

# APPLICATIONS DE L'ANALOGIE HYDRAULIQUE A L'ÉTUDE DES AMPLIFICATEURS FLUIDES

## II RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

PAR J. DAT \* ET C. FONADE \*\*

### Introduction

Dans un précédent article [1], nous avons donné les bases théoriques de l'analogie hydraulique entre l'écoulement d'un fluide incompressible à surface libre et celui d'un fluide compressible en charge. Nous avons montré que, bien que cette analogie ne soit théoriquement possible qu'entre un liquide et un gaz d'exposant polytropique égal à 2 (gaz hydraulique), les études faites avec différents gaz permettent de concevoir une analogie correcte entre l'eau et l'air.

Le présent article a pour but de présenter les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'études sur table à eau de modules fluidiques. Ces études, réalisées dans le cadre d'un contrat de la Délégation générale à la Recherche scientifique et technique (n° 67 00 908), consistent en la comparaison des résultats obtenus à partir de l'analogie hydraulique et des résultats obtenus par des essais sur les modules « air » correspondant.

Après un rappel des formules d'analogie, nous analysons successivement la technique des tables à eau (construction, mesures, visualisation), l'étude du fonctionnement statique d'un module et enfin celle de son fonctionnement dynamique.

### Rappel des formules d'analogie

Dans le cas de fluides supposés non visqueux, l'analogie consiste à réaliser l'égalité entre le nombre de Froude de l'écoulement liquide et le nombre de Mach de l'écoulement gazeux.

Les relations de l'analogie sont les suivantes :

$$\left(\frac{P'}{P'_\infty}\right)^{1/2} = \frac{\rho'}{\rho'_\infty} = \frac{T'}{T'_\infty} = \frac{Z}{Z_\infty} \quad (1)$$

$$\rho' = \frac{g}{2ka^2} Z \quad \left(\text{avec } k = \frac{P'}{\rho'^2}\right) \quad (2)$$

L'invariant est donc le rapport  $Z/\rho'$  que nous noterons  $\theta$ .

Les rapports des vitesses et des débits massiques sont alors respectivement :

$$\alpha = \sqrt{\frac{g\theta}{2k}} \quad (3)$$

$$q_m = \frac{\rho_e}{h} \alpha \lambda \theta \quad (4)$$

$\lambda$  étant le rapport de similitude géométrique.

L'étude théorique de l'analogie a montré que deux paramètres restaient libres :

- l'échelle  $\lambda$  des dimensions horizontales;
- le tirant d'eau  $Z_\infty$  choisi à l'infini aval.

Les formules d'analogie rappelées ci-dessus permettent d'écrire :

$$P' - P'_\infty = \frac{P'_\infty}{Z_\infty^2} (Z^2 - Z_\infty^2)$$

$$Q'_m = Q_m \frac{h}{\rho_e \lambda \sqrt{(g/2)}} \frac{(P'_\infty \rho'_\infty)^{1/2}}{(Z_\infty)^{3/2}}$$

\* Professeur s.e. à la Faculté des Sciences de Toulouse.

\*\* Ingénieur ENSEEHT, Assistant à la Faculté des Sciences de Toulouse.

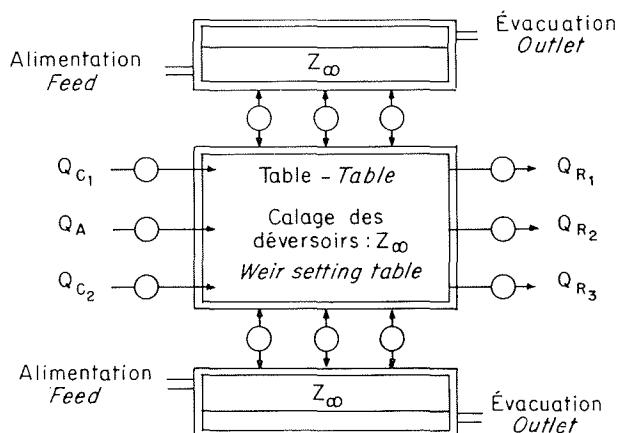
$P'_\infty$ ,  $\rho'_\infty$  représentent la pression atmosphérique et la masse volumique de l'air à la température ambiante,  $\rho_c$  la masse volumique de l'eau. La mesure de  $Z$  en un point donné, et de  $Q_m$  débit masse d'eau, permet de connaître la pression  $P'$  au point correspondant sur le module air et le débit massique  $Q'_m$  d'air.

### Technique de l'étude sur table à eau

Il s'agit, évidemment, de reproduire sur table à eau le fonctionnement normal d'un module fluide. Deux faits sont importants :

- la simulation de la pression ambiante dans laquelle travaille le module « air ». Cette pression est celle qui règne dans tous les orifices non alimentés du module, en particulier à la sortie des évents;
- la possibilité de débits dans les deux sens dans tous les canaux, sans modification de la pression ambiante.

Nous pouvons donc schématiser une table à eau de la façon suivante :



Les conditions de pression ambiante seront représentées par une certaine valeur  $Z_\infty$  de calage de tous les déversoirs situés sur les canaux du module. D'autre part, des réservoirs à niveau constant sont alimentés en permanence et reliés à la

sortie de chacun des canaux du module. Dans ces réservoirs, le niveau est également calé à  $Z_\infty$ . Dans ces conditions, on peut avoir écoulement dans les deux sens. Cela permet de compenser tous les débits d'entraînement et donc de retrouver le fonctionnement réel d'un module.

La figure 1 montre l'installation d'étude montée avec une bascule monostable.

Pour effectuer les mesures nous avons utilisé :

- pour les débits, des diaphragmes préalablement étalonnés;
- pour les tirants d'eau, le repérage avec un cathétomètre de pointes affleurant le plan d'eau;
- pour les mesures en fonctionnement dynamique, des sondes électriques à résistance variable, reliées à un enregistreur (fig. 2).

La table elle-même est réalisée en ciment lissé, la planéité étant très importante quant à la mesure des tirants d'eau. Cette table possède moins de 2/10 mm d'écart entre les cotes maximale et minimale, pour une surface d'environ 6 m<sup>2</sup>.

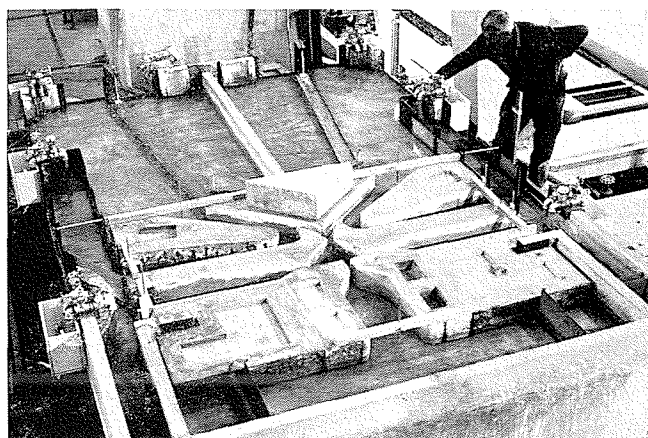
Les études expérimentales ont été réalisées sur une bascule monostable et une bascule bistable, dont les géométries nous ont été aimablement communiquées respectivement par la Société Bertin et la Société Générale du Vide.

### Etude du fonctionnement statique

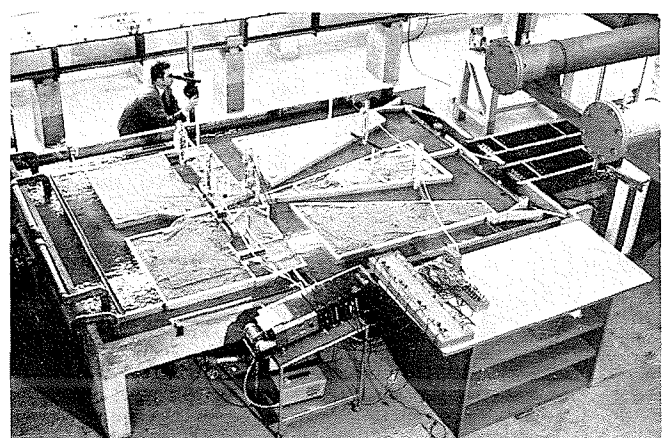
De précédentes études [2] nous ont montré que le phénomène d'attachement d'un jet à la paroi est identique pour un jet d'eau à surface libre et un jet en charge, et que le nombre de Reynolds n'a d'influence que s'il est inférieur à une certaine limite qui dépend de la géométrie.

Nous avons aussi réalisé (fig. 2) la géométrie d'une bascule bistable basée sur l'attachement du jet à la paroi et nous avons réalisé plusieurs maquettes « air » d'échelles différentes (fig. 3).

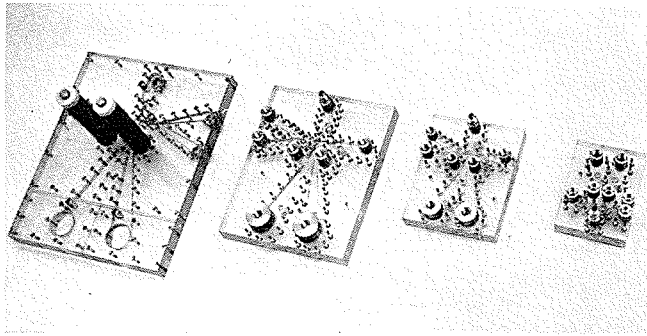
Les résultats concernant la caractéristique d'alimentation (fig. 4) nous ont permis, à partir des relations d'analogie [1] et [4], d'obtenir la comparaison avec les mesures directes effectuées sur les maquettes « air » (M I, . . . . ., MIV A) et les courbes théoriques (avec l'hypothèse que la zone d'interac-



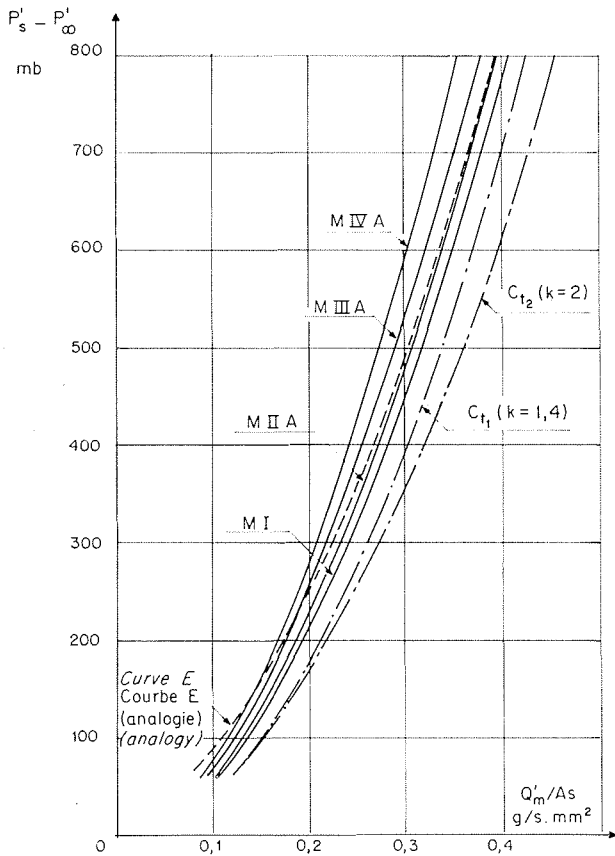
1/



2/



3/

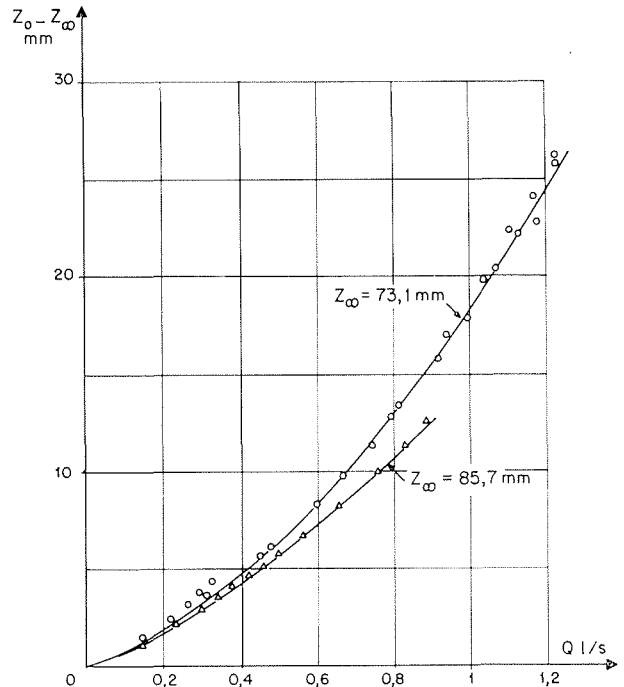


5/ Caractéristique pression-vitesse moyenne de la buse d'alimentation.

Supply nozzle pressure/mean velocity characteristic.

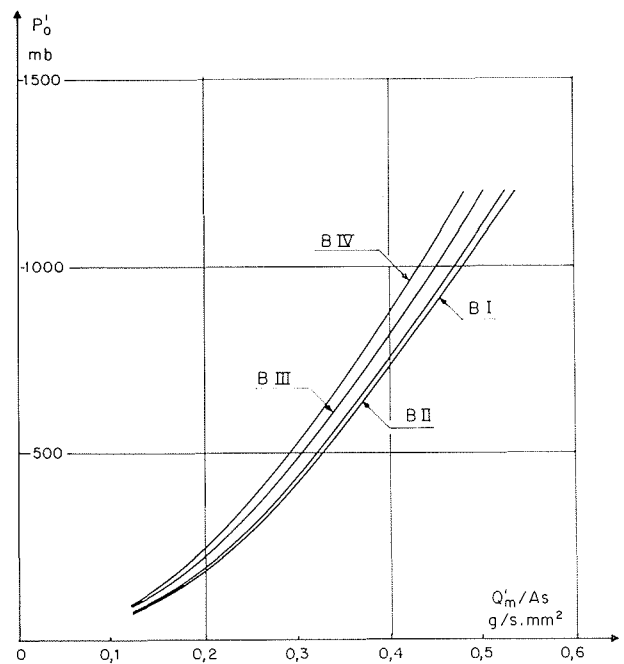
6/ Comparaison des débits massiques par unité de section. Buses B I, B II, B III, B IV.

Mass flow comparison per unit cross-sectional area. Nozzles B I, B II, B III, B IV.



4/ Caractéristique d'alimentation du modèle hydraulique de la bascule bistable.

Supply characteristic of the hydraulic bistable balance model.



tion est à la pression atmosphérique) (fig. 5). Nous constatons :

- que les différentes maquettes « air » ne donnent pas une caractéristique unique : les écoulements ne vérifient pas la similitude géométrique;
- que la courbe E, déduite de l'analogie, se place très correctement dans l'ensemble des courbes précédentes;
- que la courbe E est plus proche de la courbe théorique correspondant à  $k = 1,4$ , que  $k = 2$ .

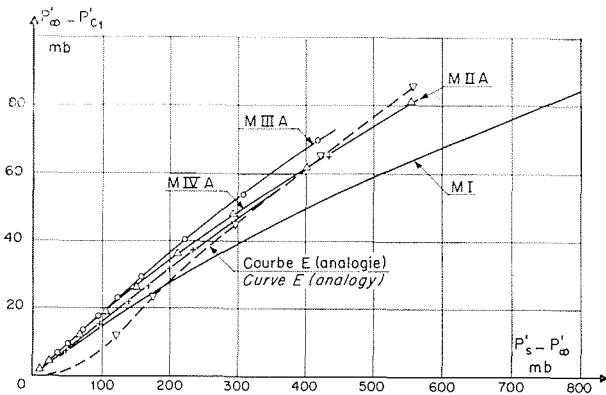
Ce dernier résultat confirme, en particulier, que le fait d'établir les relations d'analogie avec le « gaz hydraulique » ne compromet pas la validité de ces relations lorsqu'on utilise l'air.

Il faut aussi remarquer que les différences, que l'on observe dans les caractéristiques des maquettes « air », ne proviennent pas, comme nous avons pu le vérifier, d'une influence de la partie aval du module. Les caractéristiques des buses d'alimentation, débouchant directement à la pression atmosphérique, présentent, en effet, les mêmes diffé-

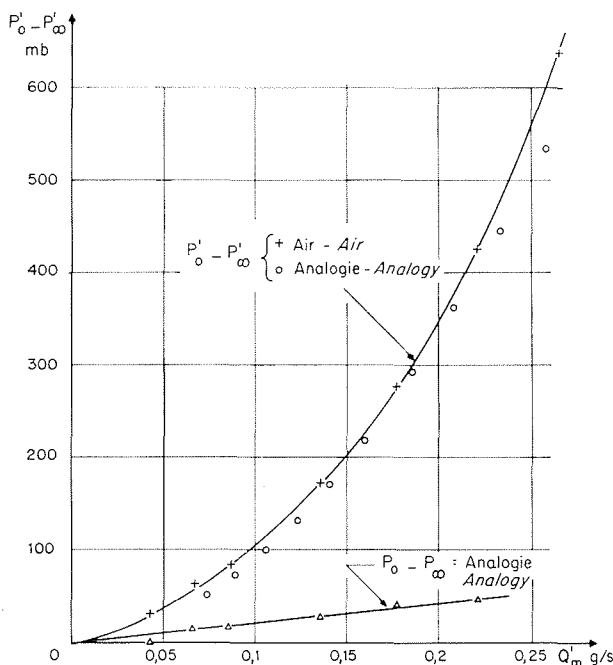
rences lorsqu'on considère le débit par unité de section, c'est-à-dire la vitesse moyenne à la sortie de la buse (fig. 6).

Une autre caractéristique importante d'un module à attachement est la pression qui règne dans le rouleau de recirculation. Celle-ci étant très délicate à obtenir, nous avons mesuré la pression qui règne dans la chambre de commande lorsque celle-ci est obturée. Cette pression est directement liée à la pression dans le rouleau de recirculation. La figure 7 représente la variation de cette pression (dépression lorsqu'on prend comme zéro la pression atmosphérique  $P'_\infty$ ) en fonction de la pression d'alimentation du module. Nous constatons encore que la courbe d'analogie se place très correctement dans l'ensemble des courbes MI, . . . ., MIV A.

Cependant, afin d'avoir une idée plus précise de la validité de l'analogie en régime « statique »,



7/ Etude de la dépression dans la cavité. Commandes fermées.  
Cavity depression study. Controls shut.



8/ Analogie hydraulique pour la bascule monostable.  
Hydraulic analogy for the monostable barometer.

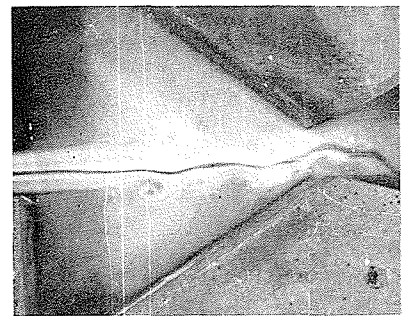


9 a/

nous avons aussi expérimenté la bascule monostable (fig. 1), dont le principe est différent de celui de la bascule précédente. Le module « air » de référence a été réalisé en dycril, l'échelle géométrique entre les deux modèles étant de 50. La figure 8 montre les résultats obtenus pour la caractéristique d'alimentation, la sortie stable étant activée.

Remarquons que la pression mesurée dans le récepteur activé (qui atteint 50 mb) correspond seulement à une charge, sur les déversoirs, d'environ 1 mm, à cause de la très grande longueur de déversement. Nous voyons donc que les mesures de tirant d'eau nécessitent un grand soin.

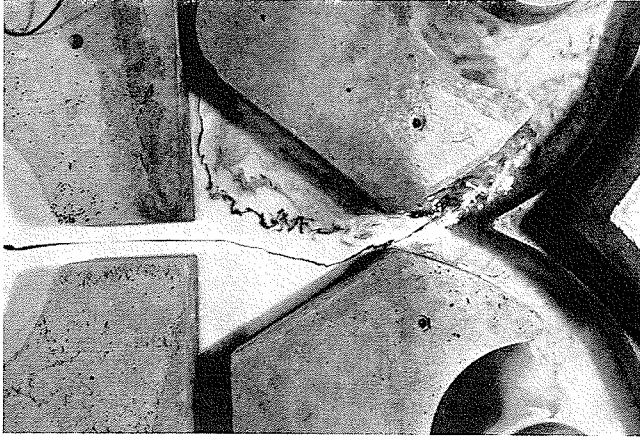
Des essais concernant la caractéristique de récupération d'un amplificateur ont montré que l'analogie donnait systématiquement de meilleures performances quant à la récupération en pression. Bien que nos études se poursuivent actuellement dans ce domaine, il semblerait que l'état des parois soit très important pour ces caractéristiques et que les modules hydrauliques expérimentés présentent une



10 a/



10 b/



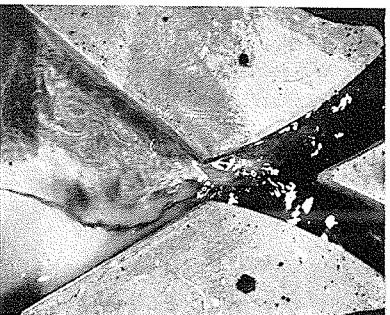
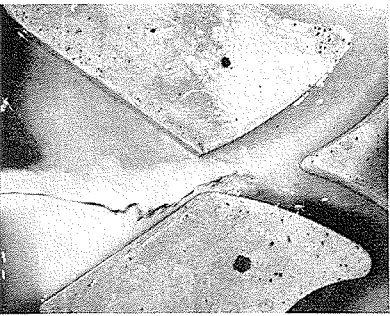
9 b/

rugosité de paroi très inférieure à celle qui proviendrait de la similitude géométrique.

**Visualisation.**

L'un des intérêts de l'étude sur table à eau réside dans le fait que l'on peut travailler sur des modules réalisés à grande échelle. Cela permet d'étudier le comportement de l'écoulement dans les zones d'interaction et d'améliorer, connaissant le fonctionnement réel, les performances du module.

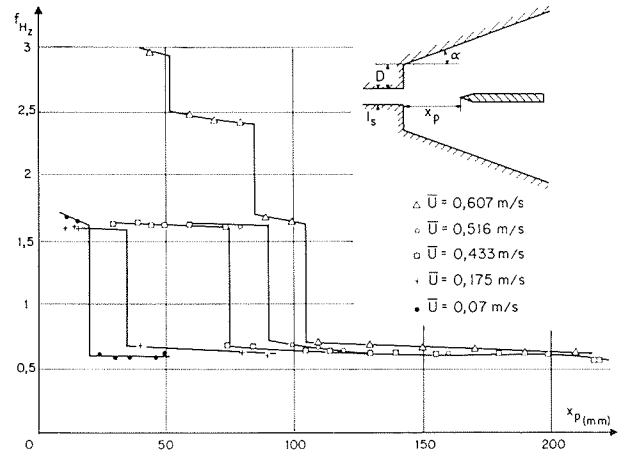
Nous avons ainsi visualisé l'écoulement dans la bascule monostable. Pour cela, nous avons introduit dans l'eau d'alimentation une faible quantité d'huile soluble blanche, qui permet de distinguer très nettement un filet fluide de colorant noir. La figure 9 montre deux aspects de l'écoulement dans la zone d'interaction de la bascule monostable, l'un sans débit de commande (a) (récepteur stable activé) l'autre avec débit de commande (b) (récepteur instable activé).



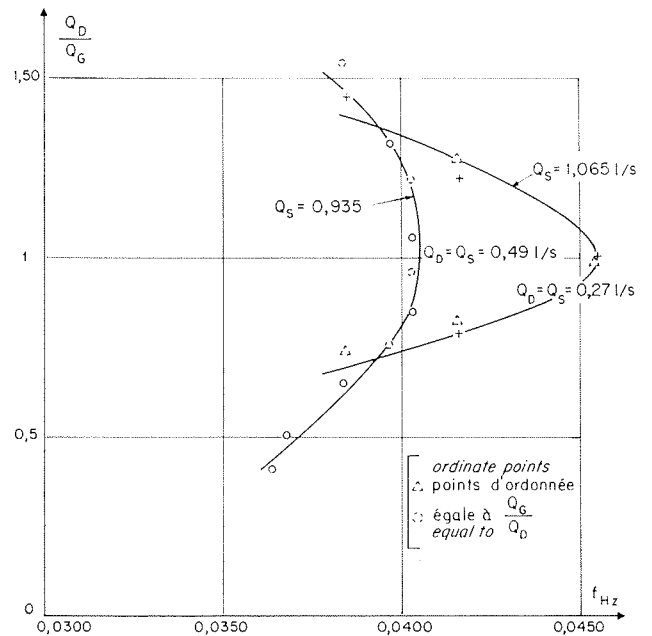
Nous avons, enfin, réalisé un film de basculement du jet lorsqu'on lui applique le débit de commande. On voit très nettement (fig. 10) le jet s'incurver progressivement. L'étude du temps de réponse, par cette méthode, est intéressante car, pour un tirant d'eau à l'infini aval d'environ 6 cm, on obtient un rapport de temps  $\tau$  dans l'analogie d'environ 18 000 pour cette bascule. Cela correspond donc, pour 1 ms sur le module « air », à 18 s sur la table à eau : on peut ainsi décomposer correctement le basculement.

**Etude du fonctionnement dynamique**

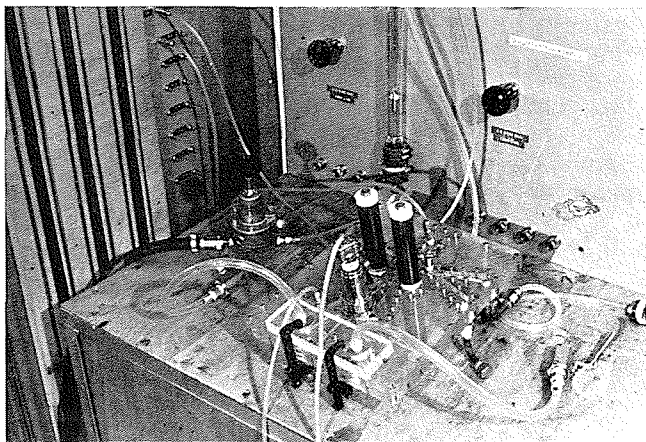
A la suite des résultats très satisfaisants obtenus quant au fonctionnement statique, nous nous sommes attachés à la réponse dynamique des modules.



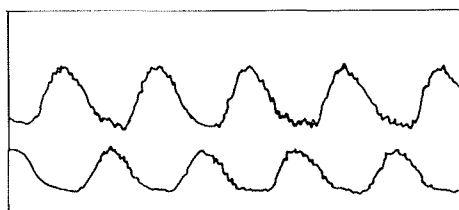
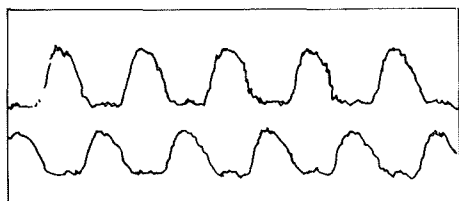
11/



12/ Fréquence d'oscillation en fonction du rapport des débits de commande.  
Oscillation frequency for various control flows.



13/



14/

Pour cela, nous avons écarté, pour des raisons d'exécution et de précision des mesures, le temps de basculement d'un amplificateur. Nous avons choisi deux phénomènes faisant intervenir, l'un le jet seul, l'autre un amplificateur complet.

a) Si l'on place un partiteur face à un jet d'air, celui-ci est soumis à des oscillations de part et d'autre de ce partiteur [3, 4].

De même, un jet d'eau débouchant dans une chambre à surface libre et frappant un partiteur, est soumis à un régime d'oscillations [5]. Nous retiendrons le fait que la fréquence des oscillations obtenues varie, par palier, lorsque la distance buse-partiteur varie. Les rapports des fréquences obtenues, de part et d'autre d'un saut, prennent les valeurs successives suivantes (fig. 11) :

$$2,39; 1,78; 1,45; 1,11,$$

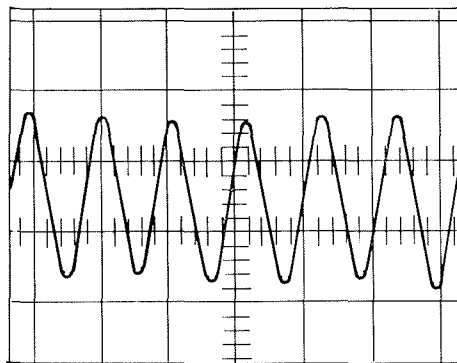
résultats tout à fait analogues à ceux obtenus par Brown [3] avec un jet d'air :

$$2,30; 1,63; \text{et } 1,44,$$

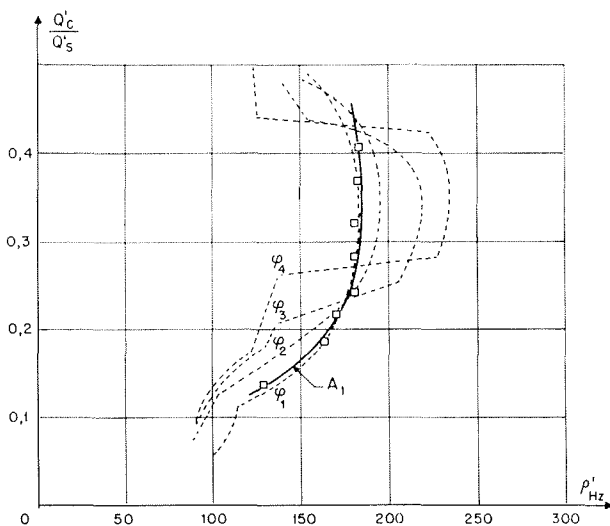
et Curle [4], par une formule semi-empirique :

$$2,41; 1,73; \text{et } 1,50.$$

b) Un autre régime d'oscillations permanent est obtenu sur la bascule bistable (fig. 2); les événements



15/



16/

étant, en effet, considérés comme capacités, la bascule présente, dans certaines conditions de débits de commande, des oscillations entretenues sans bouclage extérieur sortie-entrée. Le rapport des débits obtenus dans chacun des récepteurs, dépend du rapport des débits de commande et la fréquence obtenue est maximale, comme le montre la figure 12, lorsque les deux débits de commande sont égaux. Ce mode de fonctionnement instable peut apparaître lorsque le module fonctionne avec polarisation permanente.

Nous avons donc muni l'une des maquettes « air », de capacités en similitude géométrique (volume), avec les volumes des événements du modèle hydraulique (fig. 13), et nous avons photographié, sur l'écran d'un oscillographe étalonné, les oscillations obtenues. Les figures 14 et 15 montrent, respectivement, des copies d'enregistrement des oscillations sur table à eau et sur maquette « air ».

L'application des lois d'analogie nous donne, compte tenu de la valeur du tirant d'eau à l'infini aval et de l'échelle géométrique, un rapport de temps, soit des fréquences de 5 200. Nous avons, ainsi, obtenu les différentes courbes (mesure directe et analogie) pour certaines valeurs de l'impédance de sortie de l'amplificateur (fig. 16). La courbe d'analogie  $A_1$  correspond à un débit d'alimentation « air » de 7,9 l/s et son impédance de sortie (fonction de la longueur de déversement) est comprise entre  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ .



Les résultats montrent que, malgré un rapport des fréquences élevé, la concordance entre l'analogie hydraulique et les maquettes « air » est très correcte.

### Conclusion

Les études expérimentales, menées aussi bien sur des phénomènes de base que sur des modules fluidiques complets, montrent que les relations d'analogie obtenues théoriquement [1] permettent de faire l'étude qualitative, aussi bien que quantitative, d'un amplificateur fluide sur table à eau avec surface libre. Les avantages d'un tel procédé sont, d'une part de travailler avec des dimensions géométriques beaucoup plus grandes (possibilité d'installer des sondes de mesure sans perturber totalement l'écoulement) et, d'autre part, de visualiser correctement les écoulements. Cela peut permettre, en particulier, la vérification expérimentale de la validité des hypothèses que l'on pourrait prendre comme base d'une théorie de l'écoulement dans un module fluidique.

### Notations

A : section droite d'un canal;  
 f : fréquence d'oscillation (en Hz);  
 g : accélération due à la pesanteur;  
 h : hauteur des canaux des modules « air »;  
 P : pression statique en un point;  
 Q<sub>m</sub> : débit massique;  
 q<sub>m</sub> : rapport des débits massiques ( $q_m = \frac{Q_m}{Q'_m}$ )  
 T : température absolue;

U : vitesse en un point;

Z : tirant d'eau en un point;

α : rapport des vitesses ( $\alpha = \frac{U}{U'}$ )

θ : invariant dans l'analogie ( $\theta = \frac{Z}{\rho'}$ )

λ : rapport de similitude géométrique;

ρ' : masse volumique du gaz;

ρ<sub>e</sub> : masse volumique de l'eau;

### Indices.

o : caractéristiques à l'infini amont;

∞ : caractéristiques à l'infini aval;

' : caractéristiques relatives à l'écoulement gazeux;

c : caractéristiques dans les buses de commande;

s : caractéristiques dans la buse d'alimentation.

### Références

- [1] DAT (J.) et FONADE (C.). — Application de l'analogie hydraulique à l'étude des amplificateurs à fluide : *La Houille Blanche*, n° 1-1969, p. 35-43.
- [2] DAT (J.) et FONADE (C.). — Etude expérimentale de l'attachement d'un jet plan à une paroi. *CRAS* (Paris), t. 265, série A, (13-11-67), p. 634-636.
- [3] BROWN (G.B.). — The mechanism of edge-tone production. *Proc. phys. Soc.*, (1937), p. 49-493.
- [4] CURLLE (N.). — The mechanism of edge-tones. *Proc. Roy. Soc.*, vol. 216 A, (1931).
- [5] DAT (J.) et FONADE (C.). — Etude expérimentale de l'oscillation d'un jet en présence d'un partiteur. *CRAS* (Paris), t. 265, série A, (18-12-67), p. 879-881.
- [6] DAT (J.) et FONADE (C.). — Etude et mise au point de la technique des modèles en eau à surface libre. Application à l'étude des amplificateurs à fluide. Rapport du contrat 67 00 908. Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Paris.

