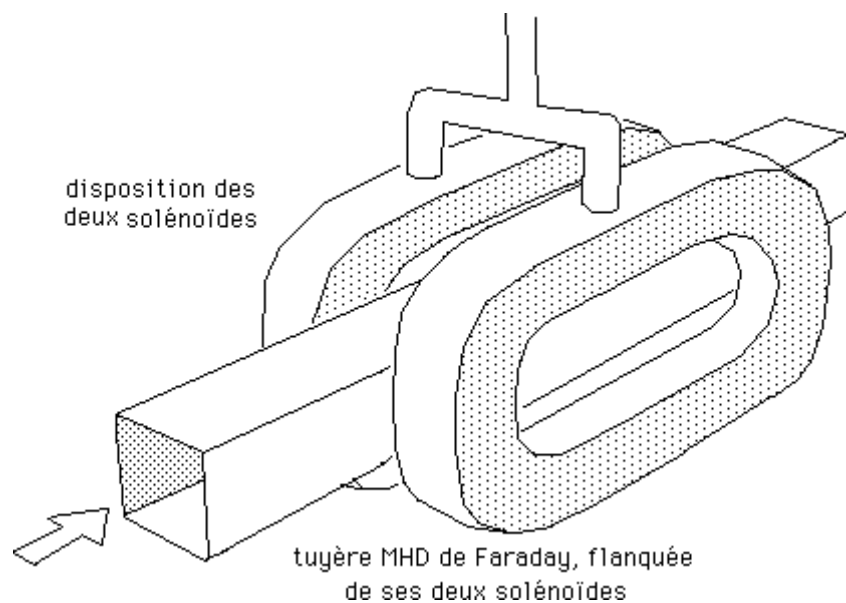
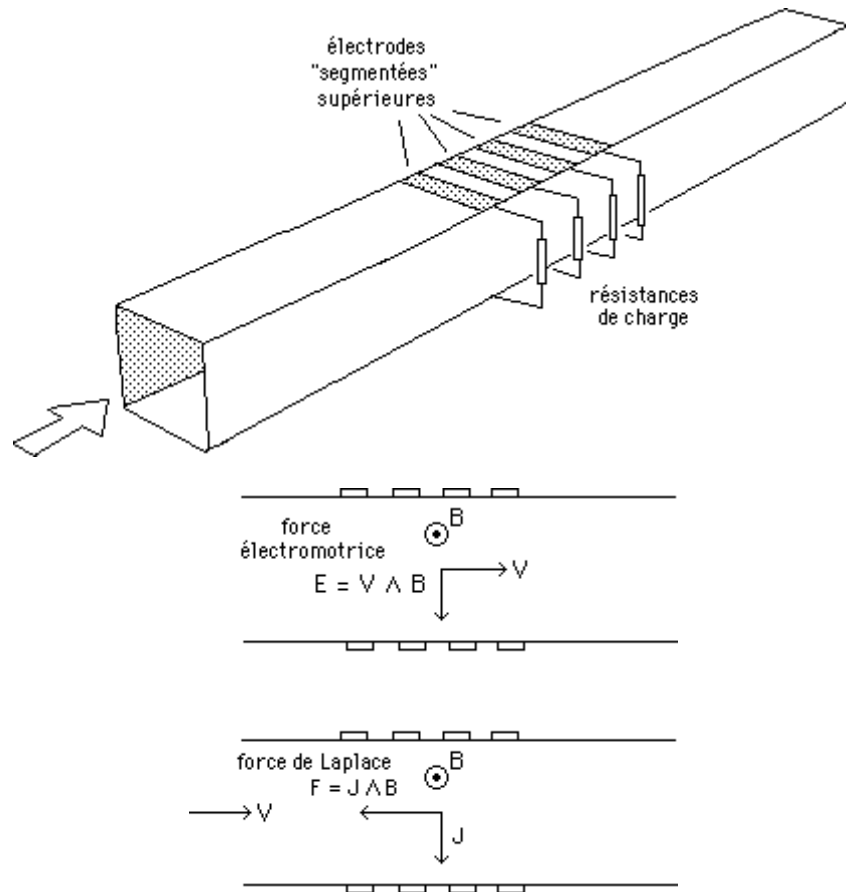


Image suivante, solénoïdes enlevés, la disposition des électrodes "segmentées" (pour obtenir une meilleure répartition du passage du courant dans la veine).



Dans les expériences que nous avons effectuées dans les années soixante à l'Institut de Mécanique des fluides de Marseille, nous injectons dans cette tuyère un courant d'argon à 10.000°K, sous un bar, pénétrant à une vitesse de 2500 mètres par seconde. Le champ magnétique atteignant 2 teslas, le champ électromoteur valait donc :

$$2500 \times 2 = 5000 \text{ volts par mètre}$$

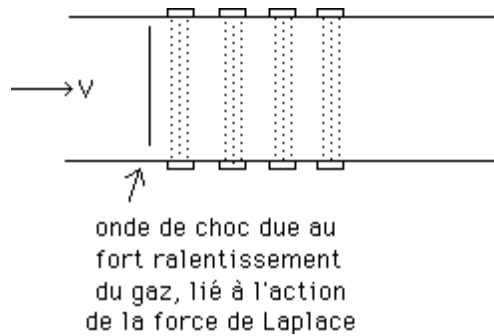
La distance entre les paire d'électrodes se faisant face étant de 5 cm, la DDP était de 250 volts. Il fallait retrancher 40 volts (tension liée à des phénomènes de paroi au voisinage des électrodes), soit 210 volts.

La conductivité électrique de l'argon, porté à une telle température, étant de 3500 mhos par mètre, on obtenait une densité de courant

$$J = s E = s V \times B = 735.000 \text{ ampères par mètre carré.}$$

soit 73,5 ampères par centimètre carré. Pour une longueur de tuyère de 10 cm et une largeur de 5 cm (50 cm²) ceci donnait un ampérage maximal, en court circuit, de 3675 ampères.

Lorsque les électrodes étaient en court-circuit, l'ampérage étant maximal, la force de Laplace résultante était suffisamment intense, comme l'expérience le montra, pour ralentir le gaz au point de donner naissance à une onde de choc droite, obtenue sans autre obstacle que cette force électromagnétique.

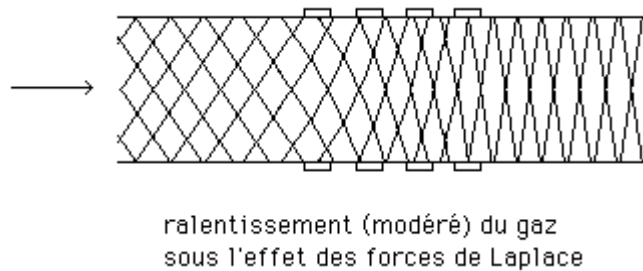


Le gaz arrivant à vitesse supersonique sur un profil d'aile lenticulaire possède donc sa propre énergie, qui peut être exploitée. L'énergie à dépenser pour supprimer le système des ondes de choc était donc l'énergie dépensée pour accélérer le gaz, près du bord d'attaque et près du bord de fuite, moins celle produite par son ralentissement, liée au fonctionnement de la paire d'électrodes centrales.

Ce résultat était extrêmement intéressant, car il montrait que l'énergie à fournir pour annihiler ces ondes était moins élevée que l'on aurait pu le penser a priori. La perte se situait principalement dans l'effet Joule. Dans le cas d'une machine volante circulant dans de l'air froid il faudrait ajouter l'énergie dépensée pour ioniser ce gaz à l'aide de micro-ondes, énergie que nous avons également chiffrée.

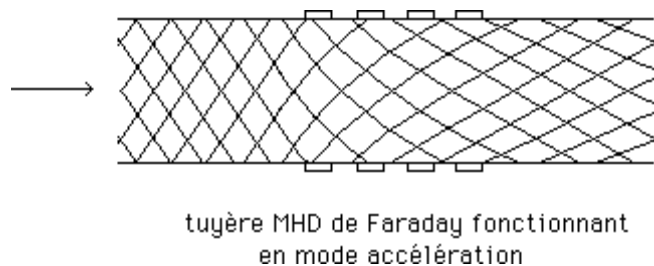
Comment les forces de Laplace agissent-elles sur la pente des ondes de Mach?

C'est très simple. Lorsque la tuyère MHD fonctionne par exemple en générateur, donc ralentit le fluide, voici l'évolution des ondes de Mach dans la tuyère :



Il s'agit là d'un ralentissement modéré du fluide. Les ondes semblent se tasser comme les éléments d'un accordéon. Les électrodes sont "en charge", ce qui limite la densité de courant. On comprend au passage comment un ralentissement plus intense peut donner naissance à une onde de choc : lorsque celui-ci abaisse la vitesse au point que le gaz tend à devenir subsonique. Les ondes de Mach se concentrent alors, comme un accordéon, ce qui accumule les perturbations de pression. L'onde de choc se forme alors, qui migre rapidement vers l'entrée de tuyère, en se stabilisant devant le premier "streamer" (jet de courant électrique issu de la première paire d'électrodes) comme si celui-ci constituait une sorte d'obstacle immatériel.

Si, par contre, on injecte de la puissance électrique dans le système, la tuyère se comporte comme un accélérateur MHD de Faraday. Les ondes de Mach tendent à se coucher :



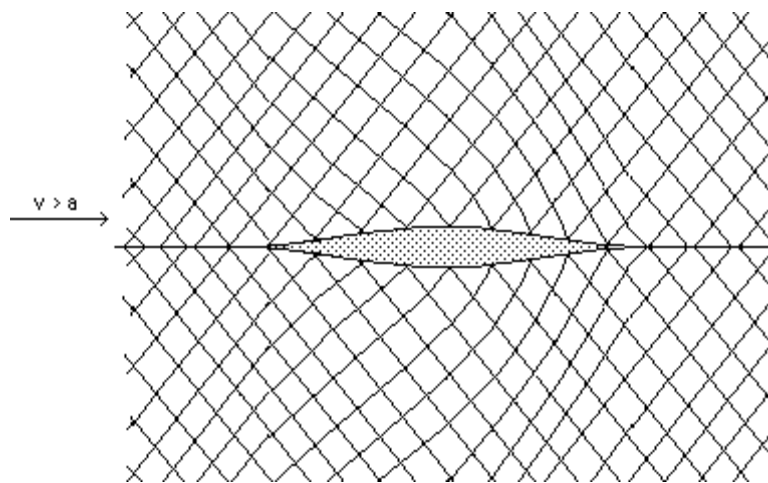
Cet accélération MHD a pu être mise en évidence également dans les années soixante, dans le laboratoire où je travaillais. Elle se révéla très efficace. La vitesse en entrée de tuyère étant de 2500

m/s on obtint des vitesses de sortie de plus de 8000 mètres par seconde, ce qui représente un gain de vitesse de plus de cinq kilomètres par seconde sur une distance d'à peine dix centimètres.

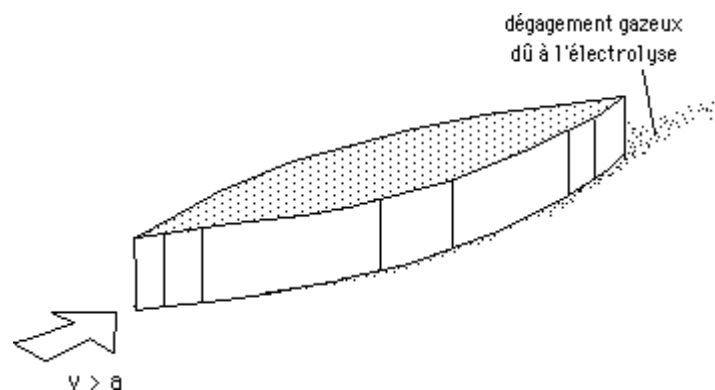
Ces expériences montrent l'extrême efficacité de l'action MHD sur un gaz, si celui-ci possède un taux d'ionisation suffisant. Pour information, une telle conductivité électrique (3500 mhos/m) correspondait, dans l'argon, à un taux d'ionisation de 10^{-3} (un atome sur mille était transformé en ion).

Dans de l'air froid, il faudrait ioniser "artificiellement", par exemple en soumettant le gaz environnant à un flux de micro-ondes en trois gigahertz, qui aurait pour effet d'arracher des électrons au composant le plus facilement ionisable : l'oxyde d'azote NO. On peut également envisager une sudation d'un alcalin, à bas potentiel d'ionisation, comme le césium ou le sodium.

Nous avons donc fait, Lebrun et moi, tous ces calculs dans le cadre d'une thèse de doctorat financée par le CNRS; dans les années quatre-vingt. Le résultat des simulations sur ordinateur donnait un écoulement complètement "régularisé", exempt d'ondes de choc. Dans la figure ci-après on a figuré les deux familles d'ondes de Mach.



Ce travail théorique a été complété par des expériences d'analogie hydraulique, toujours avec ce système des trois paires d'électrodes. Les vagues d'étrave et de poupe purent être annihilées. La conductivité électrique de l'eau acidulée étant trop faible, il n'était pas alors question d'utiliser l'énergie du fluide pour améliorer le bilan énergétique. Le résultat est identique à ce qui a été présenté ci dessus. Le résultat est que l'on obtient un écoulement où le fluide reste "plat" :



Le lecteur intéressé pourra retrouver certains de ces éléments dans ma bande dessinée "Le Mur du Silence" (voir cd-rom Lanturlu).

Comment mettre en oeuvre ces recherches.

Ces idées sont séduisantes. Elles ouvrent sur une nouvelle mécanique des fluides supersoniques où, au lieu de subir les ondes de choc comme des phénomènes inévitables, on peut au contraire les éviter.

Le problème de la MHD est de pouvoir travailler sur un gaz possédant une conductivité électrique suffisante. En vingt années de travail nous avons évidemment exploré toutes ces questions. En 1966 j'ai été le premier à obtenir un fonctionnement de générateur MHD "bitempérature", en régime stable.

Nous avons fait également de nombreuses expériences en milieu raréfié (de l'air à une pression de 10^{-1} mm de Mercure).

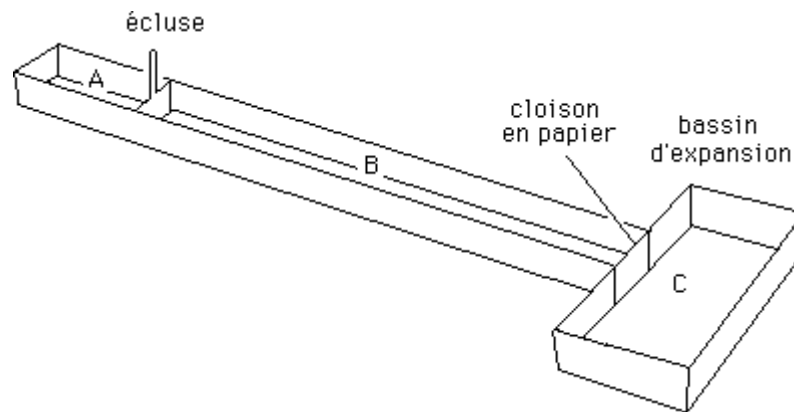
- Confinement pariétal d'un plasma
- Guidage de "streamers" (courants spiraux)
- Anihilation de l'instabilité de Vélikhov (communication du colloque MHD de Moscou)
- Etude de l'ionisation de l'air par HF (1 Mhz)

Une autre fois j'expliquerai, dans le site ces différentes expériences et perspectives. Dans l'immédiat, voyons comment pourrait être concrétisée l'expérience d'annihilation des ondes de choc autour d'un profil lenticulaire.

Il faut, pour se faire, disposer d'une soufflerie délivrant un flux de gaz à haute température (Argon à 10.000°K). C'est possible en utilisant un appareil mis au point dès l'après-guerre (mais tombé aujourd'hui en désuétude) : le "tube à choc".

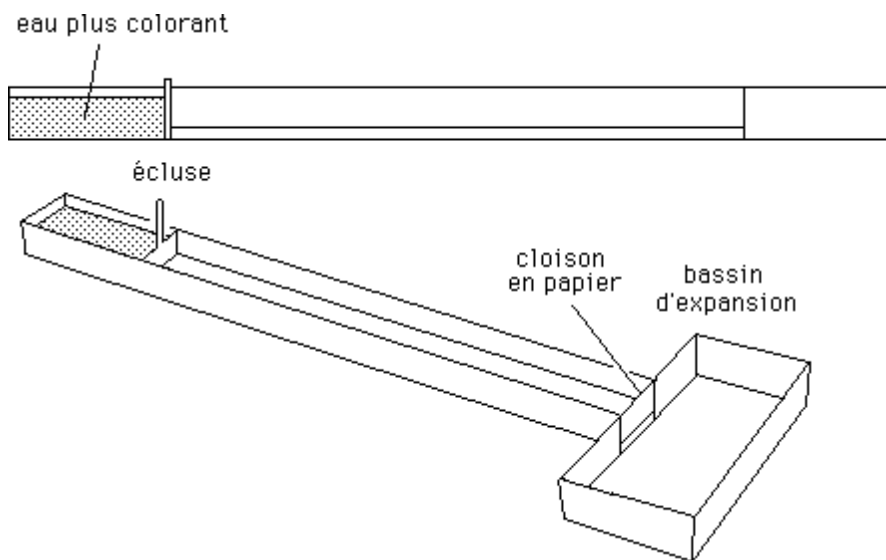
De quoi s'agit-il ?

Pour expliquer le fonctionnement de cette "soufflerie à onde de choc" nous allons une fois de plus faire recours à l'analogie hydraulique. Imaginons par exemple que nous construisions un canal rectiligne, de largeur constante, en contre-plaqué. Largeur : 10 cm. Longueur : quelques mètres. Voici le schéma :

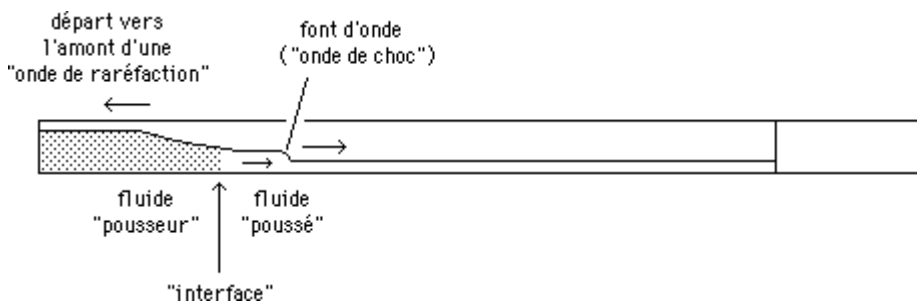


← sommaire page d'accueil →

En analogie hydraulique, la propagation d'une onde de choc droite sera équivalente à celle d'une "vague déferlante". Comment allons-nous créer celle-ci ? Il suffit de mettre une faible hauteur d'eau dans la partie B et une hauteur d'eau plus importante dans la partie A. Dans le bassin d'expansion : rien, pas d'eau du tout. En coupe :



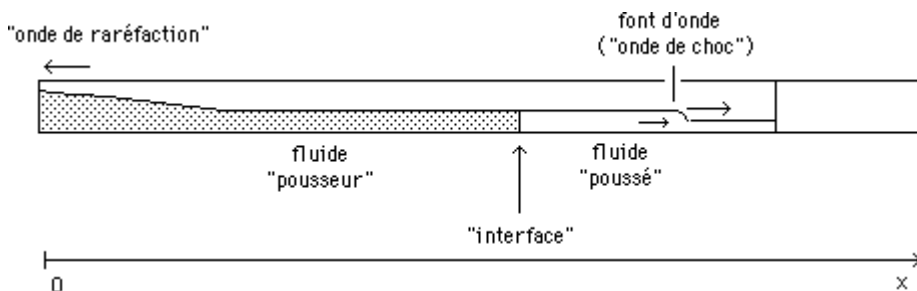
Tout est prêt pour l'essai. On enlève la cloison de l'écluse très rapidement. La masse d'eau colorée (par exemple avec de la fluorescéine) va faire irruption dans le canal, en aval. Nous obtiendrons ceci :



Qu'observe-t-on ? Le départ d'une vague déferlante, d'un front d'onde liquide, qui met l'eau incolore en mouvement. Mais le front d'onde se déplace plus vite que l'eau elle-même.

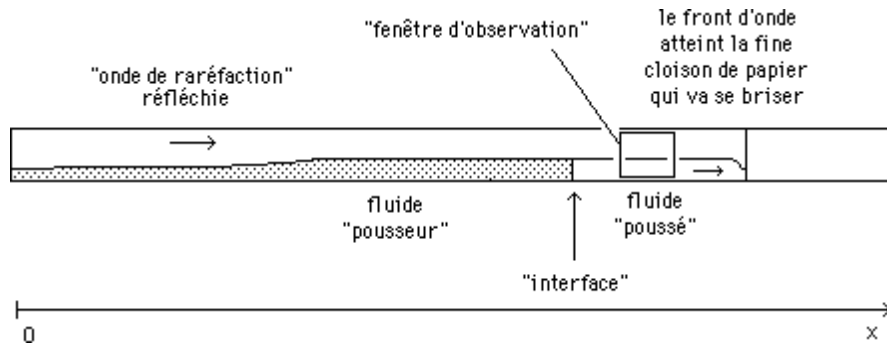
Vers l'aval, départ d'une onde de détente, mais plus "soft". Ca n'est pas une onde de choc.

Peu de temps après, la situation est la suivante :

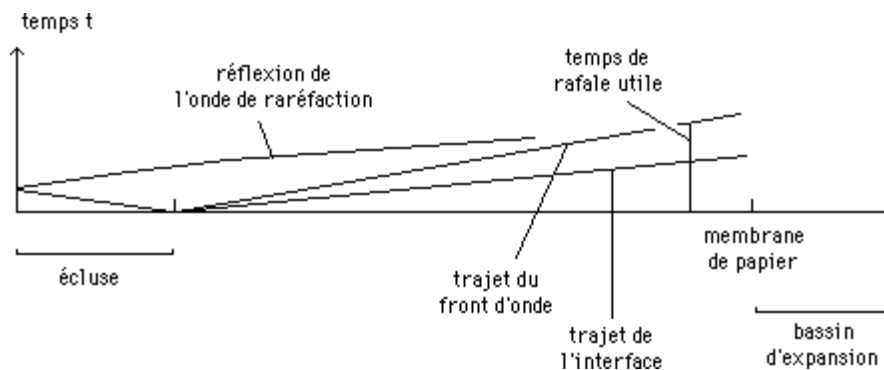


L'onde de raréfaction atteint le fond de la "cuve". La distance entre l'eau claire "poussée", mise en vitesse, et l'interface s'est accrue. On dispose donc d'une rafale exploitable, où de l'eau propre a été mise en vitesse et donc la hauteur s'est accrue (analogie hydraulique de la pression dans un gaz). On pourra donc "travailler" sur cette rafale. Par la suite l'onde de raréfaction se réfléchit sur le fond de la

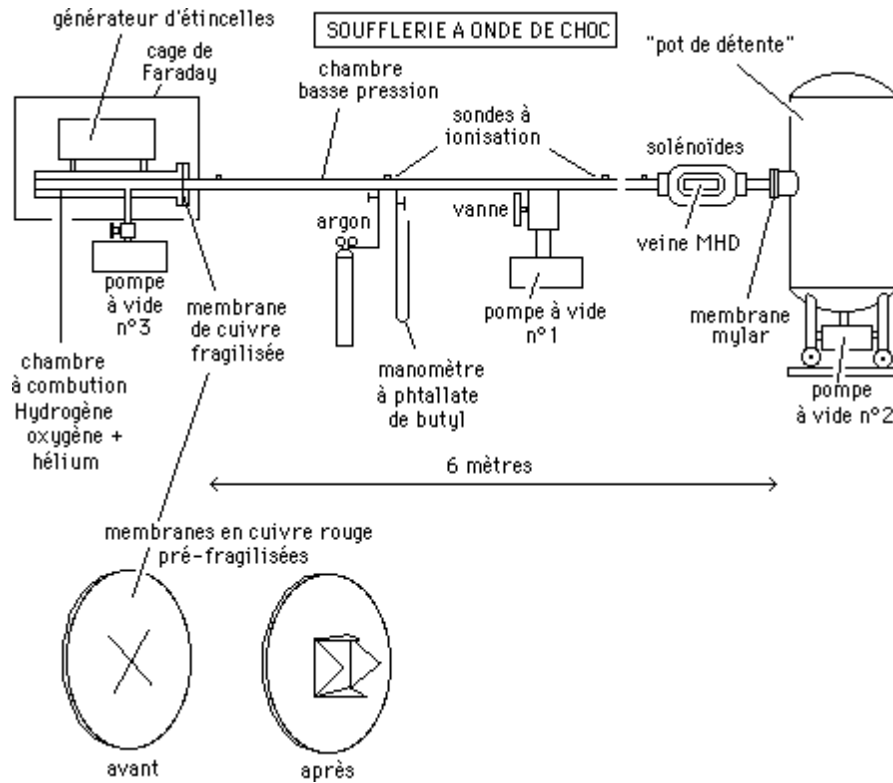
cuve et tend rapidement à rattraper l'ensemble interface-front d'onde.



On voit que si on avait disposé en paroi une "fenêtre d'observation" on aurait vu passer, pendant le "temps de rafale" cette masse d'eau pure, mise en mouvement. L'ensemble peut se lire sur un "diagramme x, t " :

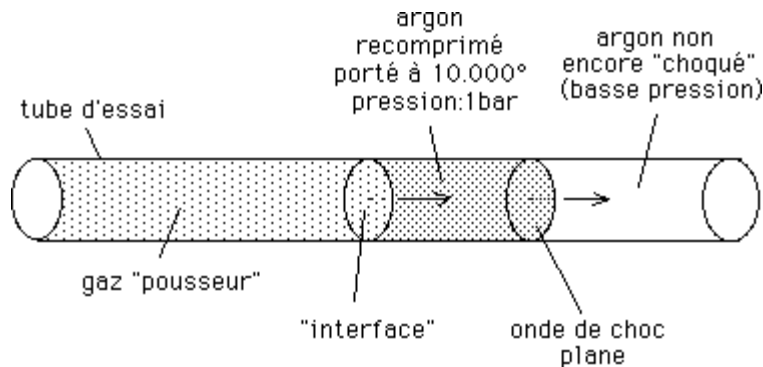


Nous avons ici l'image analogiquement fidèle du fonctionnement d'un "tube à choc". Il suffit de remplacer l'écluse par une "chambre haute pression". La cloison de l'écluse, manœuvrée manuellement, sera un diaphragme en cuivre qui s'ouvrira lorsque la pression atteinte (on utilise une chambre à combustion) sera suffisante. Le canal d'essai devient un tube d'essai, de section constante, initialement rempli d'argon à basse pression (13 mm de Mercure). Quand au bassin d'expansion, c'est une simple capacité de vide, de forme quelconque. La cloison de papier laissera place à une membrane de mylar, qui cédera lorsque l'onde de choc l'atteindra. Ci-après, l'allure schématique de l'installation :



Longueur de la chambre haute pression : un mètre quarante. Diamètre (le même que celui de la veine d'essai) : 5,6 cm. Longueur de la veine d'essai : 6 mètres. En bas la membrane de cuivre rouge, fragilisée à l'aide de stries, et la façon dont elle s'ouvre en formant quatre pétales, laissant le libre passage au gaz brûlé. La chambre haute pression est remplie d'un mélange H₂ + 1/2 O₂ plus de l'hélium comme diluant. Le pot de détente est un simple bidon assez résistant pour qu'on puisse y faire le vide. L'installation est complétée par différentes pompes à vide, à palette, qu'on trouve aisément d'occasion et qui donnent un vide sous 10-2 mm de mercure (10-2 torr), ainsi que par des vannes étanches au vide. Ajouter une batterie de bouteilles fournissant l'hydrogène, l'oxygène, l'hélium, et bien entendu l'argon.

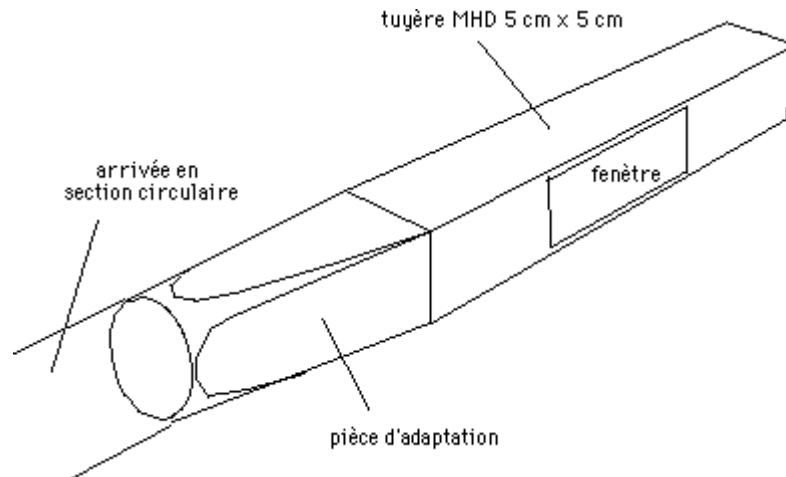
Le mélange gazeux combustible est mis à feu par un système de bougies connectées à une source de haute tension. Ce système étant générateur de parasites électromagnétiques, l'ensemble haute pression est enfermé dans une cage de Faraday (montants en bois et grillage de cuivre, maille 1 mm). Rustique, mais efficace. Les six mètres d'argon sous basse pression se retrouvent sous la forme d'une carotte de gaz comprimé (1 bar) et chaud (10.000°K) d'une vingtaine de centimètres de long. Celle-ci est immédiatement suivie par "les gaz brûlés", c'est à dire un mélange de vapeur d'eau et d'hélium.



Voilà pour la partie "soufflerie" à rafale chaude.

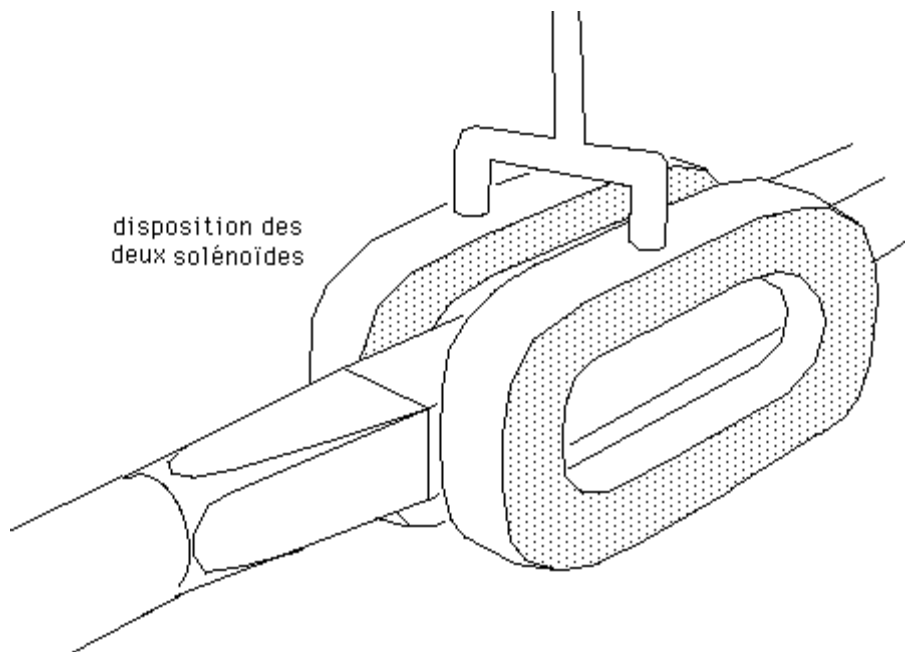
Dans la veine où seront opérées les mesures et effectuée l'expérience proprement dite (MHD) la section est carrée (5cm sur 5cm). On doit donc interposer une pièce, délicate à usiner, permettant de

passer d'une section ronde à une section carrée :

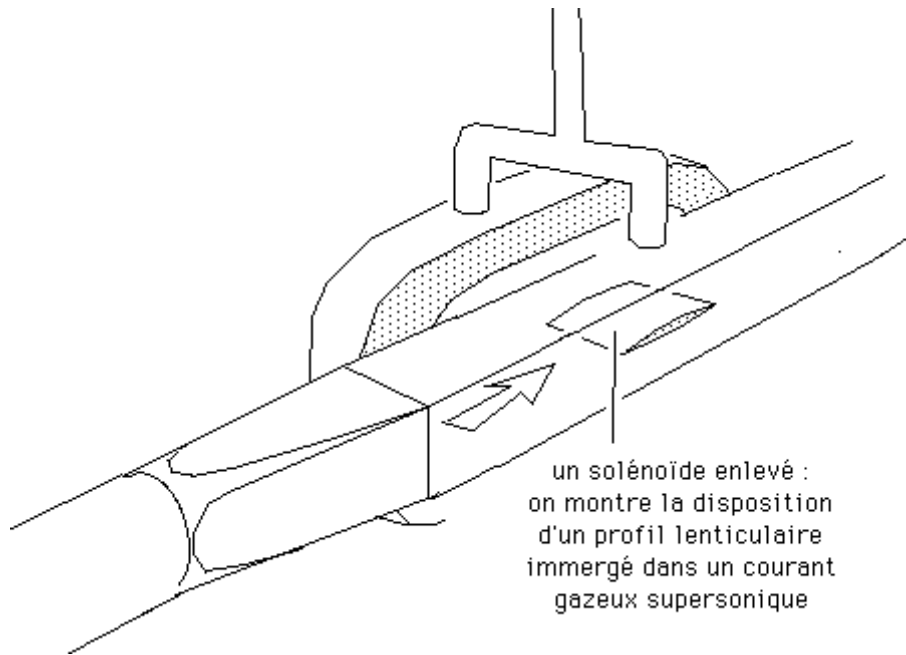


Les "tuyères MHD" peuvent être réalisées en plexiglass (avec des parties collées) ou en plastique stratifié (solidité), en étant munie d'une fenêtre de bonne qualité optique. Bien que la température de l'argon soit élevée, celle-ci n'endommage pas les pièces de la tuyère, étant donné la brièveté de la rafale (quatre vingt milliardièmes de seconde).

Pour créer un champ magnétique transversal on utilisera deux solénoïdes, disposés comme ci-après :

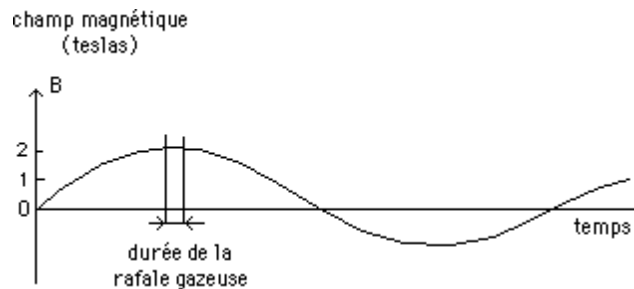


Dans le dessin suivant, on a enlevé un des solénoïdes pour montrer la disposition de la maquette (profil d'aile lenticulaire) :

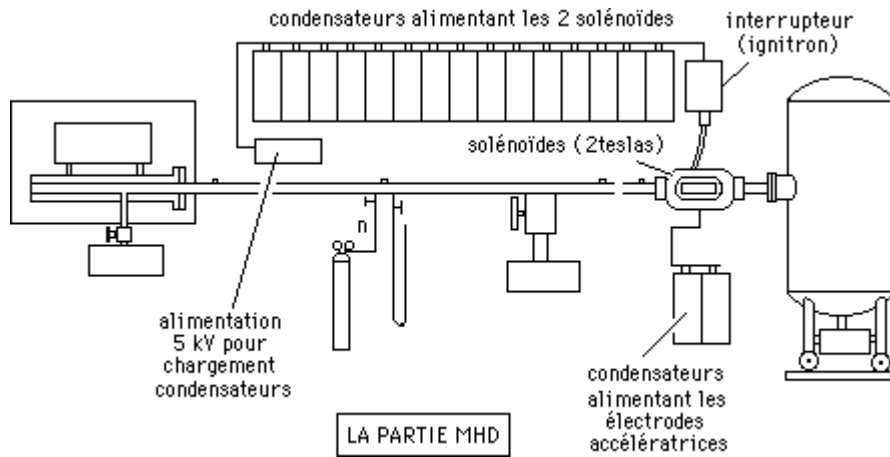


Le volume de la tuyère MHD, encombrement compris, étant de l'ordre du litre, et le champ magnétique à créer devant atteindre 20.000 gauss (2 teslas) il faut faire passer dans les enroulements des solénoïdes un fort courant (50.000 ampères). Un tel courant tend à faire exploser ces solénoïdes, non pas à cause de l'effet Joule, mais simplement à cause des forces $J \times B$ qui sont à l'œuvre dans les enroulements eux-mêmes. Il sera nécessaire de doter les enroulements de cuivre rouge d'une sorte de "corset", par exemple en fibre de verre noyée dans de l'araldite.

L'expérience proprement dite (l'interaction MHD) étant de brève durée, une solution économique, pour créer de tels ampérages, consiste à utiliser une batterie de condensateurs que l'on décharge dans cette self (décharge oscillante). Il suffit de synchroniser l'ensemble de telle manière que l'expérience (au moment du passage de la rafale d'argon chaud) se situe à un moment où le champ B est quasi stationnaire (période de la décharge : 5 millisecondes).

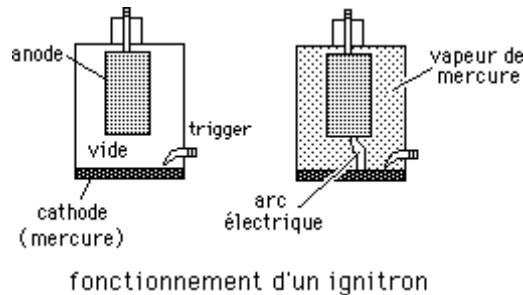


Dessin suivant : la soufflerie à onde de choc équipée pour des expériences de MHD, telle qu'elle se présentait dans mon laboratoire dans les années soixante-cinq.



Les condensateurs étaient chargés sous 5 kV. Une batterie de condensateurs plus modeste sert alors à alimenter les électrodes de la maquette d'essai.

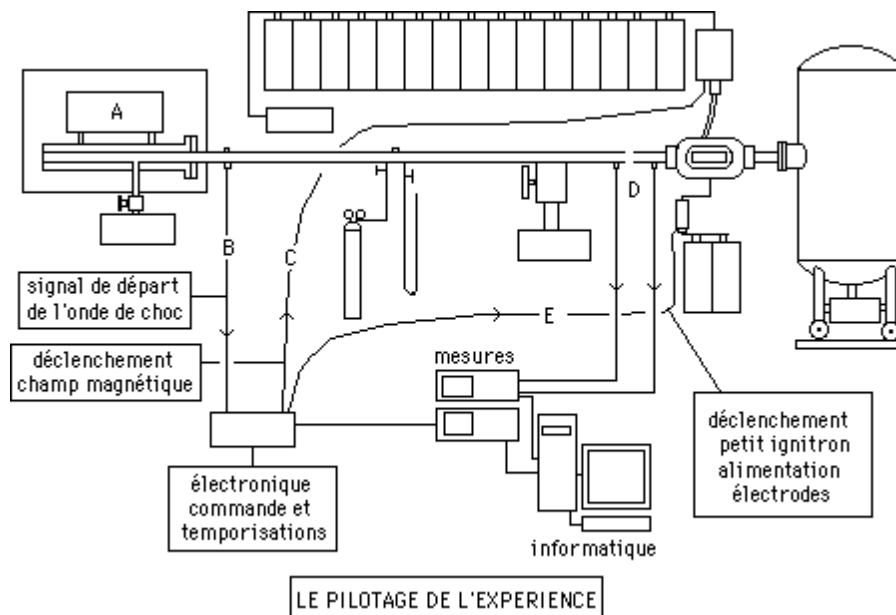
Problème : comment commuter 50.000 ampères. Réponse : en utilisant un vieil ignitron de locomotive électrique (conçu pour commuter 2000 ampères, mais suffisamment coûteux pour résister à des centaines d'essais avec une intensité 25 fois supérieure). L'ignitron est bien connu des spécialistes de l'électricité de puissance.



← sommaire page d'accueil →

Ayant la taille d'un seau de cuisine, c'est une enceinte contenant une anode et une cathode, laquelle se présente sous la forme d'un bain de mercure. Entre l'anode et la cathode: le vide. C'est à dire un espace empli de vapeur saturante de mercure, correspondant à la température ambiante, d'une conductivité électrique trop faible pour permettre le passage du courant, les électrodes étant sous tension (5kV). Un "trigger" est une petite électrode située près de la surface du mercure. Lorsqu'on fait éclater entre cette électrode et le mercure-cathode une décharge, celle-ci vaporise le mercure, et cette vapeur emplit alors la chambre, permettant le passage d'un arc électrique. La foudre en vase clos, en quelque sorte. Quand la décharge est amorcée, elle s'entretient jusqu'à ce que l'énergie des condensateurs ait été dissipée par effet Joule dans les conducteurs de cuivre. Alors la vapeur de mercure se condense et l'ignitron est prêt pour un nouvel essai. Un second ignitron, de la taille d'une canette de bière, suffit pour déclencher le passage du courant, au moment opportun, dans les électrodes dont la maquette d'essai est munie.

Ci-après, le schéma du contrôle des opérations :



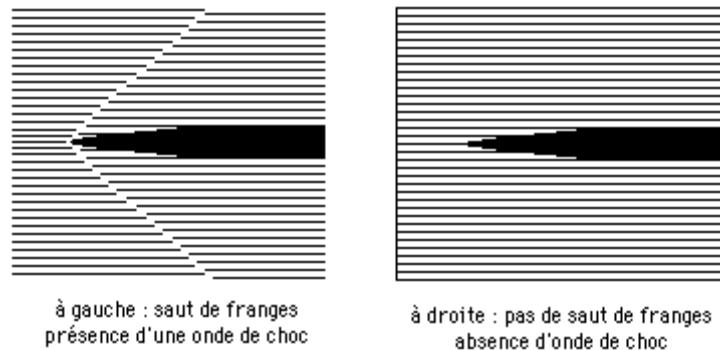
En 1965 le coût principal de ce type d'expérience concernait l'électronique et l'enregistrement des données. Evidemment, à cette époque, les micro-ordinateurs n'existaient pas. La bande passante des oscilloscopes les plus performants de l'époque (des Tektronix américains, à lampes) ferait sourire aujourd'hui : 1 mégahertz. Mais en ces années soixante leur prix à l'unité atteignait 40.000 F. Aujourd'hui on pourrait diviser ce coût par un facteur dix, à performances égales.

Les traces apparaissant sur les écrans des oscilloscopes étaient photographiées sur film polaroïd. Aujourd'hui toute la saisie de ces paramètres d'expérience pourrait être assurée par un micro ordinateur bas de gamme, équipé d'une carte ad hoc.

L'enregistrement des paramètres de la soufflerie était extrêmement simple. Il suffisait de disposer, en paroi, des couples de petites aiguilles mises sous faible tension. La distance entre ces aiguilles était d'un millimètre et la tension était suffisamment basse pour que le courant ne puisse pas passer dans l'atmosphère d'argon raréfiée. Mais lorsque l'onde de choc passait, le simple fait que ces électrodes baignent, immédiatement en aval de l'onde, dans de l'argon à 10.000° suffisait à obtenir un signal. En enregistrant à l'aide d'un "oscilloscope double traces les signaux émis par deux de ces "sondes à ionisation", distantes de dix ou vingt centimètres, et situées en amont de la tuyère, on pouvait mesurer la vitesse de l'onde de choc, donc en déduire par calcul tous les paramètres gazodynamiques : température, pression, degré d'ionisation, conductivité électrique. D'autres oscilloscopes étaient nécessaires pour effectuer des mesures complémentaires. Afin de protéger ces oscillos des forts parasites émis par les éclateurs de la chambre haute pression et en règle générale, par tous les éléments de la commutation électrique, ceux-ci, reliés aux sondes par des câbles coaxiaux blindés, étaient enfermés dans une cage de Faraday, dans laquelle prenaient également place

les expérimentateurs.

Voici donc la description de l'installation expérimentale qui permettrait de vérifier le bien fondé de la théorie que nous avons développée, entre les années 75 et 80, concernant la faisabilité de l'évolution d'un objet à vitesse supersonique, dans un gaz, sans création d'onde de choc. Il reste à évoquer la manière de mettre en évidence l'annihilation de ces ondes. On peut alors utiliser une méthode, classique et éprouvée, où on crée un système de raies horizontales, en faisant interférer deux rayons lumineux, l'un traversant la veine d'essai et l'autre passant à l'extérieur. Une onde de choc représente un saut abrupt de la densité du gaz, qui se traduit par une variation de l'indice de réfraction. Ainsi, les ondes de choc sont classiquement mises en évidence par ce procédé. Ci-après, à gauche, l'allure typique du "saut de frange" dû à la présence d'une onde de choc oblique, s'attachant au bord d'attaque d'un profil d'aile. À droite la même image, ondes de choc annihilées.



Le plasma d'argon à 10.000° est assez lumineux, aussi la source à utiliser ser-t-elle un petit laser hélium-néon, délivrant une lumière plus intense que celle du plasma.

À la fin des années quatre-vingt nous avons calculé, Lebrun et moi, toutes les paramètres d'une telle expérience, dans le cadre de sa thèse de doctorat, financée par le CNRS. Je suis convaincu que cette expérience aurait marché au premier essai, comme toutes les expériences de MHD que j'avais tentées antérieurement en laboratoire, sur tube à choc. Je me souviens en particulier d'une expérience datant de 1966 (dont je parlerai dans un futur document) où l'enjeu avait été de faire fonctionner un générateur MHD en "bitempérature", c'est à dire avec une température électronique (10.000°) sensiblement supérieure à celle du gaz d'essai (6000°). L'écueil était alors "l'instabilité de Vélikhov" (qui réduisit à néant tous les efforts menés en MHD dans de nombreux pays). Une astuce permettant de contourner cet écueil, l'expérience fonctionna au premier essai. Je présentai alors ce travail au colloque international de Varsovie, en 1967. Mais l'ambiance exécrationnelle qui régnait alors dans ce laboratoire me contraignit à le quitter et à changer de discipline, en devenant astrophysicien. Mon étudiant, Jean-Paul Caressa, récupéra l'ensemble, de ce thème de recherche, dont il fit sa thèse (bien qu'il n'ait visiblement pas compris un traître mot aux subtilités de l'instabilité d'ionisation, de Vélikhov, dont l'annihilation était la clef de l'expérience), ce qui lui valut le prix Worthington, et lui permit ultérieurement devenir directeur du laboratoire d'aérothermique de Meudon, puis directeur régional du CNRS pour la région Provence-Alpes, Côte d'Azur.

Ce qu'il advint d'un tel projet.

Au milieu des années quatre-vingt, j'avais réussi à intéresser le Directeur Général du CNRS, Pierre Papon, à ce thème de recherche. Il nous apporta son appui, relayé par son adjoint Michel Combarous, directeur du département Sciences Physiques de l'Ingénieur. À l'époque j'étais déjà en poste à l'observatoire de Marseille, lieu qui ne se prêtait guère à l'implantation de telles expériences. Combarous nous trouva alors un laboratoire d'accueil, celui du professeur Valentin, à Rouen. Le CNRS devait financer une partie de l'opération, l'armée étant censée apporter un complément. Mais, rapidement, les militaires exigèrent que je sois totalement tenu à l'écart de ces travaux, pour des raisons qui n'ont rien à avoir avec la science. La direction du CNRS ayant changé, je perdis les appuis de Papon et de Combarous. La bourse de Lebrun étant épuisée, rien ne fut fait pour lui permettre de

continuer ses travaux.

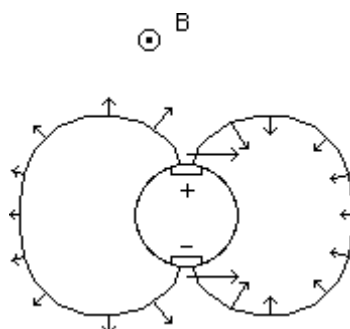
L'équipe rouennaise, totalement inexpérimentée en matière de MHD (mais disposant d'un vieux tube à choc) accumula les erreurs. L'argent fut finalement dilapidé sans résultat (les tuyères MHD et les installations électriques de puissance, construites par ces amateurs, explosèrent les unes après les autres).

Tout ceci est fort dommage. Dans un avenir proche, je mettrai sur un cd-rom tous les éléments, tant théoriques qu'expérimentaux, susceptibles de permettre à un laboratoire intéressé de mener à bien ce type d'expérience, relativement simple. Le présent descriptif, quoique sommaire, permet malgré tout de se rendre compte qu'étant donné l'abaissement du coût du matériel électronique, ce type de recherche est à la portée d'une école d'ingénieurs, ou du département de physique d'un université d'outre-Atlantique de seconde zone. Mais je doute fort que ces activités puissent se développer en France, où la recherche civile est bien souvent (en tout cas dans ces domaines) sous la coupe des militaires.

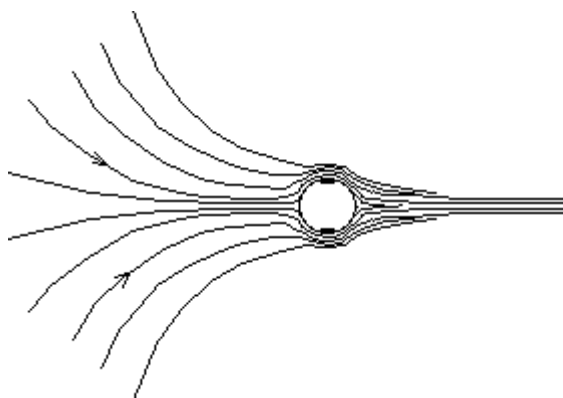
On pourrait penser que ceux-ci souhaitent en conserver l'exclusivité. Même pas. Il semble, après enquête, que quatorze ans plus tard (après mon abandon par KO, en 1986) la "MHD militaire" soit restée totalement inexistante.

Si cette expérience avait marché, nous aurions alors envisagé des expériences en gaz froid (air atmosphérique). Une expérience intéressante (qui fut totalement ratée en 1979 par une équipe Toulousaine, celle du "GEPAN", dans des conditions, disons, "humainement déplaisantes") concerne la suppression de la turbulence de sillage derrière un cylindre, que nous avons réussie en 1975 en hydraulique.

Revenons au schéma de la machine MHD cylindrique, évoquée plus haut.



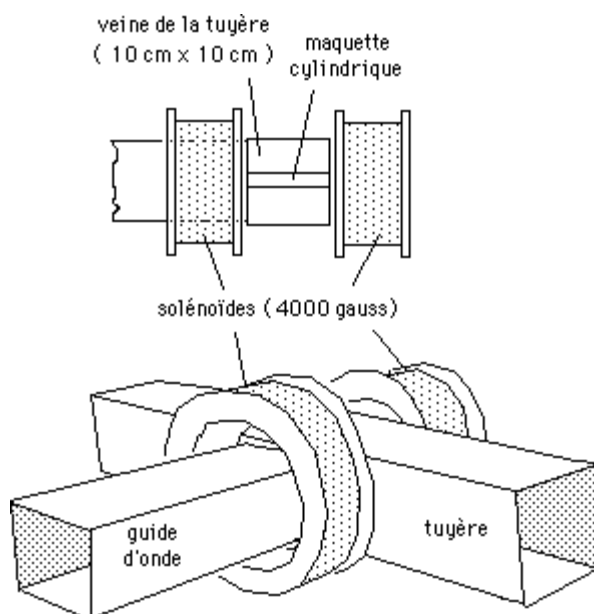
Nous avons indiqué plus haut la manière dont nous avons utilisé un tel montage pour supprimer la vague d'étrave devant ce objet. Mais, si on se limite à des paramètres d'interaction plus faibles, on peut alors, dans un fluide immobile, créer un écoulement induit assez intéressant.



L'écoulement avait à l'époque pu être mis en évidence à l'aide de filet colorés (pour la petite histoire : dans la cuisine de mon collègue et ami Maurice Viton, astronome au laboratoire d'astronomie spatiale, lequel avait pris à l'occasion un superbe film en 16 mm).

Placée dans un écoulement fluide à vitesse modérée, cette maquette permettant de supprimer totalement le sillage fortement turbulent, qui s'établit classiquement en aval d'un cylindre dont les génératrices sont perpendiculaires à l'écoulement. Mon idée fut donc, dès 1979, de tenter de mettre en évidence, à l'aide d'un simple microphone disposé en paroi, cette disparition de la turbulence (bruyante), lors d'expérience menées en subsonique dans de l'air à pression atmosphérique. Dans son principe, la manip était simple. Deux solénoïdes latéraux pouvaient fournir quelques milliers de gauss en continu, amplement suffisants. Restait à négocier le problème de l'ionisation au voisinage de la maquette.

Dans un rapport que j'avais remis au GEPAN, en 1979, intitulé "perspectives en magnétohydrodynamique" les principes de cette expérience étaient décrits. J'avais suggéré d'employer des micro-ondes en 3 gigahertz pour créer l'ionisation ad hoc. Ces gens montèrent donc, à mon insu, l'expérience suivante, en utilisant une source HF de très forte puissance (pulsée en 500 hertz, puissance de crête : 1 MW).

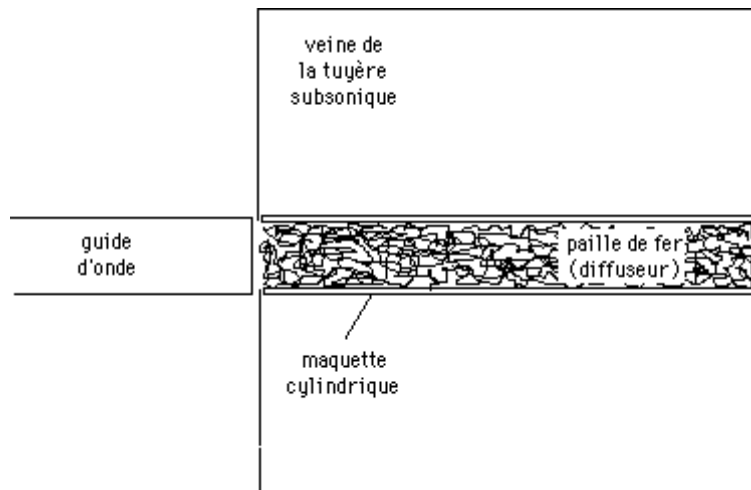


Les micro-ondes étaient amenées latéralement dans la tuyère à l'aide d'un gros guide d'onde de 10 cm par 10 cm, débouchant sur une fenêtre en téflon.

L'ingénieur chargé du projet, Bernard Zappoli, dépendant directement du chef du GEPAN de l'époque, Alain Esterle, s'imagina ainsi pouvoir créer à l'aide de cet injection transversale de micro-ondes une ionisation peuplant toute la veine, au voisinage de la maquette. Ignorant tout du phénomène d'ionisation par HF, il obtint un résultat qui le déconcerta grandement. L'ionisation se produisit bien, mais se limitait aux quelques millimètres de gaz jouxtant la fenêtre de téflon.

Qui dit ionisation dit plasma. Or il est bien connu que les plasmas constituent d'excellents écrans aux ondes électromagnétiques, sinon on pourrait communiquer par radio librement avec les astronautes lorsqu'ils sont en phase de rentrée atmosphérique.

Il est dommage que ce brave garçon n'ait pas fait appel à mes services à cette époque. Je lui aurais sauvé la mise en un tour de main. En effet, où fallait-il ioniser ? Autour de la maquette. Sa solution aurait donc été de faire arriver cette HF par l'intérieur d'une maquette creuse (un simple tube de PVC tel qu'utilisé par les plombiers). Deux pailles de fer achetées chez le droguiste du coin auraient alors assuré une excellente diffusion de ces micro-ondes, lesquelles, agissant sur l'air immédiatement au contact de la maquette, auraient créé autour de celle-ci une enveloppe de gaz ionisé bien homogène.



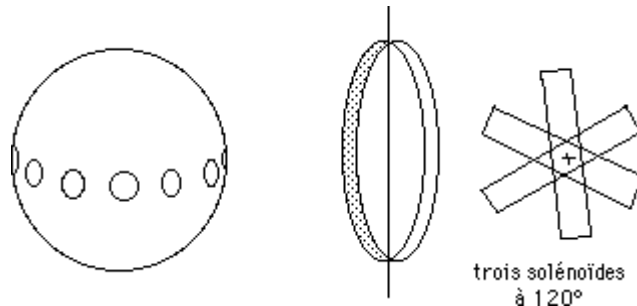
La manip aurait très probablement marché au premier essai, comme toutes celles que j'ai tentées dans ma carrière de chercheur.



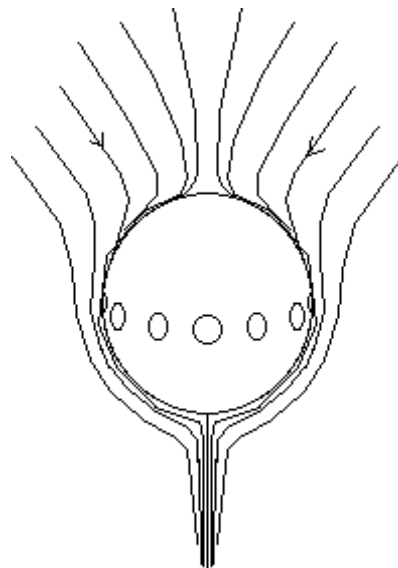
← sommaire page d'accueil →

La propulsion MHD.

Un dessin précédent, montrant l'écoulement induit par l'action des forces de Laplace, autour d'un cylindre, démontre que celles-ci peuvent être utilisées pour la propulsion de machines volantes, ou navigantes. Néanmoins la forme cylindrique ne semble pas la plus adéquate. Il est alors facile de passer à la sphère, en munissant un tel objet d'une couronne d'électrodes.



Un système de commutateur tournant permet d'alimenter séquentiellement deux électrodes diamétralement opposées, l'une formant anode et l'autre cathode. Le tout est alors de coupler ce dispositif avec un système de champ magnétique tournant. Point n'est besoin, dans ce cas, de disposer à l'intérieur de la maquette, un aimant monté sur un axe (bien que ce soit ce qui nous avons fait, lors de manip d'hydraulique, en 76, en logeant un aimant rotatif à l'intérieur d'une balle de ping-pong). Tous les étudiants de physique savent qu'en disposant trois solénoïdes à 120° et en les alimentant par des courants convenablement déphasés, on obtient alors l'équivalent d'un dipôle magnétique tournant. Le résultant étant :



Si l'expérience d'annihilation d'onde de choc avait marché, autour du profil lenticulaire, nous avons prévu de tenter de rééditer l'opération avec une maquette de ce genre, multi-électrodes et à champ tournant, le tout étant alimenté par des décharges de condensateurs, dûment synchronisées.

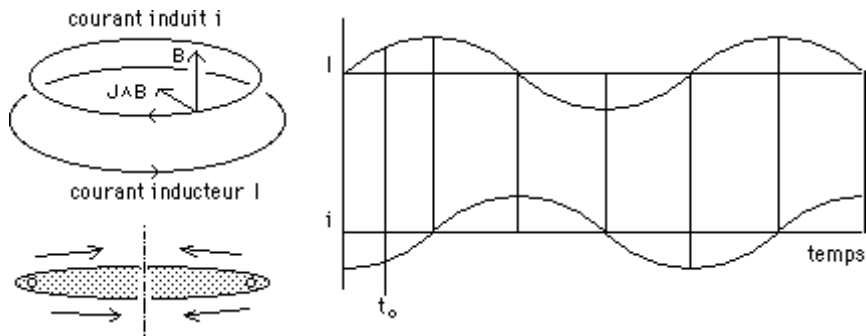
L'expérience, en gaz froid, aurait été également intéressante. Il aurait suffi d'utiliser la maquette comme antenne HF. Nous avons fait, dès 78, des expériences fort intéressantes à ce sujet. Encore une fois l'ionisation se serait sagement localisée au voisinage immédiat de l'objet.

Les aérodynes lenticulaires.

Mais l'expérience la plus intéressante aurait porté sur le thème de l'aérodyne MHD lenticulaire

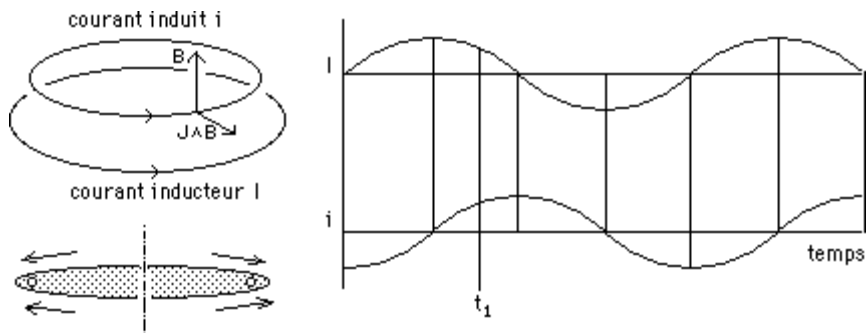
(publication aux CRAS, 1975, sous le titre "Convertisseurs MHD d'un genre nouveau"). Il s'agit alors d'une machine dépourvue d'électrodes.

Considérons un solénoïde parcouru par un courant alternatif. Il crée dans l'air environnant un champ induit, pouvant s'accompagner de circulation d'un courant, auquel s'associerait un champ secondaire s'opposant (loi de Lenz) à la variation du champ inducteur.



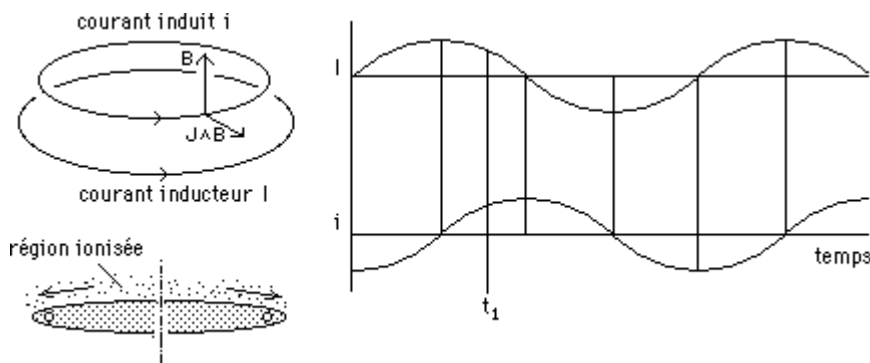
Le courant induit (i) qui forme des courbes fermées, réagit avec la champ inducteur $B(t)$ en donnant des forces de Laplace radiales, alternativement centrifuges et centripètes. Par exemple, sur la figure ci-dessus, à l'instant t_0 les directions des champs B (excitateur) et de la densité de courant J (champ induit, circulant dans la masse gazeuse) donneraient une force radiale centripète.

A l'instant t_1 cette force serait centrifuge.

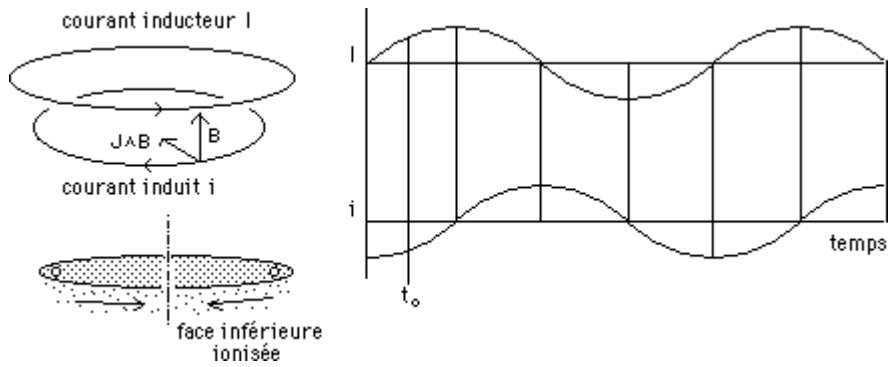


Si le gaz jouxtant le disque muni de son solénoïde interne n'est pas ionisé, il ne se passera rien de notable. Si on ionise ce gaz, celui-ci va être secoué par un système de forces alternativement centrifuges et centripètes, comme dans un shaker.

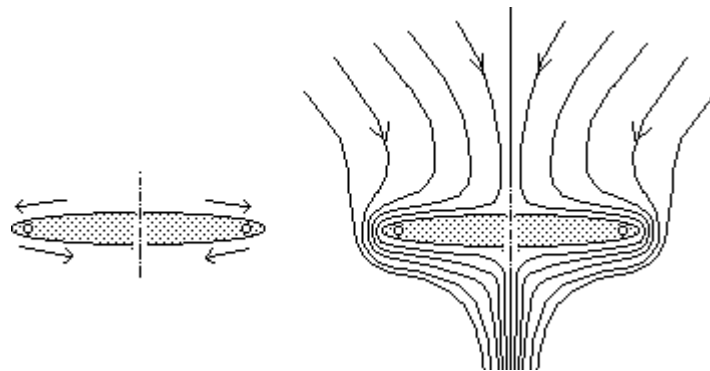
On peut concevoir sur cette base un système de propulsion en s'arrangeant pour créer une ionisation modulée dans le temps, sur les faces supérieures et inférieures, de manière que la partie du gaz située sur le dessus de l'engin soit conductrice de l'électricité lorsque les forces sont centrifuges :



et qu'au contraire celle située au dessous de l'engin le soit quand ces forces sont centripètes :



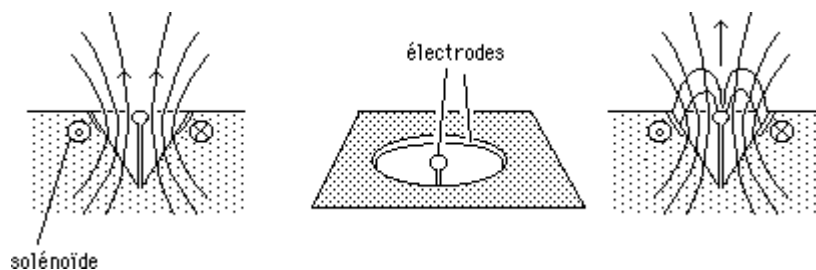
On obtiendrait ainsi un système de forces combinées tendant à faire puissamment circuler l'air autour de l'engin :



La formule (Compte Rendu à l'Académie des Sciences de Paris, 1975) est séduisante. Encore faut-il trouver un moyen de créer cette ionisation pulsée, près de la paroi. Le problème est délicat, car il est nécessaire que le temps pendant lequel on rend l'air conducteur de l'électricité soit d'un ordre de grandeur inférieur au temps de transit de la masse gazeuse autour de l'objet. Si on considère un objet croisant à 3000 mètres par seconde, et une longueur caractéristique de dix mètres (le diamètre de l'engin) ceci conduit à des temps de l'ordre de la milliseconde, ce qui n'est pas invisable avec une émission de micro-ondes pulsées, en 3 gigahertz. Les parois supérieures et inférieures de la machine devraient donc être tapissées de mini-klystrons, émettant en alternance, et arrachant des électrons libres aux molécules d'air.

Une autre solution est a priori plus intéressante. On sait que si on bombarde des molécules à l'aide d'électrons ayant une énergie bien ajustée il se produit des attachements électroniques. Certaines molécules acquièrent ainsi un électron surnuméraire et deviennent des ions négatifs, d'une durée de vie très brève, ce qui, dans le cas qui nous occupe, est intéressant.

Les canons à l'électrons pariétaux auront la forme de mini-pièges à loup. Le principe est simple. Un solénoïde crée un champ magnétique ayant la configuration ci-après :

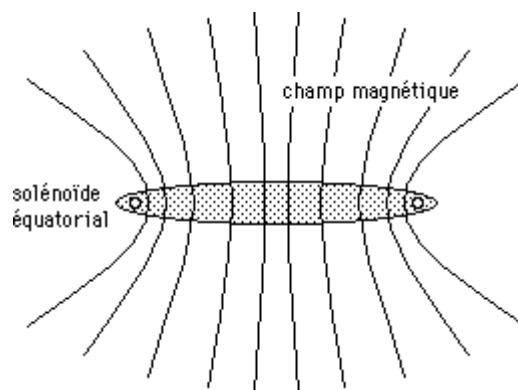


Ce champ, perpendiculaire à la paroi, voit son intensité décroître en fonction de la distance à celle-ci. On lui associe une pression magnétique :

$$\frac{B^2}{2 \mu_0}$$

Sur la figure de droite, une décharge électrique éclatant entre une électrode centrale et l'autre annulaire verra ses électrons expulsés vers des régions où la pression magnétique est moins intense, donc loin de la paroi, avec une énergie qui dépendra de la valeur de B. Si celle-ci est convenablement ajustée, ces jets d'électrons entraîneront la formation, dans l'air, d'ions négatifs, véhicules efficaces du courant induit lié à la variation du champ inducteur B, créé par le solénoïde annulaire (voir plus haut). L'efficacité aérodynamique maximale consiste à agir dans la couche gazeuse située immédiatement au contact de la paroi (ce qu'on appelle la "couche limite"). Mais se pose alors un problème de confinement de plasma, étudié expérimentalement lors d'expérience menées en basse pression, qui fut vite résolues.

Le champ magnétique B créé par un solénoïde équatorial est lui-même associé à une pression magnétique. Celle-ci décroît au fur et à mesure que l'on l'éloigne du plan de symétrie. Toute décharge électrique avait alors tendance à l'éloigner sensiblement de la paroi, en devenant incontrôlable.

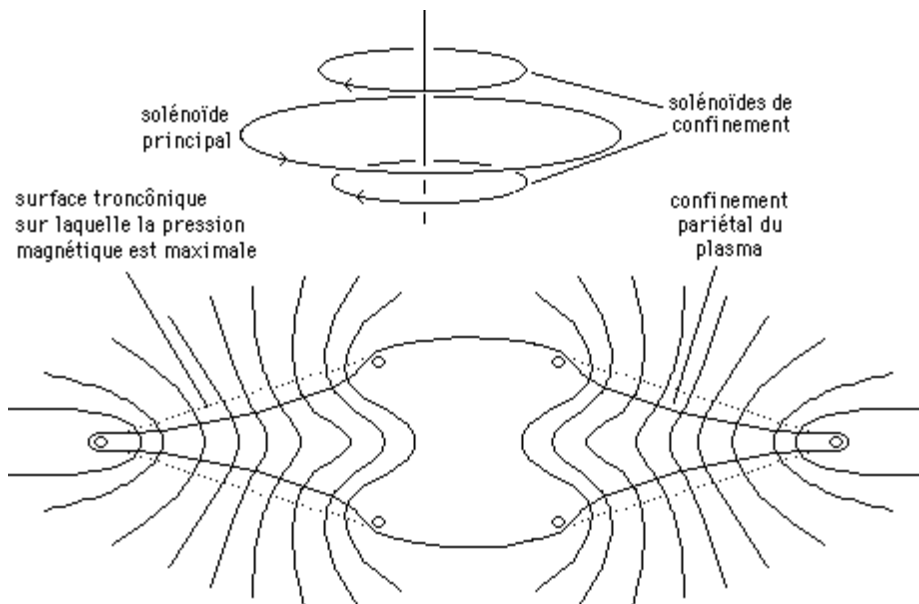


La solution consista à utiliser non un seul solénoïde, mais trois, deux solénoïdes secondaires, de plus petits diamètres, jouant le rôle de solénoïdes de confinement.

A un instant donné, les courants passant

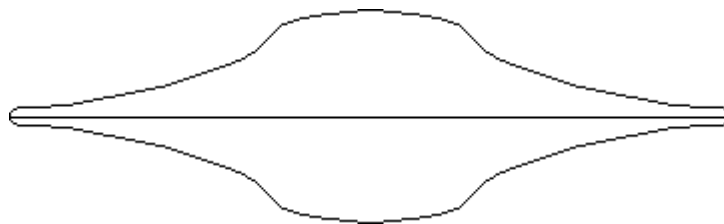
- Dans le solénoïde équatorial
- Dans les deux solénoïdes de confinement

sont de sens inverse. La géométrie permet donc de créer au voisinage d'une paroi concave un gradient de pression magnétique capable de plaquer la décharge électrique contre la paroi, en la maintenant dans la couche limite gazeuse (concrètement, pour une machine d'une dizaine de mètres de diamètre, dans une couche de quelques centimètres d'épaisseur).



Ces expériences de confinement pariétal furent parmi les plus spectaculaires que nous réalisâmes, à la fin des années soixante-dix, avec des moyens de fortune.

Globalement, l'engin avait alors l'allure de deux assiettes accolées, et c'est probablement ce qui déplut tant aux militaires.



On peut se demander comment une machine apparemment aussi anti-aérodynamique pourrait se déplacer à des nombres de Mach atteignant dix, son vecteur vitesse étant dirigé selon son axe, ce qui impliquerait un contournement extrêmement brutal du gaz à la périphérie équatoriale de l'engin. Il faudrait pour ce faire que le gaz obéisse au doigt et à l'œil aux injonctions issues des forces électromagnétiques, ce qui semble défier quelque peu l'imagination.

C'est qu'on n'imagine guère leur puissance. Calculons, avec $m_0 = 4 \times 10^{-7}$ la valeur de la pression magnétique (donnée par la formule ci-dessus), pour un champ magnétique de 10 teslas. Résultat de ce calcul :

quatre cent fois la valeur de la pression atmosphérique

La MHD débouche sur une mécanique des fluides complètement différente de la discipline conventionnelle, à la fois en subsonique, en supersonique ou en hypersonique, où le gaz n'a pas d'autre issue que d'obéir aux puissantes forces qui s'exercent en son sein.

Bibliographie :

- (1) J.P.Petit : "Is supersonic flight possible ?" Eighth Inter. Conf. on MHD Electr. Power Generation. Moscow 1983.
- (2) J.P.Petit & B.Lebrun : "Shock wave cancellation in a gas by Lorentz force action". Ninth Inter. Conf. On MHD Electr. Power Generation. Tsukuba, Japan, 1986

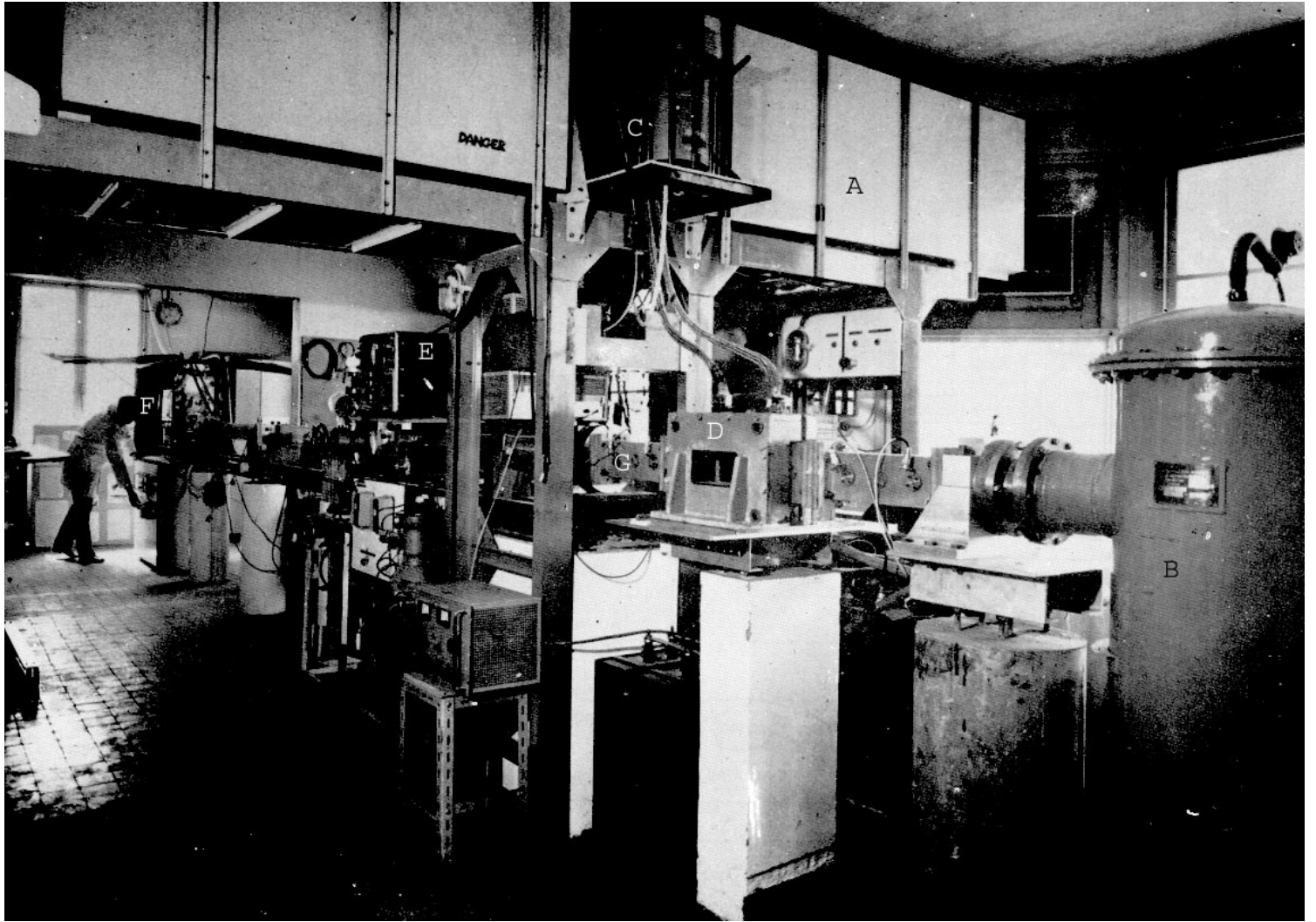
- (3) B.Lebrun & J.P.Petit : "Shock wave annihilation by MHD action in supersonic flows. Quasi-one dimensional steady analysis and thermal blockage". European Journal of Mechanics; B/Fluids, 8 , n°2, pp.163-178, 1989
- (4) B.Lebrun & J.P.Petit : "Shock wave annihilation by MHD action in supersonic flows. Two-dimensional steady non-isentropic analysis. Anti-shock criterion, and shock tube simulations for isentropic flows". European Journal of Mechanics, B/Fluids, 8 , pp.307-326, 1989
- (5) B.Lebrun : "Approche théorique de la suppression des ondes de choc se formant autour d'un obstacle effilé placé dans un écoulement d'argon ionisé. Thèse d'Energétique n° 233. Université de Poitiers, France, 1990.
- (6) B.Lebrun & J.P.Petit : "Theoretical analysis of shock wave annihilation by lorentz force field". International MHD symposium, Pékin 1990.

A SUIVRE



[Retour vers Guide](#) [Retour vers Page d'Accueil](#)

compteur initialisé le 16/01/2001



MAGNETOHYDRODYNAMIQUE. - Convertisseurs magnétohydrodynamiques d'une genre nouveau : appareils à induction. Note (*) de **Jean-Pierre Petit** et **Maurice Viton**, présentée par M. André Lichnérowicz. CRAS 1976.

Un nouveau type d'accélérateur MHD discoidal, à induction et à contrôle d'ionisation, est présenté. Muni d'un générateur autonome d'électricité, ce dispositif pourrait donner naissance à un aérodyne MHD. Une solution permettant de confiner le plasma à la paroi est évoquée.

A new induction MHD accelerator, disk shaped, with controlled ionization, is presented. Associated with a light and powerful electric generator it could become a MHD aerodyne. Solutions for confining the plasma to the wall are indicated.

Introduction. Dans une note précédente (1), des convertisseurs MHD d'une géométrie assez particulière, utilisant un fort effet Hall, avaient été décrits. Certains de ces appareils font actuellement l'objet d'une expérimentation.

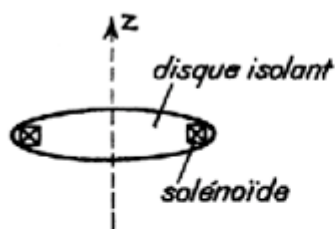


Fig. 1

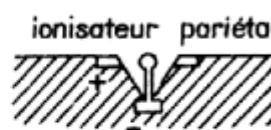


Fig. 2

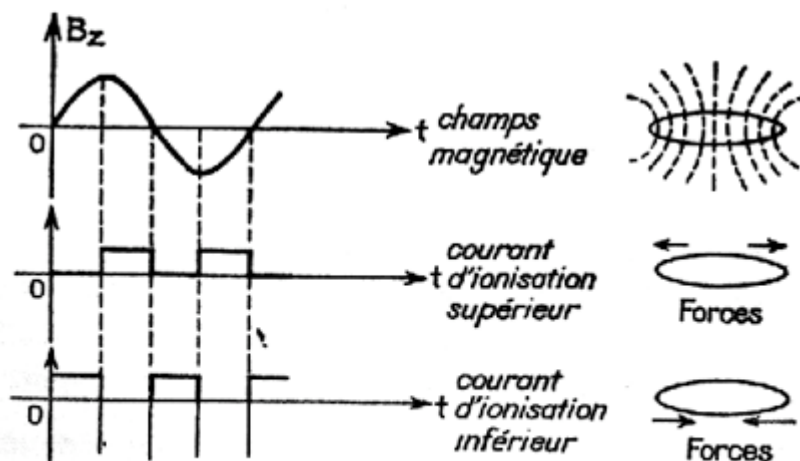


Fig. 3

Dans la présente Note il s'agit cette fois d'un accélérateur MHD à champ magnétique alternatif. Considérons un disque fait d'un matériau isolant, muni à sa périphérie d'un solénoïde parcouru par un courant alternatif (fig.1). La variation de champ magnétique tend à créer des courants induits circulaires dans le fluide avoisinant le disque. On suppose l'effet Hall négligeable. Ces courants induits se conjuguent avec la valeur instantanée du champ B pour donner des forces radiales, alternativement centrifuges et centripètes. Le système étant symétrique, ces forces n'ont qu'un effet d'agitation radiale, l'intégrale de la quantité de mouvement étant nulle sur un cycle. L'intensité du courant induit dépend de la valeur de crête du champ B et de sa période T . En deçà d'un certain seuil du rapport B/T ces courants induits restent faibles.

Accélérateurs à contrôle d'ionisation. - Il n'en est plus de même si on munit les parois du disque d'un système quelconque susceptible de créer une ionisation (fig.2). Grâce à ce dispositif on peut maintenant contrôler l'intensité des courants induits en tout point avoisinant la paroi de l'accélérateur. Modulons maintenant les alimentations des ionisateurs conformément à la figure 3. On se place dans des conditions où le temps de relaxation d'ionisation est faible devant la période T du champ B .

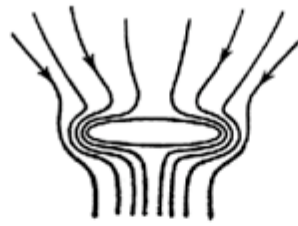


Fig. 4

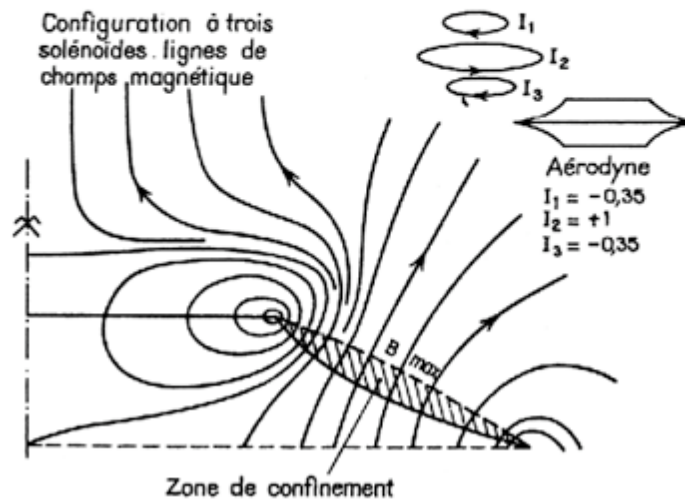


Fig. 5

Il est facile de voir que, lorsqu'elles apparaissent, les forces de Laplace, radiales, sont centrifuges au voisinage supérieur du disque, et centripètes au voisinage inférieur. L'air ionisé sera sollicité de façon pulsée et il se produira un entraînement fluide selon le schéma de la figure 4.

Aérodyne MHD. - Si cet accélérateur possède une source autonome d'énergie électrique, on obtiendra un aérodyne MHD à induction et à contrôle d'ionisation. Dans une note précédente (1) un moteur MHD avait été évoqué. Un moteur deux temps où, en fin de phase de compression MHD se produisaient au sein d'un mélange gazeux des réactions de fusion. Le plasma entrainé alors en expansion, l'appareil se comportant dans cette seconde phase en générateur électrique du type de Hall.

Citons pour mémoire un article récente de Ralph Moir (2). Celui-ci propose également un moteur MHD alternatif, de formule différente, et apparemment plus simple. L'élément essentiel est une chambre toroïdale qui n'est autre qu'un tokamak. Moir estime que les conditions de Lawson peuvent être atteintes dans une compression MHD, qui pour ce type d'appareil est du type théta pinch. L'expansion du plasma de fusion comprime alors les lignes de force du champ magnétique et il y a production directe de courant électrique par induction. L'intérêt de cette double formule : aérodyne et moteur fonctionnant par induction, est de s'affranchir du passage de forts courants à travers des électrodes.

Confinement du plasma à la paroi. - Le solénoïde inducteur de l'accélérateur discoïde fournit un champ magnétique qui est maximal à la paroi. La pression magnétique aura donc tendance à faire migrer la décharge loin de celle-ci. Si l'on veut contrôler la localisation de l'interaction MHD il faut recourir à une géométrie donnant un maximum de champ, non à la paroi, mais au voisinage de celle-ci. Ceci peut être obtenu par une géométrie à plusieurs solénoïdes comme il est indiqué sur la figure 5. Le calcul montre que l'intensité de champ magnétique est alors maximale sur une surface approximativement conique. Il est indiqué de choisir pour paroi de l'aérodyne une trajectoire orthogonale aux lignes de champ, de manière à ce que la force de Laplace soit tangente à celle-ci. L'idée de l'aérodyne MHD est de Jean-Pierre Petit, celle de la géométrie confinante à plusieurs solénoïdes à Maurice Viton.

(*) Séance du 8 décembre 1976

(1) J.P.Petit, Comptes rendus, 281, série B, 1975, p.157

(2) R.Moir, Direct Conversion of Energy from Fusion, rapport UCRL 76096 du Lawrence Livermore Laboratory,

Californie, USA.

[Retour](#)

Error. Count file "/usr/local/www/jppetit/science/mhd/m_mhd_e/CRAS_1975_en.count" not writable or non-existent.

MHD

MHD is a very large field of investigation. The inventor of the basic concepts is the famous british scientist Michael Faraday. MHD owns two aspects.

- On one hand, one can accelerate fluids, through Lorentz force $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ which refers to **MHD accelerators**.

- On the other one, one can convert the kinetic energy of a fluid, its enthalpy, into electric energy. This refers to **MHD generators**. In such plants, when a gas flow crosses the magnetic lines of a transverse magnetic field \mathbf{B} at velocity \mathbf{V} , an induced electric field $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ acts on charged particules, free electrons or ions.

A very good book exist (now, only in scientific libraries) :

Sutton & Sherman : "Engineering magnetohydrodynamics", Mac Graw Hill Books Cie, 1967

for physicists and post graduate students.

I have a personal experience in MHD, since 1964. Between 1964 and 1972 I worked at the Institut de Mécanique des Fluides de Marseille. Following, a shortened (devoted to more recent works) bibliography :

- (1) J.P.Petit : "Is supersonic flight possible ?" Eighth Inter. Conf. on MHD Electr. Power Generation. Moscow 1983.
- (2) J.P.Petit & B.Lebun : "Shock wave cancellation in a gas by Lorentz force action". Ninth Inter. Conf. On MHD Electr. Power Generation. Tsukuba, Japan, 1986
- (3) B.Lebun & J.P.Petit : "Shock wave annihilation by MHD action in supersonic flows. Quasi-one dimensional steady analysis and thermal blockage". European Journal of Mechanics; B/Fluids, 8 , n°2, pp.163-178, 1989
- (4) B.Lebun & J.P.Petit : "Shock wave annihilation by MHD action in supersonic flows. Two-dimensional steady non-isentropic analysis. Anti-shock criterion, and shock tube simulations for isentropic flows". European Journal of Mechanics, B/Fluids, 8 , pp.307-326, 1989
- (5) B.Lebun : "Approche théorique de la suppression des ondes de choc se formant autour d'un obstacle effilé placé dans un écoulement d'argon ionisé. Thèse d'Energétique n° 233. Université de Poitiers, France, 1990.
- (6) B.Lebun & J.P.Petit : "Theoretical analysis of shock wave anihilation by lorentz force field". International MHD symposium, Pékin 1990.

Then I shifted to astrophysics and theoretical cosmology. During the sixties we built short-duration MHD generators, based on shock tube driven hot wind tunnels. This device could produce short duration flows, high temperature and high velocity, with quite high pressures. This is not a low pressure wind tunnel. The typical parameters are :

Gas : argon
Velocity : 2,700 m/s
Temperature : 10,000°K
Pressure : one bar
Electrical conductivity : 4000 mkhos/m

We are presently building a new lab, with private fundings. I think it will be operational within the end of 2001. The activity will cover different fields :

- Hot gas experiments

- Cold gas experiments (supersonic flows of air at atmospheric pressure)
- Low pressure gaz experiments (simulations).
- Numerical experiments.
- Hydraulic experiments (high velocity submarines models).

At first, why do we restart such activity after a 13 years stop ? Because we have new ideas. In 1975 I imagined that supersonic flight could be possible, in dense air, without creating sinoc bang, nor turbulence. I publishehd papers in scientific journals about that. At this time it seemed to be a foolish idea. In 1975, with my colleague Maurice Viton we built an hydraulic experiment with a one tesla magnet. Such B-field was necessary to modify a water flow around a tiny model, in a free surface flow (8cm/s). The model was a cylinder (7mm diameter). The experience was a success and the front wave (specialists in fluids mechanics know that the wave created by a ship are very similar to shock waves) was completely cancelled. Then I thought that the idea could not be so fancy that it looked at first glance.

During the next ten years everything was very difficult, not from a scientific point of view but, let us say, from a "politic point of view". Obviously, this new concept was connected to the ufo's case. In gas experiments, such "MHD aerodyne" would be surrounded by a luminous plasma, reddish at low regime, almost white at larger ones. Electrodes, when machines would own some, would look like "windows". In addition, disk-shaped machine (as named in a first in a "Compte rendu de l'Adadémie des Sciences de Paris", in 1975) was optimum, on scientific grounds (and MHD groups, which can be somewhat different from classical fluids mechanics grounds), so that the scientific community was not so enthusiastic about such project, even if the scientific grounds were perfectly clear and clean.

I tried to install some research, first in the french CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) in 1979-1982, then in a laboratory of the CNRS (Centre Narional de la Recherche Scientifique) in 1984-1986. This second laboratory was located in Rouen, and his directeur was the professor Valentin, today retired. Through the CNES, some experiences were installed in Toulouse, in the french CERT (Centre d'Etude et de Recherche Technique), a lab in close connexion with the army. Some money was given but, in these two trials, the army stupidly obliged the labs to kick me out of the scientific job. Unfortunately, the scientific background of the involved persons, in both cases, was not adequate and the research failed in the two. A lot of money was stupidly wasted. So that in 1987 I decided to give up definitively. By, very recently, new ideas incited me to operate a come back in the field. By experience, I knew that if any collaboration with french institutions was initiated, the military would immediatly rot the situation, as they did many times ago. So that we decided to restart with our own forces and ressources. It can seem to be foolish. But, as far as I see all this research can be operated with obsolete materials. In addition, the price of electronics and computers has been considerably lowered since 20 years. Many very good researchers, now retired, joined us. So that we have decided to set up a lab, in the south of France. Presently we collect obsolete systems : condensators banks, electric supplies with various voltage, low and high, ignitrons, klystrons, optical devices and so on, and we store it. When we will have all the necessary, we will go into action, soon, we hope.

Now, let us have a look to some of the new ideas.

If you click [there](#), you will read the Note aux Comptes rendus de l'Académie des science, published in 1975. If you don't read french, some brief explanations. Following, the three first illustrations. On figure 1, a disk-shaped machine, with an equatorial solenoid, whose alternative electric current creates an alternative magnetic field. This one (thanks to Mr Maxwell) creates an induced electric field \mathbf{E}' with tends to create circular induced electric currents. Combining these currents \mathbf{J}' to the instant value of the magnetic field we get radial forces (Hall effect is considered as neglectible) we get a system of time-dependent radial forces $\mathbf{J}' \times \mathbf{B}$, which are directed towards the outside and towards the center, alternatively. So that the idea was the following : Suppose we can create a non-steady ionization at the vicinity of the disk, controlled in time, we could act on the fluid, using radial centrifugal forces when they are present, of the top of the disk and radial centripetal

forces, when this force is reversed, at the bottom of the disk-shaped machine.

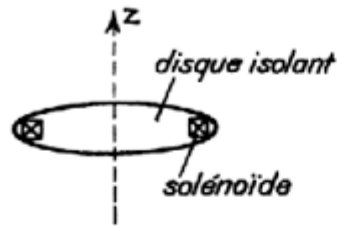


Fig. 1



Fig. 2

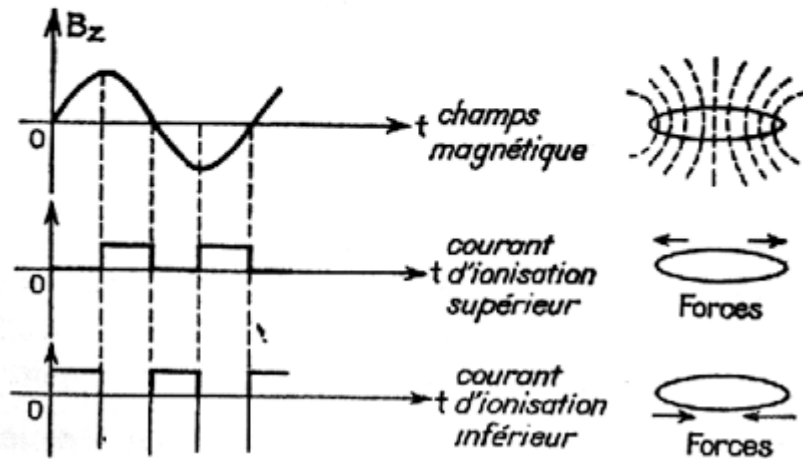


Fig. 3

On the next figure, the expected induced gas flow; around our disk-shaped machine :

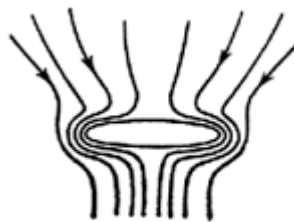
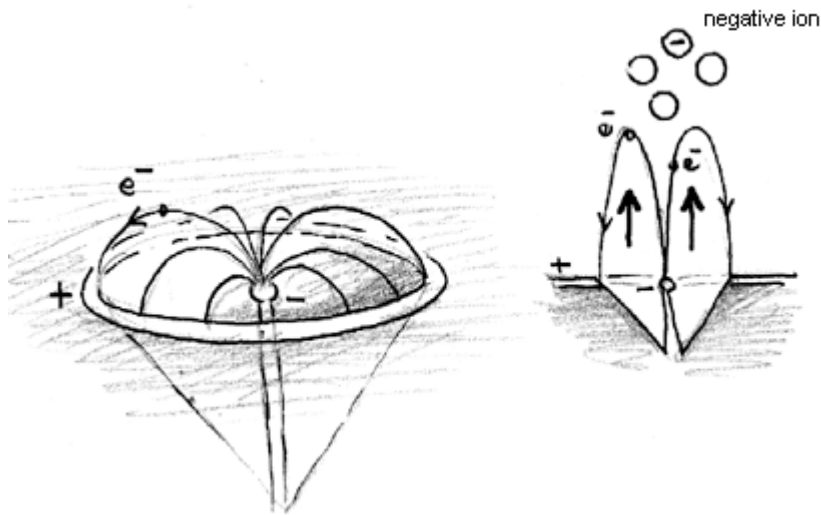


Fig. 4

The computations said that the suction effect could be very strong, strong enough to cancel any shock wave formation at the stagnation point of the machine (it moves along its axis). The technical problem was to modulate the ionization at the vicinity of the wall, in time. We imagined first a device looking like a "wolf trap" :



Imagine a "small size" conical hole, in the wall and, along its axis, a "pin". At the junction cone-plane, a circular electrode (anode). The central electrode (pin like) is charged negatively. Then an electric discharge forms in the surrounding air, as shown above. The subsequent magnetic field, associated to this electric discharge, tends to push the free electrons away and to give them energy. We thought that it could produce short lifetime negative ions in air, making possible MHD interaction during the lifetime of such ions. In a well equipped lab such research could have been carried out, but we had none. Since 1973 I was in an astronomical observatory, which is not an optimum place to perform plasma physics experiments.

Anyway, at this end of the seventies, some interesting aspect of the machine was discovered. Good plasma specialists know that magnetic pressure tends to blow away electric discharges. We experienced that in low pressure air experiments. The solution was rapidly found. Instead creating a B field whose maximum value was in the symmetry plane (created by a single equatorial coil), we decided to use three, a big one and two smaller, as shown on the next figure :

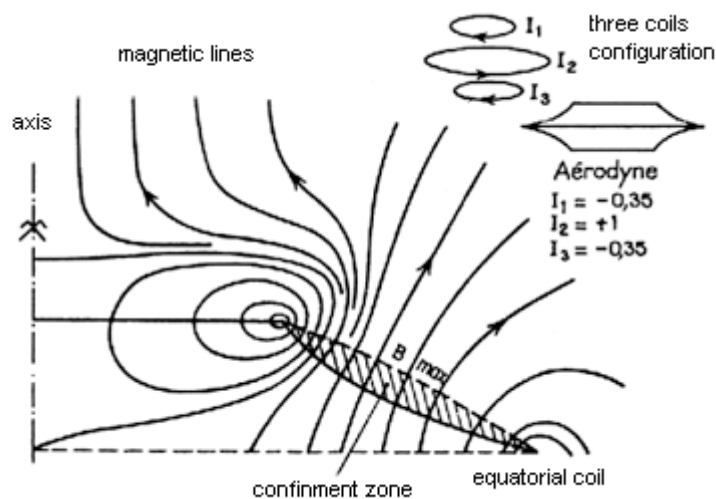
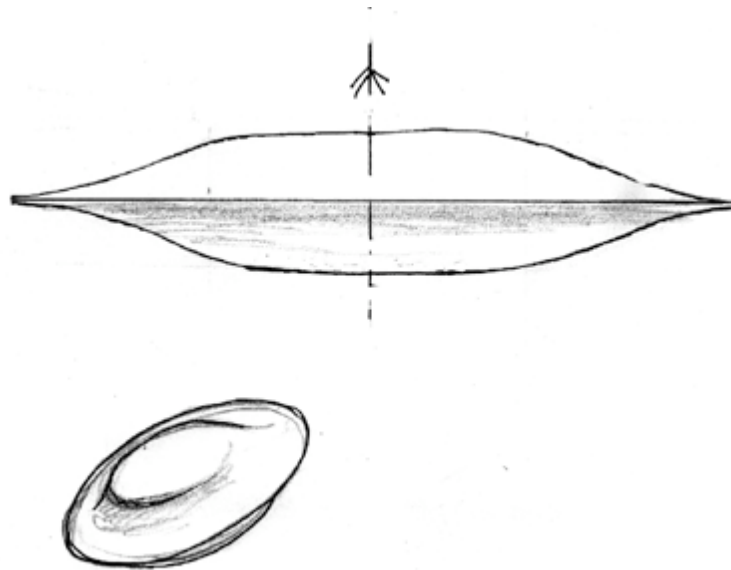


Fig. 5

Left : the axis of the machine. Up and right, the schematic disposition of the three coils, showing the way the electric currents flow in. On the figure, the magnetic lines. We see that the maximum B surface is close to a portion of a cone (containing the circles of two coils). Gray area : the confinement volume, in which the plasma tends to lie. Immediate success, experimentally. Then the wall of the machine, to optimize the MHD interaction, must be orthogonal to the magnetic lines. Finally, this is the typical aspect of our electrodeless MHD aerodyne, using induction phenomena and pulsed

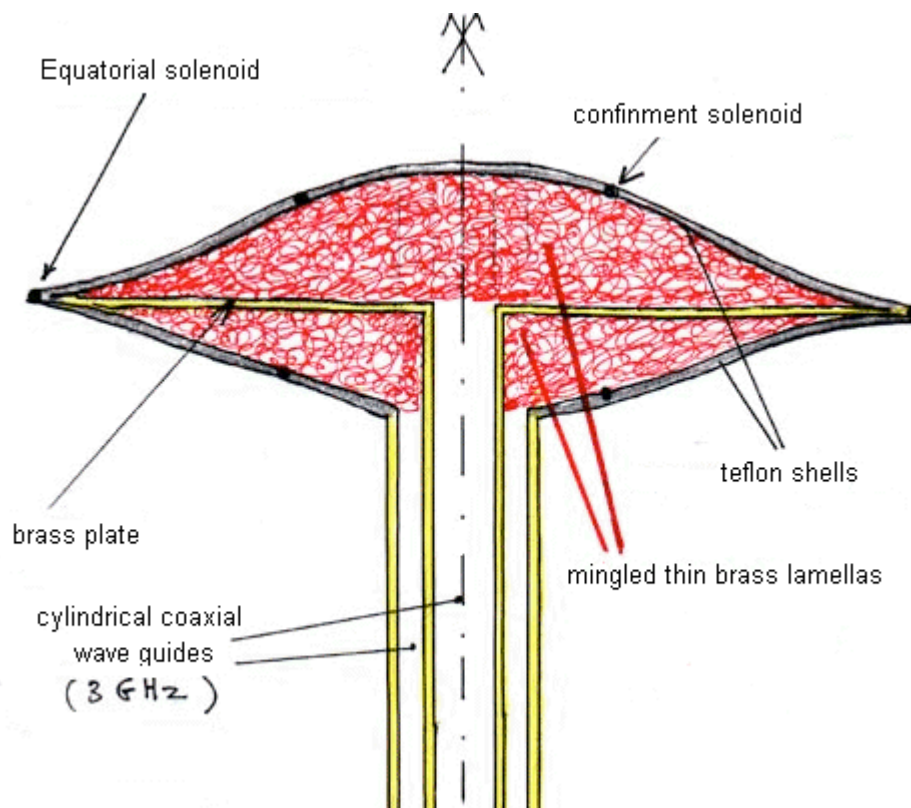
ionization, optimized on MHD grounds :



You see why we got some problems with the scientific community, army, politicians, and so on. Short-duration ionization was difficult to manage.

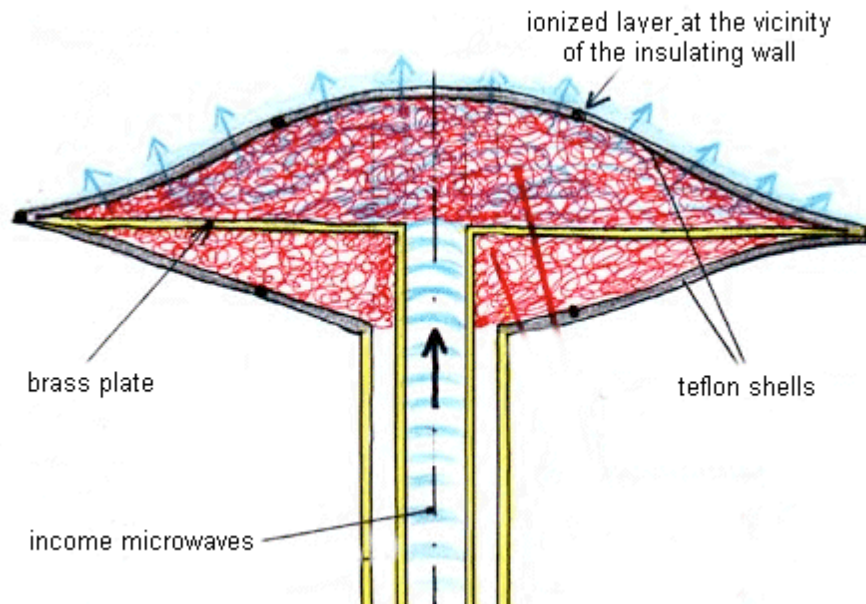
Cold gas MHD experiments.

But, recently, a new idea came, which is summarized on the following figure :

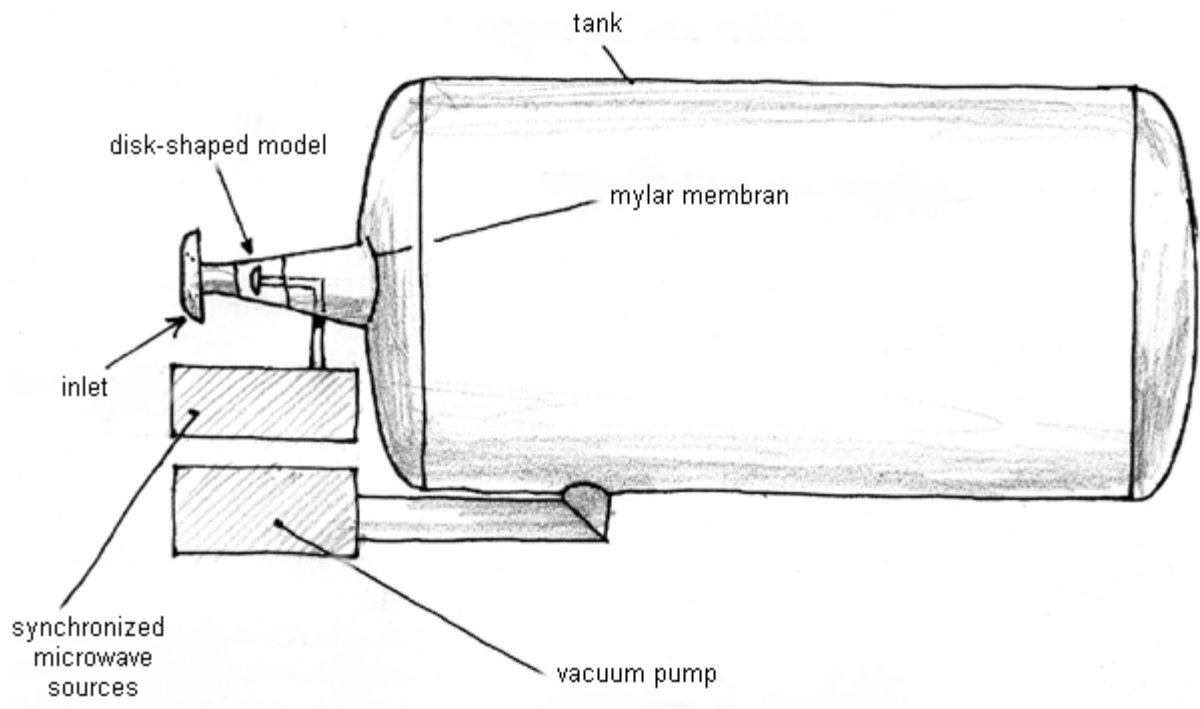


The walls of the model are teflon made. In the two teflon shells, coils are imbedded (the equatorial one and the two "confinement coils"). Two klystrons will be used, corrected to two separate wave

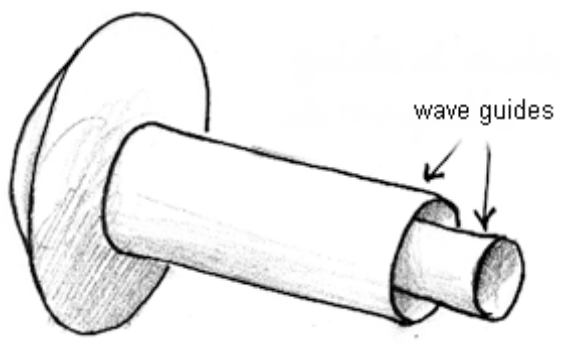
guides. These two are shown on the figure. They are coaxial brass cylinders. When one is in operation, the second one is out, and so on. Mingled thin brass lamellas (red) act as a diffuser and spray microwaves. The brass plate located in the plane of symmetry prevents the microwaves used to ionize the air on the opposite side of the machine. On next figure we show the model when the microwaves flow along the central channel, are diffused by the thin mingled brass lamellas, at the top part, cross the teflon then and create a thin layer of ionized air. 3 GHz microwaves are optimum to ionize atmospheric pressure air, and ionized gas absorbs microwaves. That's for the ionization will be confined in a thin layer.



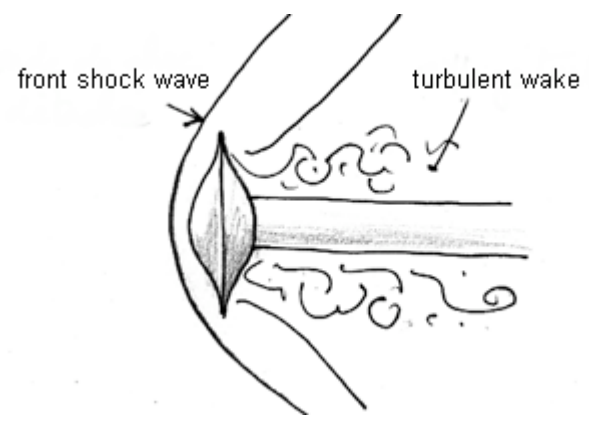
It seems relatively simple, with such device, to create time-dependant ionization state at the vicinity of a disk-shaped model. It is simple, too, to synchronize the alternative electric currents in the three coils. So that such model could suck the air just in front very strongly. Depends on the intensity of the magnetic field, of course (the MHD interaction parameter must be strong enough). It is not necessary to cancel de shock waves during a long time. Only short duration tests can be operated, in a short duration wind tunnel. We will have to build it. Schematically, this wind tunnel is based on a big vacuum tank, whose content is removed, at each test, by a powerful vacuum pump (we already have it). Left : the supersonic channel. Between the channel and the tank : a mylar mebran. When the pumps makes the pressure low enough in the tank, the membrane breaks. Typical duration of the flow : several tenth of second.



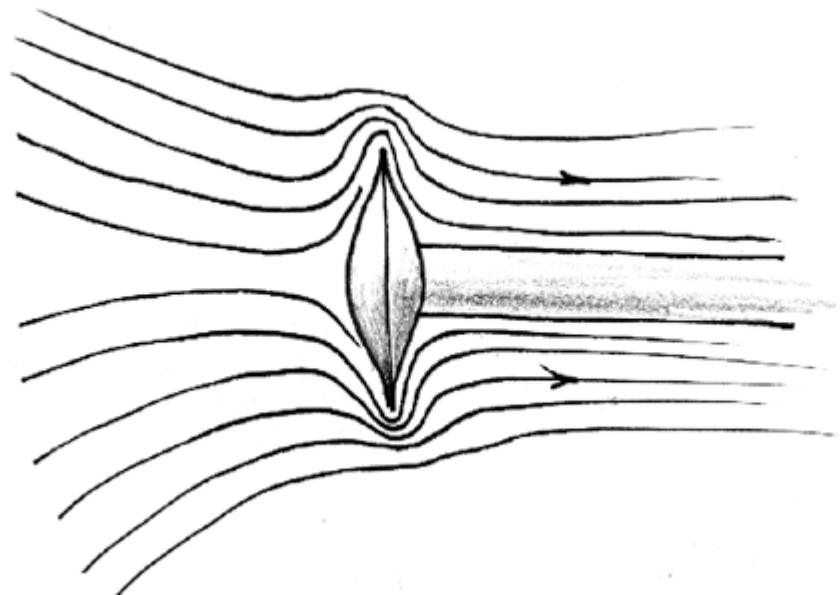
This simple idea was exciting enough to decide to restart MHD research. Next image : another view of the disk-shaped model :



Next : expected gas flow, around a "passive" model. Schock waves system.



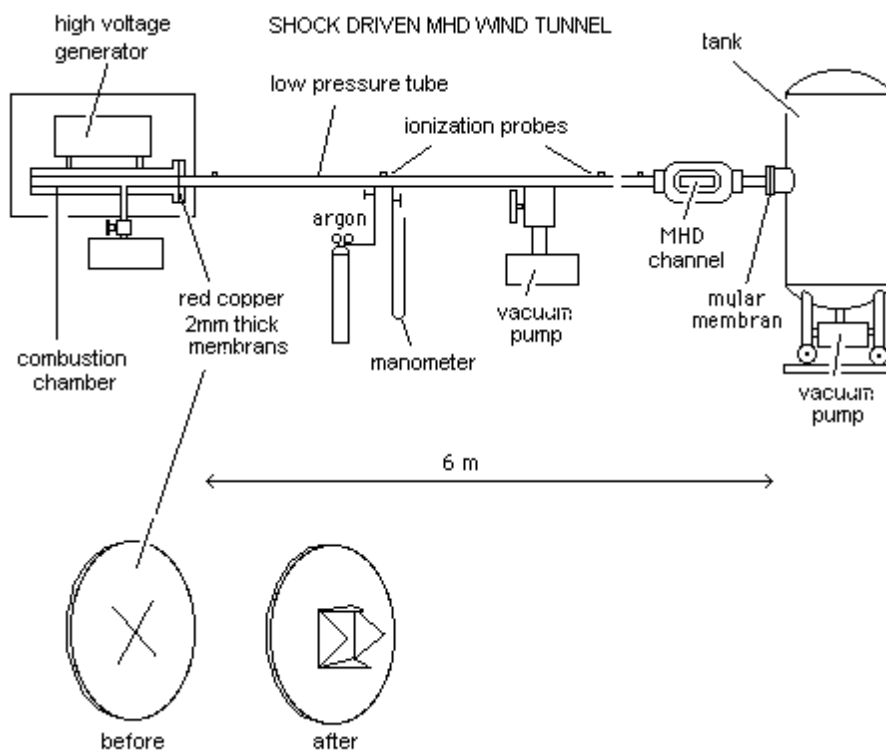
Next : the flow, after shock wave cancellation by Lorentz forces action :



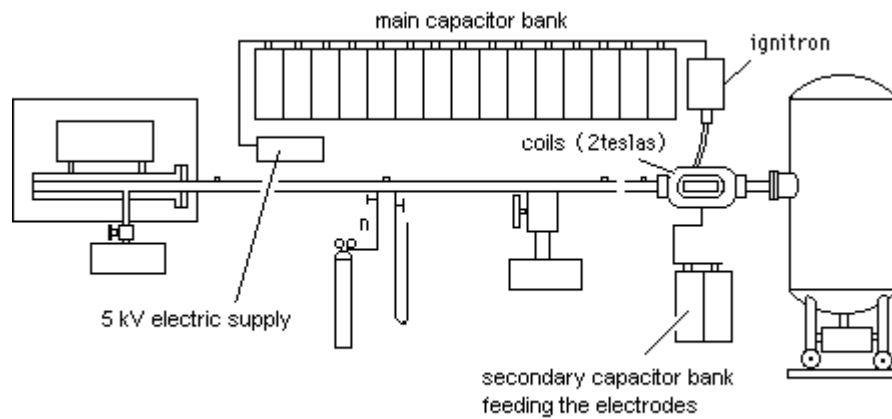
We have planned to make experiences on "MHD hydrodynes", i.e. large velocity submarines.

Hot gas MHD experiments.

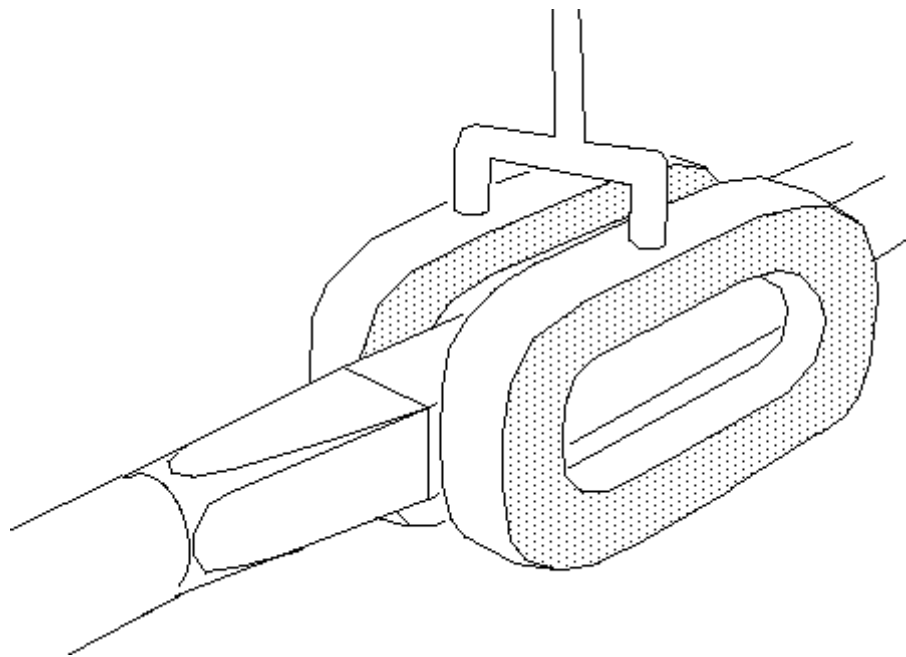
In the lab a shock driven wind tunnel will be built (so-called shock tube). On the next figure, a schematic view of the MHD plant.



Next figure : the MHD part of the plant.

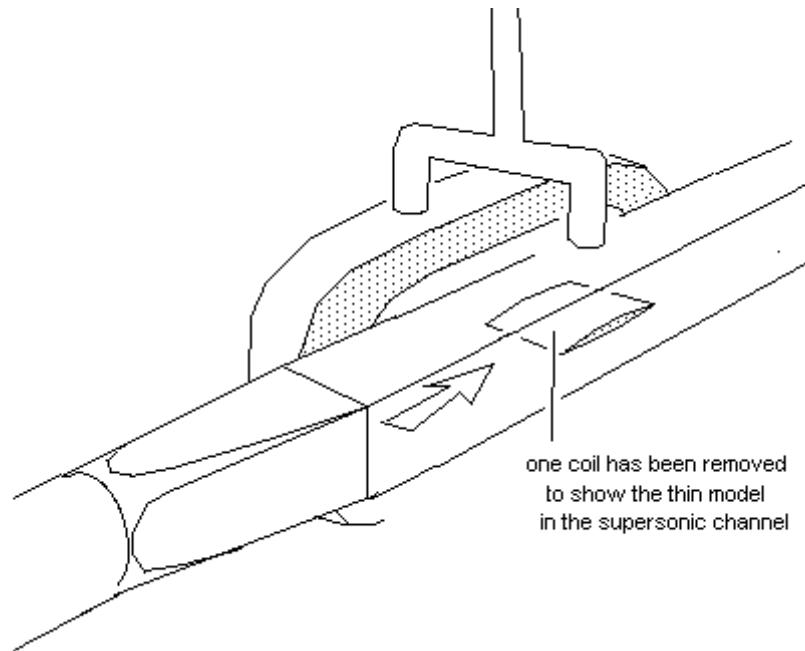


The next image shows the two coils and the MHD channel :



In such plants, in 1967, plasma accelerations had been successfully operated at the Institut de Mécanique des Fluides de Marseille, evidencing the efficiency of the Lorentz forces to control a supersonic flow. Inlet velocity (pure argon, one bar, $10,000^{\circ}\text{K}$) : 2750 m/s. Outlet velocity : 8000 m/s !!

Next, the position of the flat wing model in the supersonic wind tunnel, in the experience planned in 1987 :



The phd thesis of Bertrand Lebrun (1987), publications in the European Jr of Mechanics, plus two presentations in international MHD meetings (Tsukuba, 1987, Pekin, 1990) focussed on front shock wave cancellation if hot argon flow (10,000°K) provided by a shock driven wind tunnel. Today we intend to set up this key-experiment. Schematically the existence of an attached shock, at the front part of some sort of "wing" (2d flow) can be evidenced by laser interferometry (developped in the Institute of Fluids Mechanics of Marseille in 1965). On the right, the picture we expect to get, is the front shock is cancelled in this hot argon flow.



fringe jump revealing the presence of the shock wave



no fringe jump

As we have now the (theoretical) possibility to operate in cold gas, this experiment in hot argon can seem superfluous. But we prefer to deal with these two goals, as "parallel researchs".

[Back to scientific summary](#)