

LES PROBLÈMES POSÉS PAR LES ÉCOULEMENTS DANS LES AMPLIFICATEURS A FLUIDE

Étude bibliographique

PAR T. LE MARÉCHAL *

INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, on parle de plus en plus « d'amplification fluide ». On a développé de nombreux dispositifs où ne sont en mouvement que des fluides (gaz ou liquides) à l'exclusion de toute pièce mobile solide (clapets, billes, ressorts...) et permettant des opérations semblables à celles effectuées par les circuits électroniques : fonctions logiques ou amplification continue par exemple.

Ces dispositifs très variés mettent en jeu des phénomènes divers connus depuis fort longtemps, ce qui a permis à certains chercheurs de se rendre compte qu'ils faisaient de l'amplification fluide comme M. Jourdain de la prose...; ceci explique également que la paternité de ces nouvelles techniques soit revendiquée simultanément par de nombreuses personnes.

En fait, on doit reconnaître que le développement de ces méthodes est dû en grande partie à l'essor des industries spatiales. Tous ces dispositifs sûrs et robustes sont en effet précieux pour assurer le contrôle d'engins soumis à des conditions particulièrement sévères. Les laboratoires américains intéressés ont donc mis au point des amplificateurs basés sur des principes très différents, à partir d'astuces quelquefois signalées dans des travaux très anciens.

Un trait caractéristique des études menées dans le domaine des amplificateurs fluides est qu'elles sont souvent poussées en vue de l'obtention rapide de résultats directement applicables. Le point de vue théorique est généralement sacrifié, alors que les études expérimentales sont fort nombreuses et naturellement un peu dispersées. Il semble que maintenant un effort d'organisation et de synthèse soit assez généralement fourni en vue de l'élaboration de théories permettant de perfectionner de manière logique les performances des premiers dispositifs, naturellement assez sommaires.

Nous allons tout d'abord passer en revue les différentes sortes d'amplificateurs fluides mis au point à ce jour et en tenter une classification. Puis, nous nous arrêterons longuement sur les dispositifs utilisant les phénomènes d'attachement ou de décollement d'un jet qui ont fait l'objet de nombreuses études à caractère tant théorique qu'expérimental. Nous insisterons moins sur les autres dispositifs étudiés de façon beaucoup moins théorique.

LES DIFFÉRENTS AMPLIFICATEURS; ESSAI DE CLASSIFICATION

De nombreux auteurs ont fait un essai de classification des différents dispositifs. Les références [1 à 6] présentent également des descriptions succinctes des amplificateurs. L'article de Kadosch [1] en français est assez remarquable de précision et de concision. La fonction essentielle d'un amplificateur fluide est la commande d'un écoulement de fluide par un autre écoulement. Evidemment, l'écoulement de commande sera moins puissant que l'écoulement commandé, de même que, par exemple, le courant de grille dans une lampe triode peut commander des courants électriques beaucoup plus importants. On pourra ainsi définir les :

- gain en débit,
- gain en pression,
- gain en quantité de mouvement,
- gain en puissance d'un amplificateur fluide (voir [1] page 81), chaque dispositif possédant ses qualités particulières.

D'autre part on peut classer les appareils suivant les fonctions qu'il réalisent :

- amplificateurs « proportionnels » délivrant un signal de sortie dépendant de façon continue du signal d'entrée;
- amplificateurs « tout ou rien », basculant à partir d'un seuil du signal de commande.

Il semble plus intéressant pour notre étude de regrouper les différents dispositifs suivant les phénomènes physiques mis en jeu. Les problèmes théoriques que peuvent poser les améliorations possibles sont communs aux appareils utilisant le même phénomène, quelles que soient les fonctions réalisées.

Nous avons donc retenu la classification suivante : (un schéma de principe de chaque dispositif figure sur la planche I).

Les amplificateurs à déviation de jet.

Le jet de commande fait dévier le jet de puissance. Le débit dans une des deux sorties varie de façon continue avec le débit du jet de commande. En fait, les amplificateurs sont construits avec deux entrées de commande symétriques par rapport à l'axe du jet de puissance.

Le fonctionnement des dispositifs basés sur ce phénomène est très simple. Mais si l'on n'utilise que le phénomène de base (composition des quantités de mouvement) on obtient des performances médiocres : gains en débit et en pression de l'ordre de 5 à 10 et,

* Direction des Etudes et Recherches, E.D.F., Chatou.

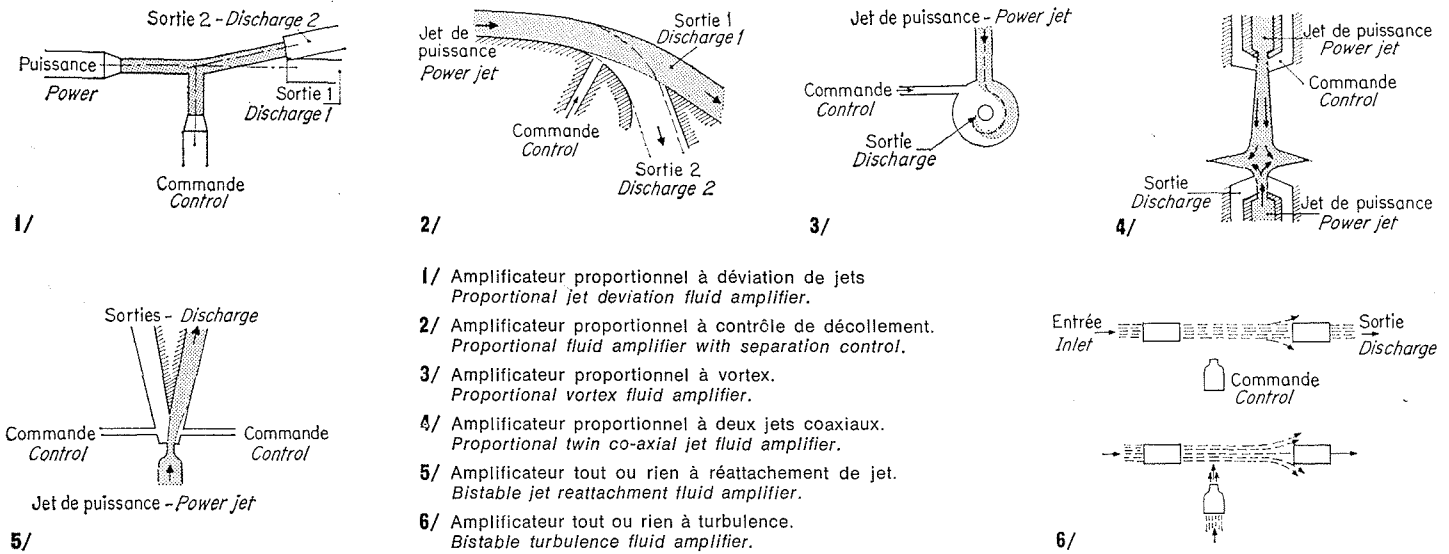


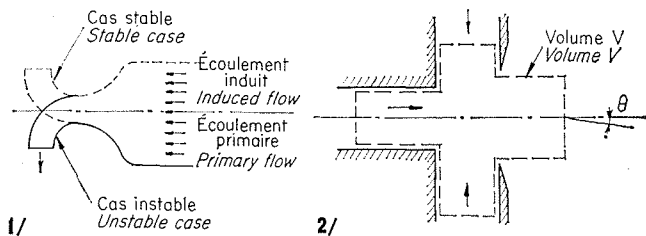
Planche I/ Les différents types d'amplificateurs fluides / *Fluid amplifier types.*

surtout, on a des difficultés à grouper les amplificateurs de manière à réaliser plusieurs étages d'amplification. On verra plus loin comment l'on peut améliorer ces appareils.

Les amplificateurs à contrôle de décollement.

Une couche limite qui se forme sur un obstacle convexe tend à décoller en un point bien déterminé en l'absence de toute action extérieure. Mais, par un procédé tel que soufflage et aspiration, on peut faire déplacer le point de décollement d'une quantité suffisante pour faire dévier le jet résultant d'un angle important (voir le croquis de la planche I).

La Giannini Controls Corp. a mis au point un dispositif basé



- 1/ Etude expérimentale de Margolis [8].
Experimental study by Margolis [8].
- 2/ Expériences de Moynihan et Reilly [10].
Experiments by Moynihan and Reilly [10].
- 3/ Schéma de calcul de Peperone et al. [12].
Calculation scheme by Peperone (al.) [12].
- 4/ Amplificateur proportionnel étudié par Paulin [13].
Paulin's proportional fluid amplifier [13].

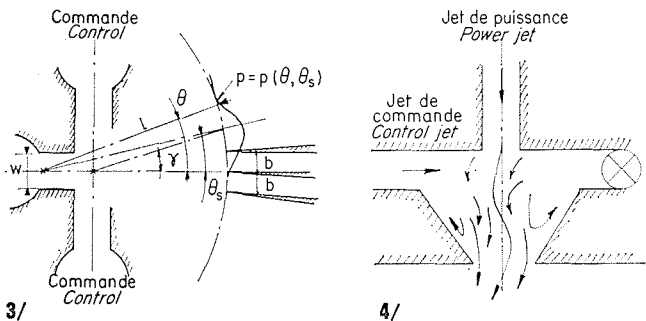


Planche II/ Etudes concernant la composition des jets.
Jet composition studies.

sur ce principe, capable de grandes performances. En particulier, le gain en débit peut être très élevé (~ 200). Malheureusement, le gain en pression reste médiocre, ce qui donne un gain en puissance moyen. Un inconvénient de ces dispositifs est leur grande complexité. Il semble cependant, comme nous le verrons plus loin, qu'ils se prêtent fort bien à des études théoriques assez poussées.

Les amplificateurs à vortex.

En absence de jet de commande, l'écoulement au travers du système se fait avec une perte de pression relativement faible. Mais, dès que l'on applique un jet de commande, cette perte de pression singulière augmente énormément.

Le principe de ce dispositif était connu depuis fort longtemps et en particulier sous le nom de « diode Tesla », du nom de son inventeur: si l'on supprime l'entrée marquée « puissance » le fluide s'écoule plus facilement dans le sens sortie-commande que dans l'autre. On conçoit que plusieurs de ces « diodes » groupées peuvent jouer le rôle de clapet anti-retour, sans pièce mobile. Le pulso-réacteur « Escopette » est basé sur un principe analogue (voir description [1] page 79).

Les amplificateurs à jets coaxiaux.

Deux jets coaxiaux ont une zone d'interaction très « sensibilisée ». Une très faible action du jet de commande fait déplacer cette zone, ce qui a pour effet d'augmenter le débit et la pression dans l'orifice de sortie. Avec des dispositifs basés sur ce principe, on arrive à des gains très importants tant en débit qu'en pression. Une variante de ce dispositif consiste à placer le jet de commande perpendiculairement à l'axe commun des deux jets de puissance.

Les amplificateurs à réattachement.

Ce sont des amplificateurs à bascule « tout ou rien » basés sur l'effet Coanda ou le réattachement d'un jet libre à une paroi inclinée. Suivant la géométrie des éléments, en l'absence de jet de commande, le jet de puissance a tendance à s'attacher à l'une ou l'autre des parois ou au contraire à se diviser. Une augmentation de pression dans la « bulle » de séparation a pour effet de faire basculer le jet vers l'autre sortie. Les problèmes attachés à ces dispositifs concernent la pression de basculement, que l'on veut la plus faible possible, et le temps de réponse. On peut grouper de tels amplificateurs en vue de réaliser des ensembles de comptage par exemple ou des multivibrateurs. Un système de respiration artificielle utilise des amplificateurs de ce type, remplissant des fonctions logiques comme un système électronique: l'avantage est qu'il n'existe aucune pièce mobile telle que vanne ou clapet.

Les amplificateurs à turbulence.

Mis au point par R.N. Auger, ces dispositifs sont particulièrement simples: un jet libre est reçu en presque totalité dans un orifice. Lorsque ce jet est rendu turbulent par l'impact d'un jet de très faible puissance, le débit de sortie s'annule pratiquement.

Cet appareil peut avoir des dimensions géométriques particulièrement réduites et se prête facilement à la construction d'ensembles logiques élaborés. On peut l'utiliser également pour détecter des distances, des niveaux sans aucun contact matériel avec des pièces (usinage par exemple). Un inconvénient de ce système est son temps de réponse particulièrement important.

Voici donc les six classes d'amplificateurs que nous avons retenues. Nous pouvons faire les remarques suivantes :

— Certains ne paraissent susceptibles d'aucun perfectionnement tout au moins dans leur fonctionnement théorique. Ce sont les amplificateurs à turbulence;

— D'autres n'ont été réalisés qu'en vue d'applications pratiques bien précises et pour le moment n'ont pas fait l'objet d'une théorie unifiée. Ce sont les amplificateurs à vortex et à jets coaxiaux;

— Par contre, les amplificateurs mettant en jeu les phénomènes d'interactions de jets par échange des quantités de mouvement et les phénomènes de détachement et de réattachement, ont intéressé un grand nombre de chercheurs en mécanique des fluides. Nous insisterons particulièrement sur les dispositifs basés sur ces phénomènes.

LES AMPLIFICATEURS BASÉS SUR LA COMPOSITION DES JETS (planche I, 1)

En fait, tous les amplificateurs fluides sont basés sur l'interaction de plusieurs jets qui en général met en cause plusieurs phénomènes :

- échange des quantités de mouvement,
- forces de viscosité (couche limite et jets libres),
- forces centrifuges,
- turbulence,
- forces de pression.

Chaque type d'amplificateur est basé sur un phénomène dont l'effet semble prépondérant, ici l'échange des quantités de mouvement. Mais les phénomènes secondaires ont parfois des effets très importants : ici les forces de viscosité dans les jets libres et les forces centrifuges dues à la courbure des jets. J. E. Cox [7] rappelle les différentes caractéristiques des jets libres et en particulier montre l'importance de la dissipation visqueuse dans les amplificateurs fluides. D. P. Margolis [8] s'est intéressé à un problème particulier concernant les amplificateurs fluides : l'entraînement par mélange turbulent lorsque l'écoulement moyen est courbe. Son étude expérimentale montre l'existence d'un écoulement « stable » et d'un écoulement « instable » (pl. II, 1). Dans ce dernier cas, la quantité de fluide entraînée est bien plus importante et l'énergie dissipée par turbulence plus faible. Mais il ne s'agit que de résultats partiels qui ne peuvent être appliqués directement au calcul des amplificateurs utilisés. Une autre étude partielle concernant les jets a été réalisée par Moynihan [9] qui a recherché l'influence de l'interaction de plusieurs jets sur les fluctuations de pression totale dans le jet « principal ». Il montre notamment que cette influence n'est guère sensible, à condition que les différences de vitesse des deux jets soient faibles, le « bruit » étant dû à des gradients de vitesse importants (point d'inflexion dans le profil de vitesse).

Moynihan et Reilly [10] ont fait une étude expérimentale assez soignée pour rechercher l'influence des différentes forces sur l'angle de déviation du jet de puissance en appliquant le théorème des quantités de mouvement au volume V (Pl. II, 2). Leur résultats sont les suivants pour trois cas d'écoulement :

| Cas n° | 1 | 2 | 3 | |
|----------------|------|------|-------|--|
| mesuré | 4,8° | 4,3° | 17,4° | |
| calculé. . . . | 4,6° | 4,2° | 16,8° | (sans rien négliger) |
| | 3,9° | 4,2° | 20,6° | (en négligeant les forces centrifuges) |
| | 1,5° | 2,4° | 17,5° | (en ne tenant compte que des quantités de mouvement) |

Ceci montre bien l'importance des forces de pression et des forces centrifuges lorsque l'on a affaire à de faibles déviations.

Une autre façon d'aborder le problème est de considérer l'écoulement comme un écoulement à potentiel de vitesse avec limites « libres » suivant la théorie de Kirchhoff. Cronin [11] a fait un certain nombre de calculs pour différentes dispositions et il semble que ses résultats soient très satisfaisants. L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de prévoir la forme de l'écoulement, alors que Moynihan et Reilly [10] ne faisaient que constater expérimentalement bon nombre de faits expérimentaux. Il reste cepen-

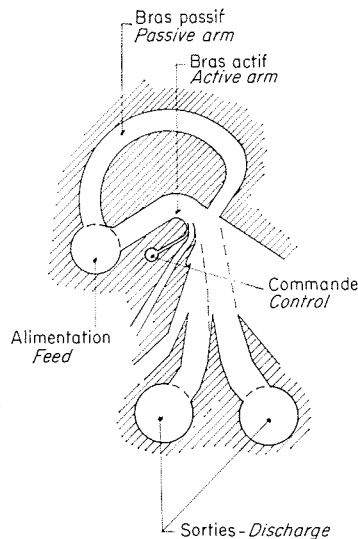
dant que la viscosité joue un rôle important dont il n'est pas tenu compte dans l'écoulement à potentiel de vitesses.

Une étude plus complète de ces phénomènes est celle de Peperone et al. [12], car ils se préoccupent tout d'abord de la déviation de l'axe du jet de puissance due à l'interaction des jets de commande (à peu près de la même façon que Moynihan et Reilly [10]) et ensuite ils font intervenir la théorie des jets libres pour évaluer la quantité de fluide recueillie par l'une ou l'autre sortie, en fonction de la géométrie du dispositif et des profils de vitesse dans le jet résultant (planche II, 3). Les résultats théoriques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, tout au moins lorsque les pressions ou les débits des jets de commande sont faibles par rapport à ceux du jet de puissance. Le modèle théorique permet de faire une étude d'optimisation du dispositif, dont les conclusions principales sont les suivantes :

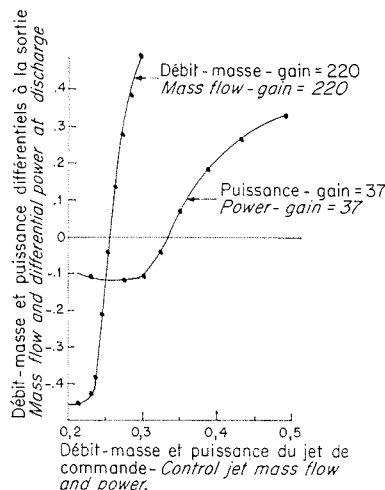
- les gains maximaux sur lesquels on peut compter sont de l'ordre de 10, en débit comme en pression;
- les gains sont maximaux lorsque la déviation est minimale ($\gamma \cong 0$);

— le gain en puissance est maximal pour $l = 11w$ et $b = 1,5w$. Avec cette étude, on voit apparaître un défaut des amplificateurs mettant en jeu l'échange des quantités de mouvement de deux jets libres : ils ont des gains en débit faibles. C'est ce qui a amené Pavlin [13] à expérimenter un dispositif mettant en jeu également les phénomènes d'attachement à une paroi (voir schéma sur la planche II, 4). L'étude théorique de l'écoulement n'a pas été faite, mais l'auteur assure des gains en débit de l'ordre de 10 à 100, soit dix fois plus importants que pour les dispositifs habituels.

Dans ce paragraphe, il faut encore citer les études de Sheeran et Dosanjh [14] et de Olson et Miller [15] qui ont porté sur l'interaction de jets compressibles. Dans ce cas, le problème est beaucoup plus compliqué du fait que l'on ne peut plus négliger les effets de viscosité et que des ondes de choc apparaissent. Les résultats sont surtout intéressants en vue de leur application à la commande des jets propulsifs de fusées.



1/ Schéma de principe. Diagrammatic layout.



2/ Gains différentiels du D.L.E.A. (Les grandeurs sont rapportées aux grandeurs caractéristiques du jet de puissance.) Differential gain of D.L.E.A. (Relative to characteristic power jet values.)

Planche III/ Amplificateur type D.L.E.A. d'après [16]. Double-Leg Elbow Amplifier by [16].

LES AMPLIFICATEURS BASÉS SUR LE CONTROLE DU DÉCOLLEMENT D'UN JET

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que les effets de parois étaient généralement considérés comme gênants et on les évitait le plus possible en évitant au maximum les amplificateurs dans la zone d'interaction des jets (sauf pour le dernier appareil cité par Pavlin [13]).

Ici, c'est le contraire; on va se servir essentiellement des parois pour commander le jet. Ce principe va se révéler beaucoup plus efficace: le « Double-leg elbow amplifier » a des performances exceptionnelles: gain en débit de l'ordre de 200 ou 300 et en puissance de l'ordre de 50. La planche III montre le principe de ce dispositif tel que le décrivent Zisfein et Curtiss [16]. Le débit d'alimentation est partagé en deux: une partie peut être commandée par contrôle de décollement dans le bras actif avant de rejoindre le reste du débit qui a emprunté le bras passif. Ces deux débits partiels composent leurs quantités de mouvement et sortent par les deux orifices en se partageant dans un rapport qui dépend du débit de commande. On voit que le D.-L. E. A. utilise également le principe de composition des jets, mais le phénomène essentiel est bien la commande de la position du point de décollement qui a lieu dans le coude du D.-L. E. A.

En fait ce phénomène pose deux problèmes: la position du point de décollement et ensuite l'influence d'un jet de commande, et ces deux problèmes sont loin d'être résolus. B. G. Newman [17] étudie l'attachement d'un jet à un cylindre (planche IV, 1) en fonction des différents paramètres (dimensions géométriques, vitesses, pressions). Il montre, en utilisant l'analyse dimensionnelle, que la position du point de décollement dépend de deux paramètres adimensionnels, un « nombre de Reynolds » un peu modifié et le rapport b/a (voir notations sur la figure). Les résultats expérimentaux le poussent à affirmer que pour les valeurs b/a faibles, seul le nombre de Reynolds intervient et pour les nombres de Reynolds importants, seul b/a influe sur la position du point de décollement. Dans ce dernier cas la loi proposée par Newman semble donner uniquement des indications qualitatives.

Les constatations expérimentales de Kadosch [18] sur ce phénomène sont assez intéressantes. Il distingue l'attachement sans déviation et l'attachement avec déviation de la direction moyenne du jet. La déviation n'a lieu que lorsque le rayon du cylindre est supérieur à trois fois l'épaisseur du jet.

Les deux notes que nous allons maintenant examiner traitent le problème de façon un peu plus théorique. Dans la première, Curtiss et al. [19] considèrent un écoulement dans un tuyau coudé tel que celui représenté sur la planche IV, 2 (il s'agit toujours d'écoulement bidimensionnel). Ils supposent que l'écoulement est limité d'un côté par la paroi de la conduite et de l'autre par une ligne qu'ils approchent par un arc de cercle tangent à la deuxième paroi au début du coude (ils supposent ainsi que le décollement a lieu à cet endroit, ce qui est plausible, étant donné la faible valeur du rayon de courbure). Pour déterminer complètement l'arc de cercle ils appliquent le théorème de Bernoulli à l'écoulement dans la conduite, de manière à calculer la section contractée à la sortie en tenant compte de la perte de pression mesurée expérimentalement. Ayant alors les limites de l'écoulement, ils ont calculé les différents paramètres en le supposant à potentiel de vitesses: pression à la paroi de la conduite, inclinaison de la vitesse à la sortie; les résultats obtenus sont confirmés dans une certaine mesure par l'expérience. On pourrait alors effectuer un calcul de couche limite pour, en particulier, déterminer l'emplacement du point de décollement. Malheureusement, cela n'a pas

été fait. Les auteurs ont abordé le problème de la commande par un écoulement secondaire de la même façon, mais ils se sont heurtés à de grosses difficultés et les hypothèses à faire, notamment sur la forme de la ligne limite de l'écoulement principal, sont un peu arbitraires.

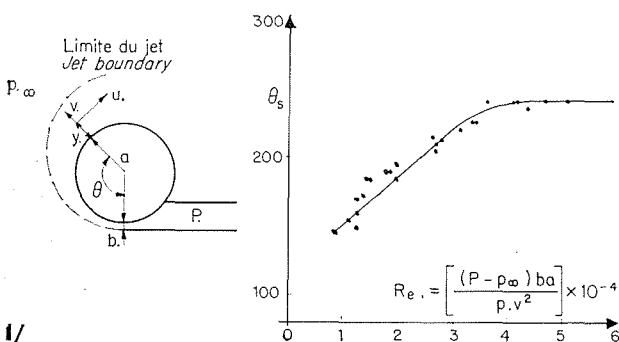
Kadosch [20] a opéré d'une manière un peu semblable en cherchant par le calcul à déterminer l'écoulement « potentiel » limité par des lignes de courant libres (de Helmholtz-Kirchhoff). Son schéma de calcul, un peu différent, est donné sur la planche IV, 3. Il se fixe *a priori* le point F de raccordement d'une des lignes de courant et l'écoulement est entièrement déterminé. Mais le gradient longitudinal de pression augmente indéfiniment au voisinage de F, ce qui placera le point S de décollement, calculé par la théorie de la couche limite, toujours en amont de F, si l'on prend pour point de départ les pressions calculées par la méthode de l'écoulement potentiel. En fait, Kadosch s'en tire en modifiant le critère de décollement de la couche limite turbulente et, finalement, les déviations calculées semblent proches des déviations observées pour le jet principal. Il est à noter que le calcul du point de décollement tient compte du nombre de Reynolds de l'écoulement (par l'intermédiaire du critère de décollement de la couche limite turbulente), alors que Newman [17], par exemple, ne s'intéressait au décollement qu'après avoir admis qu'il était indépendant du nombre de Reynolds au-delà d'une certaine limite. Malheureusement, il semble difficile d'adapter cette méthode pour le cas où il y a commande du décollement par un écoulement auxiliaire.

LES AMPLIFICATEURS A RÉATTACHEMENT DE JET

Ces dispositifs sont essentiellement utilisés comme amplificateurs « tout ou rien » ou « bistables » et deux problèmes intéressent les utilisateurs: les caractéristiques géométriques du phénomène (c'est-à-dire essentiellement la position du point de réattachement en fonction de la forme de l'appareil ainsi que la pression dans la zone de décollement) et les caractéristiques dynamiques (temps de réponse).

Pour le premier de ces problèmes une façon de le traiter est présentée par Bourque et Newman [21] qui utilisent les dispositifs indiqués sur la planche V, 1. Dans leur étude expérimentale, ils mesurent essentiellement la distance x_R et la pression p_R . Ils essaient ensuite d'expliquer les résultats au moyen de l'analyse dimensionnelle et de la théorie des jets. Et, finalement, ceci est cohérent et relativement simple à utiliser. Pedersen [22] et Sher [23] ont poursuivi avec des calculs du même genre, mais en compliquant les hypothèses. Le premier a introduit un écoulement de commande dans la « cavité » en négligeant l'échange des quantités de mouvement entre les deux jets. Le second a tenu compte de cet échange de quantités de mouvements. Les résultats obtenus ont toujours la même forme; seul le domaine d'application varie. Les données expérimentales confirment généralement le calcul, à condition de bien choisir un certain nombre de coefficients plus ou moins arbitraires.

La méthode de calcul exposée par Yih-O-Tu et Cohen [24] est plus ambitieuse, qui veut rechercher la forme de l'écoulement en supposant l'existence d'un potentiel de vitesse. Ceci n'est possible que si l'on suppose l'existence d'un jet « ré-entrant » fictif évidemment. L'approximation faite dépendra du débit de ce jet fictif: plus faible il sera, meilleure sera la précision. Cox et Clayden [25] avaient d'ailleurs appliqué cette méthode au calcul des cavités qui apparaissent sur un dièdre pour différentes incidences. Leurs résultats semblaient encourageants.



- 1/ Décollement du jet d'après B. G. Newman [17].
Jet separation according to B. G. Newman [17].
- 2/ Schéma adopté par H. A. Curtiss et al. [19].
Scheme adopted by H. A. Curtiss et al. [19].
- 3/ Schéma adopté par M. Kadosch [20]. (Décollement sans injection.)
Scheme adopted by M. Kadosch [20]. (Separation without injection.)

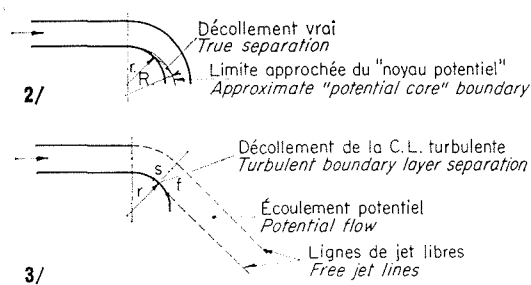


Planche IV / Etudes concernant le décollement d'un jet attaché à une paroi courbe / Studies of jet separation from a curved wall.

Yih-O-Tu et Cohen [24] ont donc proposé trois schémas d'écoulement qui peuvent donner lieu à un développement (planche V, 2) :

I : le débit de commande se sépare en deux : une partie rejoint le jet principal, l'autre devient jet « ré-entrant » ;

II : tout le débit de commande devient jet « ré-entrant » ;

III : le débit de commande est négligeable (seule la pression est imposée), une partie du débit principal devient jet « ré-entrant ».

Yih-O-Tu et Cohen ont résolu le cas III, le plus simple, et ont déterminé un certain nombre de paramètres de l'écoulement en fonction de la géométrie du dispositif. En général, ils trouvent des valeurs pour s_1 , légèrement inférieures à celles mesurées par Newman [17]. Les valeurs du débit des jets « ré-entrant » sont très faibles : toujours inférieures à 2% du jet principal.

Mais les calculs sont très longs et la résolution des schémas I et II montre encore de nouvelles difficultés. Il ne semble pas que l'on puisse dès maintenant se baser sur de tels calculs pour utiliser les amplificateurs.

Aussi, des méthodes expérimentales ont-elles été développées pour tester les différents dispositifs. Par exemple, Bermel et Brown [26] publient un exemple des recherches effectuées pour déterminer de façon précise les caractéristiques d'un amplificateur destiné à une fonction bien déterminée : convertisseur binaire-décimal. Denker [27] montre comment faire un avant-projet d'amplificateur fonctionnant en écoulement sonique : Olson et Stoeffler [28] s'intéressent également aux écoulements compressibles, mais surtout du point de vue temps de réponse. Le comportement dynamique de ces amplificateurs est d'ailleurs un des sujets de préoccupation de nombreux chercheurs et expérimentateurs et des essais de calcul des temps de réponse donnent des résultats assez proches de la réalité, en général en partant de considérations simples [29 à 32]. Il faut signaler également un article de Müller et Mitchell [33] concluant à la supériorité des dispositifs à contrôle de réattachement sur ceux utilisant la composition des jets dans le domaine des temps de réponse lorsque ces derniers sont utilisés comme amplificateurs « tout ou rien ».

AUTRES DISPOSITIFS

Les autres systèmes utilisés dans les amplificateurs fluides ont fait l'objet d'études moins nombreuses et moins poussées; nous nous bornerons à citer quelques références de notes ayant été publiées, en indiquant les caractéristiques optimales obtenues pour chaque dispositif ainsi que les grandes lignes des études théoriques que l'on pourrait éventuellement développer.

Les amplificateurs à vortex.

L'écoulement dans les tourbillons forcés a fait l'objet de nombreuses études, surtout dans le but d'expliquer les phénomènes apparaissant dans le « tube de Ranque-Hilsch » (division d'un écoulement monotherme en un écoulement chaud et un écoulement froid). Mais ce phénomène est différent de ce que l'on peut observer dans les amplificateurs à vortex : les vitesses et pressions sont en général beaucoup plus faibles.

Les études à caractère théorique sont peu nombreuses et leur but est en général la mesure des vitesses de l'écoulement à l'intérieur du vortex, que l'on compare à celles que l'on pourrait mesurer par une théorie plus ou moins compliquée. Mayer et Maker [34] proposent des lois de la forme :

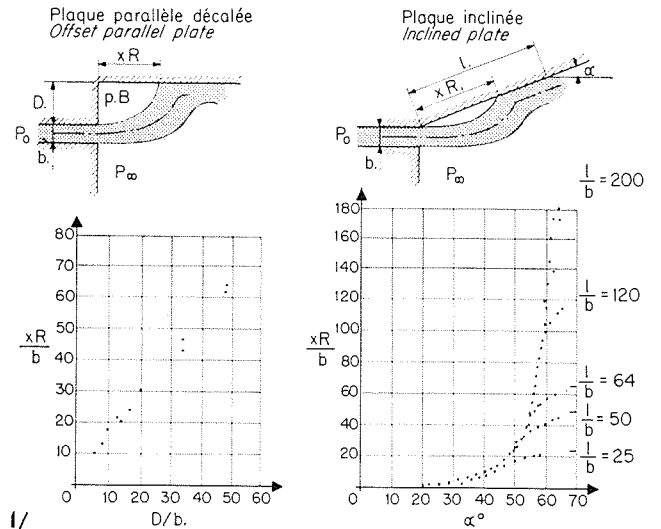
$$U/U_0 = (r_0/r)^n$$

U étant la vitesse tangentielle et r la distance au centre du vortex; n est un exposant variable entre 1 et 2, dépendant en particulier du nombre de Mach de l'écoulement. Les auteurs essaient alors de calculer le débit en fonction de la pression de commande et obtiennent des résultats proches de la réalité. Duff et al. [35] tiennent compte dans leurs calculs des contraintes visqueuses pour obtenir les variations de pression dans l'écoulement. Leurs résultats, assez proches de la réalité, semblent très plausibles.

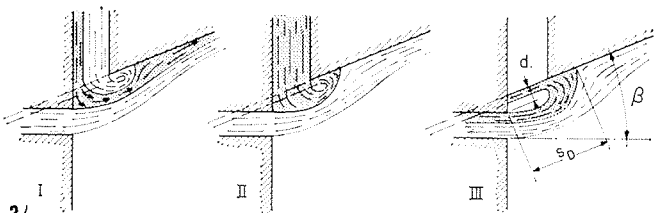
Otsap [36] et Miller [37] publient des résultats expérimentaux assez intéressants concernant ces amplificateurs; le premier étudie l'influence des différents paramètres sur les performances : on peut obtenir un gain en pression de l'ordre de 200. Le second publie des résultats de mesure de pression dans des dispositifs particuliers.

Les amplificateurs à interaction de jets coaxiaux.

Les études faites sur ce dispositif concernent surtout les performances pratiques [38, 39]. Les auteurs assurent un gain en pres-



1/ Etudes réalisées par Bourque et Newman [21].
Studies by Bourque and Newman [21].
2/ Les schémas de calcul proposés par Yih-O-Tu et Cohen [22].
Calculation schemes suggested by Yih-O-Tu et Cohen [22].



2/ Planche V / Etudes concernant le réattachement d'un jet à une paroi.
Studies of jet reattachment to a straight wall.

sion de 8 000 environ, ce qui est considérable; cependant le rendement doit être faible, car une grande partie du jet de puissance est dissipée en pure perte. On a étudié également la possibilité de réaliser des circuits logiques à l'aide de plusieurs de ces amplificateurs [40]. Un certain nombre de conditions à remplir sont précisées dans cette note.

Les amplificateurs à turbulence.

Ces amplificateurs, basés sur un phénomène très simple, ont été mis au point par Auger [41, 42] pour être utilisés surtout dans des circuits logiques. Leur fonctionnement n'a pas été l'objet d'études théoriques; ils ont été étudiés surtout d'un point de vue expérimental [43, 44] pour leur utilisation pratique.

CONCLUSIONS

Lorsque l'on fait un bilan de toutes les études effectuées sur les amplificateurs fluides, on peut être étonné par le nombre restreint des études à caractère fondamental et ceci peut très bien s'expliquer si l'on veut bien considérer la rapidité avec laquelle des résultats sont exigés, et les faibles moyens dont on dispose dans le domaine théorique en face des formidables problèmes qui se posent : couches limites turbulentes, écoulements instables, cavités, sillages, etc.

On doit constater que la mécanique des fluides est souvent impuissante à décrire de façon précise de tels phénomènes. Il lui manque un outil. Celui-ci pourrait lui être fourni par l'analyse numérique qui fait des progrès énormes avec l'avènement des diverses « générations » de calculatrices électroniques. Les équations de Navier-Stokes en effet, si elles sont généralement reconnues comme étant une représentation fidèle des écoulements, ne sont pas utilisées dans leur forme originelle, du fait de leur complexité. Leur résolution, sans doute rendu possible grâce à ces nouveaux moyens, peut ouvrir de belles perspectives notamment dans les amplificateurs fluides.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GÉNÉRALITÉS

- [1] KADOSCH (M.). — L'amplificateur fluide. *La Machine-Outil française* (février 1965), n° 206, 75-89 et mars 1965, n° 207, 71-84.
- [2] WETHERAL (T. G.) and ATHA (L. C.). — Fluieric Controls, a description of available components and current applications. Paper A.S.M.E. 65-WA/AUT 21.
- [3] LEW WOOD (O.) (P. PIQUET). — Les amplificateurs fluides. *Automatisme*, t. XI, n° 5 (mai 1966), 309-313.
- [4] STEINER (L. A.). — Facets of fluid switching. *Fluid Power International*, n° 356 (novembre 1965), 368-371.
- [5] THINEY (A.). — Les amplificateurs à fluide. *Electronique industrielle*, n° 91 (février 1966), 112-116 et n° 92 (mars-avril 1966) 165-171.
- [6] *Control Engineering* (septembre 1964), 73-100. Rapport spécial sur les amplificateurs fluides.

COMPOSITION DES JETS

- [7] COX (J. E.). — The viscous dissipation of energy in free turbulent flows occurring in fluid amplifier operation. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 5-18.
- [8] MARGOLIS (D. P.). — Some of curved turbulent mixing important in fluid amplifiers and fluid logic devices. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964) 19-38.
- [9] MOYNIHAN (F. A.). — Jet interaction noise. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 111-122.
- [10] MOYNIHAN (F. A.) and REILLY (R. J.). — Deflection and relative flow of three interacting jets. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 123-146.
- [11] CRONIN (R. T.). — A hydrodynamic study of the free - jet class of fluid jet amplifiers. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 157-178.
- [12] PEPERONE (S. J.). — KATZ (S.) and GOTO (J. M.). — Gain analysis of the proportional fluid amplifier. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (octobre 1962), 319-356.
- [13] PAVLIN (C.). — Etude expérimentale d'un amplificateur fluide proportionnel. *Société Hydrotechnique de France, IX^{es} Journées de l'Hydraulique*, Paris (1966), question IV, rapport d-3.
- [14] SHEERAN (W. J.) and DOSANJH (D. S.). — Investigations of interacting underexpanded jet flows. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964) 39-62.
- [15] OLSON (R. E.) and MILLER (D. P.). — The interaction of oblique shocks and expansion waves with a jet boundary mixing zone. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 81-108.

CONTROLE DU DÉCOLLEMENT D'UN JET

- [16] ZISFEIN (M. B.) and CURTISS (H. A.). — A high gain proportional fluid state flow amplifier. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 375-393.
- [17] NEWMAN (B. G.). — The deflexion of plane jets by adjacent boundaries. Coanda effect. Dans : Boundary layer and flow control, part. I, G. V. LACHMAN. *Pergamon Press* (1961), 232-264.
- [18] KADOSCH (M.). — Attachement of a jet to a curved wall. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. IV (mai 1964), 5-20.
- [19] CURTISS (H. A.), FEIL (O. G.) and LIQUORNIK (D. J.). — Separated flow in curved channel with secondary injection. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. IV (mai 1964), 21-52.
- [20] KADOSCH (M.). — Commande et automatisme par fluide. Calcul de la déviation d'un jet par une paroi courbe. *Société Hydrotechnique de France, IX^{es} Journées de l'Hydraulique*, Paris (1966), question IV, rapport d-4.

CONTROLE DU RÉATTACHEMENT D'UN JET

- [21] BOURQUE (C.) and NEWMAN (B. G.). — Reattachment of a two-dimensional incompressible jet to an adjacent flat plate. *Aeronautical quarterly*, vol. 11, aug. 1960, 201-232.
- [22] PEDERSEN (J. R. C.). — The flow of turbulent incompressible two-dimensional jets over ventilated cavities. *First Intern. conf. on fluid logic and amplification*. Cranfield (8-9 septembre 1965), paper B 3.
- [23] SHER (N. C.). — Jet attachment and switching in bistable fluid amplifiers. Paper A.S.M.E., 64-FE-19.
- [24] YIH-O-TU and COHEN (H.). — A theoretical model for separation in the fluid jet amplifier. *I.B.M. Journal* (octobre 1963), 288-296.

- [25] COX (A. D.) and CLAYDEN (W. A.). — Cavitating flow about a wedge at incidence. *Journal of fluid mechanics*, 3 (1958), 615-637.
- [26] BERMEL (T. W.) and BROWN (T. W.). — Development of a pure fluid nor gate and a nor logic binary-to-decimal converter. Paper A.S.M.E., 65-WA/AUT 13.
- [27] DENKER (R. E.). — Theoretical analysis of fluid amplifier design. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 243-260.
- [28] OLSON (R. E.) and STOEFLER (R. C.). — A study of factors affecting the time response of bistable amplifiers. Symposium of fully separated flows. A.S.M.E. Conference, Philadelphia (mai 1964).
- [29] FOSTER (K.) and JONES (N. S.). — An examination of the effect of geometry on the characteristic of a turbulent reattachment device. *First intern. conf. on fluid logic and amplification*, Cranfield (8-9 septembre 1965), Paper B 1.
- [30] BOUCHER (R. F.) and MARKLAND (E.). — Experiments on symmetrical wall reattachment amplifiers. *First intern. conf. on fluid logic and amplification*, Cranfield (8-9 septembre 1965), Paper B 2.
- [31] MÜLLER (H. R.). — Wall reattachment device with pulsed control flow. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (mai 1964), 179-216.
- [32] MÜLLER (H. R.). — A study of the dynamic features of a wall - reattachment fluid amplifier. *Trans. A.S.M.E., série D* (décembre 1964), 819-826.
- [33] MÜLLER (H. R.) and MITCHELL (A. E.). — Comparison of a momentum with a wall reattachment fluid amplifier. Symposium on fully separated flows. A.S.M.E. Conference, Philadelphia (mai 1964).

AUTRES DISPOSITIFS

Amplificateurs à vortex :

- [34] MAYER (E. A.) and MAKER (P.). — Control characteristics of vortex valves. *Proc. on the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 81-84.
- [35] DUFF (J.), FOSTER (K.) and MITCHELL (D. G.). — Some experiments on the vortex valve. *First intern. conf. on fluid logic and amplification*, Cranfield (8-9 septembre 1965), Paper C 1.
- [36] OTSAP (B. A.). — Experimental study of a proportional vortex fluid amplifier. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 85-124.
- [37] MILLER (D. P.). — Characteristics of a vortex fluid throttle. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 125-146.

Amplificateurs à interaction de jets coaxiaux :

- [38] BJORNSENSEN (B. G.). — The impact modulator. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 5-32.
- [39] LECHNER (T. J.) and SORENSON (P. H.). — Some properties and applications of direct and transverse impact modulators. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 33-60.
- [40] LECHNER (T. J.) and WAMBSGANSS (M. W.). — Proportional power stages for impedance matching fluid devices. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. I (octobre 1962), 381-404.

Amplificateurs à turbulence :

- [41] AUGER (R. N.). — The turbulence amplifiers in control systems. *Proc. of the fluid amplification symposium*, vol. II (mai 1964), 261-272.
- [42] AUGER (R. N.). — Pneumatic turbulence amplifiers. *Instruments and control systems*, vol. 38 (mars 1965), 129-133.
- [43] OELS (R. A.), BOUCHER (R. F.) and MARKLAND (E.). — Experiments and turbulence amplifiers. *First intern. conf. on fluid logic and amplification*, Cranfield (8-9 septembre 1965), Paper D 3.
- [44] HODGE (J.) and HUTCHINSON (J. G.). — Turbulence amplifiers : principes and applications. *Fluid power international*, n° 355 (octobre 1965), 333-338.

CONFÉRENCES ET SYMPOSIUMS

- Proceedings of the fluid amplification symposium (octobre 1962), *Diamond Ordnance Fuze Laboratories*, Washington D.C.
- Proceedings of the fluid amplification symposium (mai 1964), *Harry Diamond Laboratories*, Washington D.C.
- Proceedings of the first international conference on fluid logic and amplification, Cranfield (septembre 1965), *British Hydromechanics Research Association*.
- Fluids Engineering conference, Philadelphia (mai 1964), *American society of mechanical engineers*.