

Instabilités de fonctionnement à débit partiel d'un inducteur fretté : comparaison avec le cas non fretté

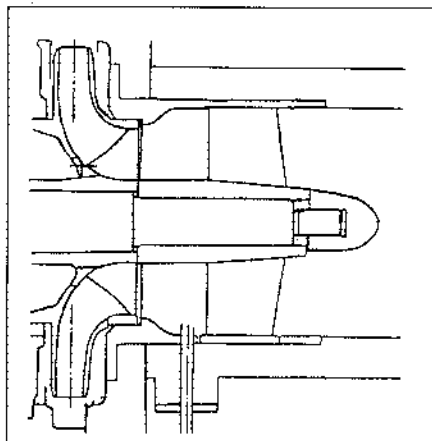
par C. Offtinger, C. Henry, R. Morel
Equipe Hydraulique INSA de Lyon
Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique

I ■ INTRODUCTION

Un inducteur, ou roue de gavage, est une roue axiale placée à l'amont d'une pompe afin d'améliorer sa capacité d'aspiration. Cependant, l'inconvénient majeur de ce type de roue est son comportement instable à débit partiel. De nombreux auteurs dont Acosta [2], Janigro et Ferrini [3], Lakshminarayana [4] et Yedidiah [5] ont décrit les principales figures de cavitation responsables des fluctuations de pression et de débit.

L'étude expérimentale d'un inducteur constitué de trois aubes, placé en alimentation d'une roue centrifuge réalisée au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'INSA de Lyon a mis en évidence un comportement instable de celui-ci à débit partiel [1]. Une étude similaire a été entreprise sur le même inducteur ceinturé par une frette soudée en tête des aubes.

Pour cet inducteur, une campagne de visualisation a permis de repérer qualitativement l'apparition et l'évolution des différentes formes de cavitation : cavitation d'aubage et cavitation de recirculation. Afin de caractériser chacune des figures mises ainsi en évidence, des mesures de fluctuations de pressions pariétales ont été réalisées dans les conduites amont et aval à l'aide de capteurs de pression instationnaire. Les résultats de cette étude sont comparés à ceux obtenus avec l'inducteur non fretté.



1. Schéma de montage de l'inducteur.

NOTATIONS

g	:	accélération de la pesanteur
r	:	rayon
Q	:	débit volumique
NPSH	:	Net Positive Suction Head
U	:	vitesse périphérique
σ	:	NPSH adimensionné $\sigma = gNPSH/U^2$
δ	:	coefficient de débit $\delta = Q/U \cdot r^2$

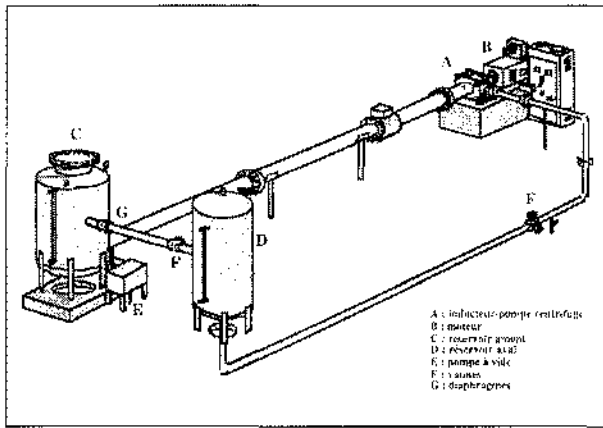
indice :

p	:	pied
t	:	tête
disp	:	disponible

Tableau 1 : Caractéristiques de l'inducteur.

Vitesse de rotation	2960 tr/min
Nombre d'aubes	3
Coefficient de débit de dessin	0,14
Vitesse spécifique d'aspiration	456,45
Rapport de rayon pied / tête en entrée	$r_p/r_t=0,354$
Rapport de rayon pied / tête en sortie	$r_p/r_t=0,393$
Coefficient de débit de meilleur rendement	0,113
Jeu radial	0,0011r, à 0,0044r,

	Tête	Pied
Épaisseur relative des aubes	0,0118	0,0412
Solidité	1,6	1,77
Angle de calage	80,35°	61,51°
Angle géométrique en entrée	82,15°	67,7°
Angle géométrique en sortie	78,55°	55,32°



2. Boucle d'essais.

II ■ INDUCTEUR ET BOUCLE D'ESSAIS

L'inducteur testé est placé en amont d'une pompe centrifuge sur le même arbre que celle-ci. Les principales caractéristiques de l'inducteur sont données dans le tableau 1.

Le montage de la pompe centrifuge et de l'inducteur dans les deux configurations fretté et non fretté est schématisé figure 1.

Les essais ont été menés en eau dans un circuit en boucle fermée comme le montre la figure 2. Ce circuit est composé principalement du groupe pompe centrifuge - inducteur (A) entraîné par un moteur à courant continu (B), de deux réservoirs (C) et (D) de capacité respective 2,6 m³ et 2,2 m³, d'une pompe à vide à anneau d'eau (E), de vannes de réglage de débit (F) et de diaphragmes interchangeables (G).

Dans le réservoir d'aspiration (C) la modification de la hauteur d'eau ou l'ajustement du niveau de pression au dessus de la surface libre au moyen de la pompe à vide permet de faire varier la hauteur de charge nette absolue disponible $NPSH_{disp}$ à l'entrée de l'inducteur.

Une manchette en altuglass remplaçant le carter à l'aspiration de la roue centrifuge permet de visualiser l'écoulement en amont et à travers l'inducteur et de photographier ou filmer les différentes formes de cavitation.

Les débits à l'amont et à l'aval de la machine sont mesurés à l'aide de débitmètres électromagnétiques Endress Hauser. Le débit maximum dans la boucle pour une vitesse de rotation de 3000 tr/min est de 0,1 m³/s. L'incertitude sur la mesure du débit varie avec la vitesse de l'écoulement : pour une vitesse comprise entre 1 et 10 m/s, $\pm 1\%$ de 20 à 100 % de l'échelle de mesure, $\pm 2\%$ de 0 à 20 % de l'échelle de mesure. L'incertitude est doublée pour une vitesse comprise entre 0,5 et 1 m/s.

Un couplemètre dynamique Staiger Mohilo, de fréquence d'échantillonnage 600 Hz, placé sur l'arbre entre le moteur et la pompe, donne accès au couple et à la vitesse de rotation. L'étendue de mesure est 500 Nm avec une précision (linéarité et hystérésis) de $\pm 0,1\%$ de l'échelle entière.

La pression à l'aspiration de la roue est mesurée à l'aide d'un capteur de pression absolue Rosemount 1151AP dont la gamme de mesure est $0-1,87 \cdot 10^5$ Pa, sa précision est 0,1 à 0,2 % de l'étendue de mesure utilisée (en l'occurrence $0-1,5 \cdot 10^5$ Pa).

Les mesures de fluctuations de pressions dans les conduites amont et aval sont réalisées à l'aide de capteurs de pression instationnaire de type ENTRAN à membrane piezorésistive. La bande passante de ces capteurs est 13 kHz.

Dans la conduite d'aspiration on utilise trois capteurs dont

l'étendue de mesure est 1 bar, l'erreur de mesure $\pm 1\%$ de l'étendue de mesure et la dérive du zéro avec la température ± 3250 Pa / 50°C.

Un quatrième capteur, utilisé dans la conduite de refoulement a pour étendue de mesure 7 bar, erreur de mesure $\pm 0,7\%$ de l'étendue de mesure et dérive du zéro avec la température $\pm 0,656 \cdot 10^5$ Pa / 50°C.

Les signaux sont enregistrés sur micro ordinateur PC 386 à l'aide d'une carte d'acquisition 8 voies de type Eurosmart associée à un logiciel de dépouillement de résultats Physcope.

La fréquence d'échantillonnage de l'acquisition des fluctuations est de 340 Hz. L'acquisition a été réalisée sans filtrage. Cependant, nous avons opéré sur les mesures brutes un filtrage numérique passe bas de fréquence de coupure 160 Hz pour nous placer dans les mêmes conditions que pour les mesures sur l'inducteur non fretté.

L'étalonnage des capteurs instationnaires est réalisé in situ tous les trois points de mesure pour s'affranchir des problèmes liés à la dérive des capteurs en température. Il faut cependant noter qu'il s'agit d'un étalonnage statique.

III ■ VISUALISATIONS

La campagne de visualisations entreprise a permis d'associer une figure de cavitation caractéristique à chaque région du plan $NPSH_{disp}/Q$. Sur la figure 3 sont indiqués les différents domaines observés, présentés sous forme adimensionnelle σ_{disp} / δ . A titre de comparaison, la figure 4 rappelle les résultats obtenus par Pagnier [1] sur l'inducteur non fretté.

Une première série d'expériences réalisée en diminuant le débit à $NPSH_{disp}$ fixé met en évidence trois régions :

- Une région I correspondant à un régime de fonctionnement assez stable et peu bruyant, où est observée uniquement une cavitation d'aubage. Cette zone s'étend sur la même plage de débit pour l'inducteur fretté et l'inducteur non fretté ($\delta > 0,3$).

On distingue une évolution différentes de part et d'autre du débit de dessin de l'inducteur, $\delta = 0,384$:

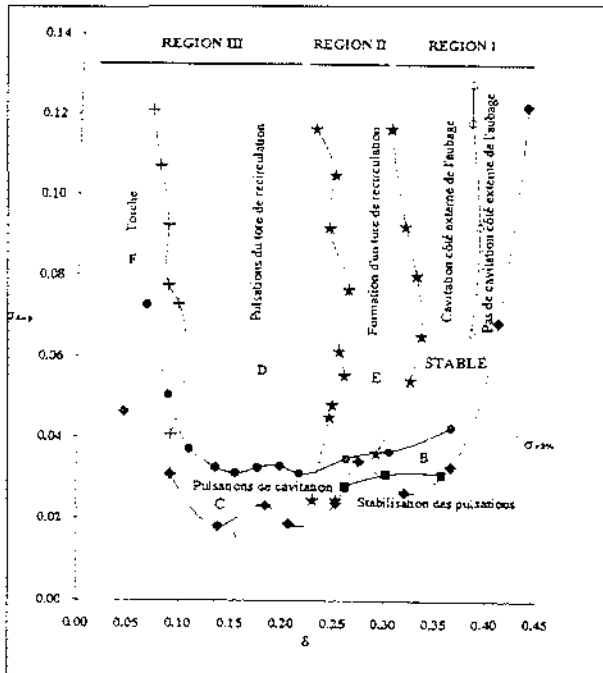
- pour des débits supérieurs ou égaux au débit de dessin de l'inducteur (incidence nulle ou négative), aucune forme de cavitation n'est décelable sur le côté extrados des aubes (seul côté visible à cause de la frette).

- pour des débits inférieurs au débit de dessin (incidence positive), on observe de la cavitation d'aubage sur le côté externe des aubes (extrados).

Le défaut d'incidence entraîne un décollement soit sur le côté interne (incidence négative), soit sur le côté externe (incidence positive) des aubes. Dans la zone décollée, la pression est faible et peut donner naissance à de la cavitation lorsque σ_{disp} est diminué. Selon la valeur de σ_{disp} , on observe soit une "lame" de vapeur attachée à l'aubage pour des σ_{disp} relativement élevés, soit des grosses bulles de vapeur qualifiées de cavitation à bulles séparées pour des σ_{disp} plus faibles.

- Une région II où se forme, à l'aspiration, un tore de recirculation et de prérotation au voisinage du carter. Ce régime de fonctionnement est accompagné de plus, par un bruit de crépitement très caractéristique.

La cavitation de recirculation apparaît tout d'abord de manière désorganisée puis, lorsque le débit est diminué, des poches de recirculation coniques se forment et s'organisent en trois petits cônes qui remontent l'écoulement. Le tore de recirculation se forme alors sur la base de ces trois cônes.



3. Domaines d'instabilités inducteur fretté.

- Dans une région III le tore de recirculation s'étend progressivement vers l'amont et se met à pulser quand le débit est diminué. L'écoulement est nettement moins bruyant et le bruit caractéristique de la région II n'est plus perceptible.

Pour de faibles débits, le tore s'étend plus loin à l'amont qu'il n'est visible au travers de la manchette transparente ($L = 50$ cm). Les pulsations du tore apparaissent pour des débits plus élevés ($\delta = 0,25$ au lieu de $0,22$) lorsque l'inducteur est fretté. Il se peut que la cavitation marginale, présente dans le cas non fretté, désorganise la formation du tore et que l'absence de cette figure de cavitation permette aux autres figures de s'installer plus facilement.

La zone de tore non pulsé visualisée sans la frette n'a pas pu être mise en évidence.

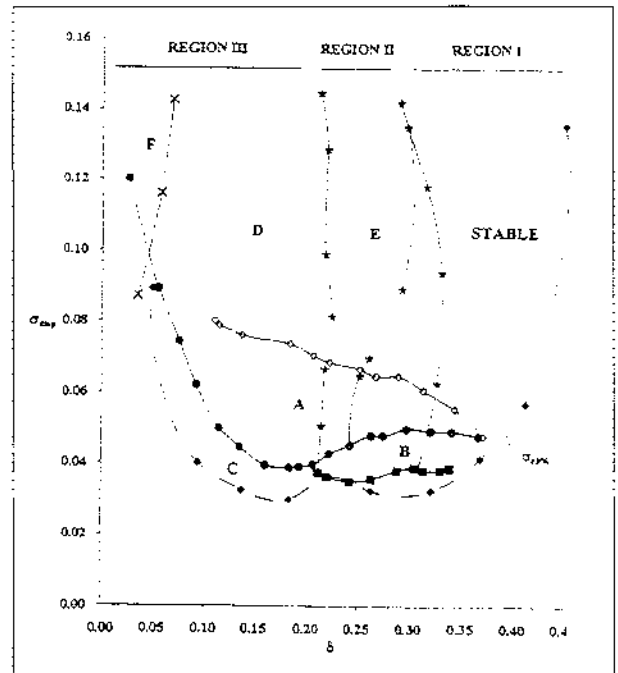
En diminuant davantage le débit, le tore de recirculation se contracte vers l'axe de la conduite d'aspiration et donne naissance à une torche pour $\delta \leq 0,09$ qui s'étend loin vers l'amont. Cette torche se forme alors que le tore de recirculation pulse encore, elle est instable et on observe également des pulsations.

Pour de très faibles valeurs de σ_{disp} et δ ($0,026 < \sigma_{disp} < 0,05$ et $0,046 < \delta < 0,114$), la torche occupe presque toute la conduite, il semble que celle-ci s'étende loin vers l'amont. Les pulsations de faible fréquence et forte amplitude de la torche semblent se propager jusqu'au réservoir d'aspiration situé à 9 m en amont de l'inducteur.

En effet, au voisinage du réservoir, on entend dans la conduite de très violentes implosions qui s'accompagnent de mouvements de la conduite à faible fréquence. La torche a un aspect très particulier ; elle est composée de grosses bulles.

Une deuxième série d'expériences réalisée en diminuant NPSH_{disp} à débit constant, montre que, de manière générale, lorsque NPSH_{disp} diminue, l'écoulement devient de plus en plus diphasique et la cavitation se met à pulser puis se stabilise (supercavitation).

Pour un coefficient de débit δ supérieur à $0,275$, en diminuant le σ_{disp} , on observe successivement : une remontée vers l'amont de petits filaments tourbillonnaires cavitants qui se détachent de



4. Domaines d'instabilités inducteur non fretté [1]

la cavitation de recirculation, puis l'apparition de la cavitation d'aubage en tête qui s'étend progressivement en direction du pied, puis des pulsations de cavitation qui s'atténuent progressivement et enfin la disparition des pulsations amenant à un écoulement assez stable.

Lorsque le coefficient de débit δ est inférieur à $0,275$, la diminution de σ_{disp} provoque successivement : l'apparition de trois petits cônes de recirculation qui remontent vers l'amont puis la diminution de l'étendue de cette recirculation avec une augmentation de la fréquence des pulsations. L'écoulement stable observé pour des débits plus élevés ne peut être atteint dans ce cas (les performances de la pompe à vide utilisée ne permettent pas d'obtenir de très faibles NPSH).

Quel que soit le débit, l'apparition des pulsations de cavitation est observée pour des valeurs de σ_{disp} plus faibles que dans le cas de l'inducteur non fretté.

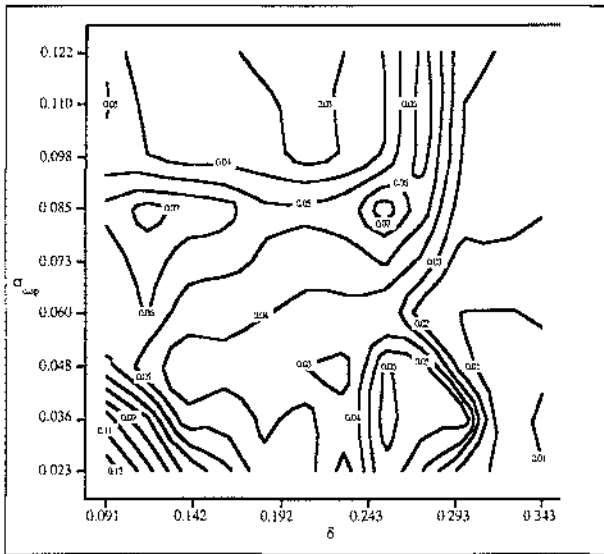
La présence de la frette empêchant de visualiser l'intérieur de la roue, il est impossible de déceler le moment où la poche de cavitation atteint le col du canal interaubes. De même les lâchers de poches visualisés dans le cas non fretté à l'intérieur du canal interaubes ne sont plus visibles.

IV ■ FLUCTUATIONS DE PRESSION

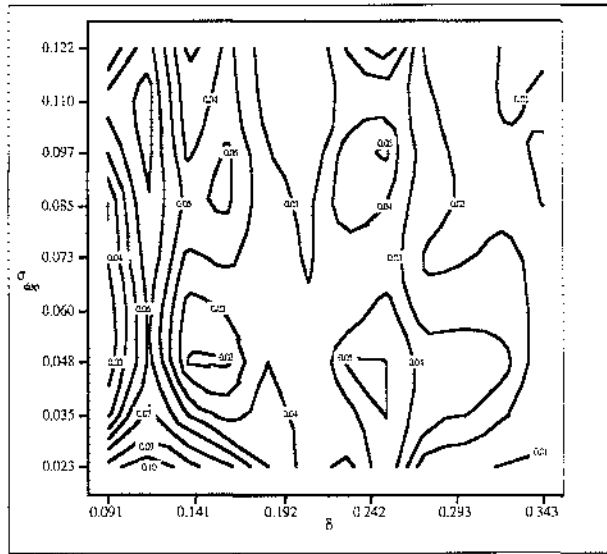
Nous avons mesuré en 123 points répartis dans le plan NPSH_{disp}/Q l'amplitude crête à crête des signaux de pression relevés à 2 m en amont de l'inducteur et à 1 m en aval de la roue centrifuge.

4.1 A l'amont de la machine

Les courbes isoamplitudes des fluctuations de pression à 2 m en amont de l'inducteur présentées sur la figure 5 mettent en évidence les mêmes domaines que ceux décelés lors des visualisations. Une analyse spectrale a été réalisée à partir de la transformée de Fourier rapide du signal de pression à 2 m en amont de l'inducteur. Les spectres des différents signaux comportent



5. Courbes isoamplitudes des fluctuations de pression à 2 m en amont de l'inducteur fretté.



6. Courbes isoamplitudes des fluctuations de pression à 2 m en amont de l'inducteur non fretté [1].

de manière générale trois pics notés F1, F2, F3 ($0 \text{ Hz} \leq F1 \leq 20 \text{ Hz}$, $20 \text{ Hz} \leq F2 \leq 80 \text{ Hz}$, $60 \text{ Hz} \leq F3 \leq 150 \text{ Hz}$) d'amplitudes plus ou moins importantes. Les figures 7a, 7b et 7c montrent les amplitudes respectives des pics F1, F2 et F3 dans le plan $NPSH_{diss}/Q$.

Le fonctionnement stable de la région I est confirmé par de très faibles fluctuations de pression.

Le domaine B dans lequel des pulsations de cavitation sont observées à la traversée de la roue de gavage, correspond à des fluctuations de faibles amplitudes, de basses et moyennes fréquences F1 et F2. Il est décalé vers des plus faibles $NPSH_{diss}$ dans le cas de l'inducteur fretté.

Le domaine C, lieu de manifestation de fortes pulsations de cavitation avec recirculation, présente des fluctuations de pression d'amplitudes très importantes et de basses fréquences. La limite supérieure du domaine C est décalée vers de plus faibles $NPSH_{diss}$ dans le cas fretté.

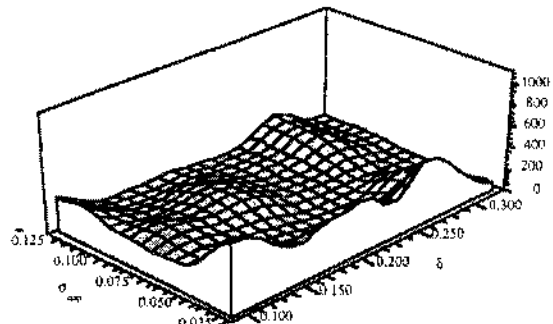
Le domaine D correspond à des amplitudes de fluctuations relativement faibles qui vont en augmentant lorsque l'on se rapproche de la zone F de formation de la torche. Le pic F1 de basses fréquences est prépondérant dans ce domaine. La limite droite du domaine est décalée vers des débits plus élevés dans le cas de l'inducteur fretté.

Le domaine E dans lequel la recirculation apparaît sous la forme d'un tore est le siège de fluctuations de fortes amplitudes. Le pic de hautes fréquences F3 est très présent dans ce domaine. Ce domaine s'étend sur une plage de débit plus restreinte dans le cas de l'inducteur fretté.

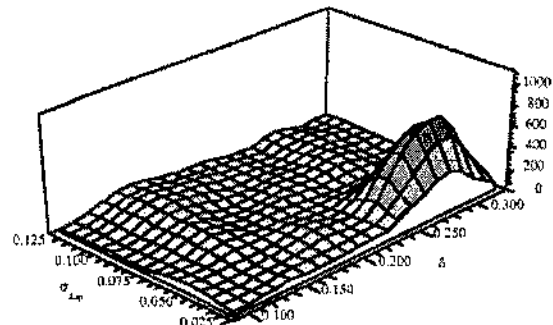
Dans le domaine F, caractérisé par la présence de la torche, les amplitudes des fluctuations sont relativement élevées pour de forts $NPSH_{diss}$ et de plus en plus importantes lorsque $NPSH_{diss}$ diminue. Le pic F1 de basses fréquences est le seul observable dans ce domaine.

4.2 A l'aval de la machine

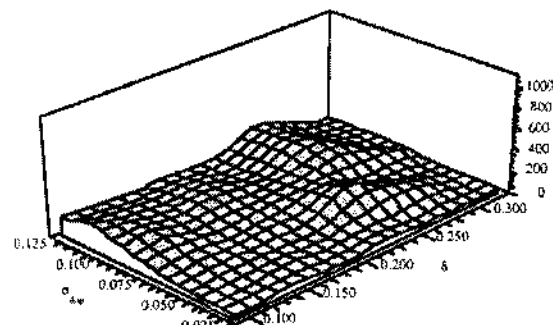
Les amplitudes des fluctuations de pression au refoulement de la pompe présentées figure 8 sont relativement faibles sur la majeure partie du plan $NPSH_{diss}/Q$, c'est-à-dire que les fluctuations de la pression amont ne se propagent pas à travers la roue



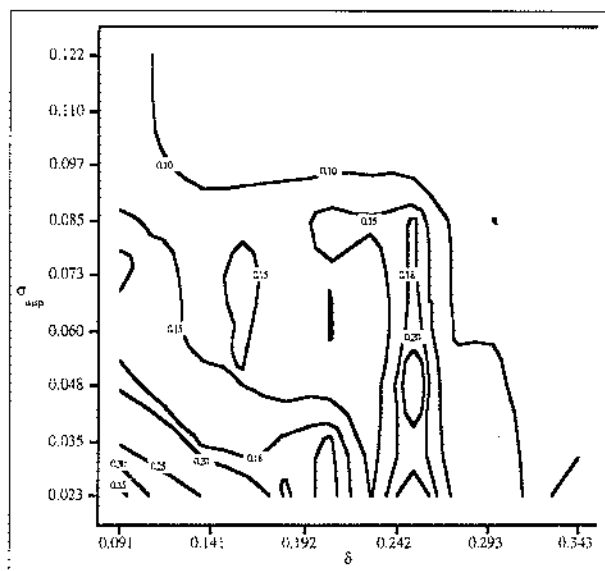
7a. Amplitudes du pic F1



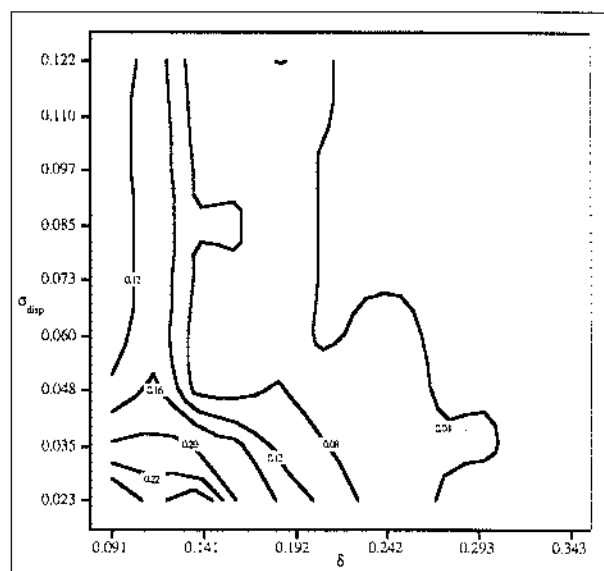
7b. Amplitudes du pic F2



7c. Amplitudes du pic F3



8. Courbes isoamplitudes des fluctuations de pression à 1 m en aval de la roue centrifuge. Cas fretté.



9. Courbes isoamplitudes des fluctuations de pression à 1 m en aval de la roue centrifuge. Cas non fretté [1]

centrifuge.

On note cependant de fortes fluctuations pour les faibles débits et bas $NPSH_{disp}$. Pour cette plage de fonctionnement les fluctuations de très fortes amplitudes visibles à l'amont traversent la roue. Une étude des signaux confirme que les pulsations amont et aval sont en phase.

Les amplitudes des fluctuations de pression à 2 m en amont de l'inducteur et à 1 m en aval de la roue centrifuge mesurées dans le cas fretté sont légèrement plus importantes que dans le cas non fretté. La présence de la frette n'a pas atténué les instabilités de fonctionnement à débit partiel de l'inducteur. Il se peut que la cavitation marginale ne soit pas aussi néfaste que l'on pouvait le penser et que, au contraire, celle-ci, en désorganisant les autres formes de cavitation, diminue les fluctuations de pression associées.

V ■ CONCLUSION

Les instabilités de fonctionnement de l'inducteur fretté placée en alimentation de la pompe centrifuge ont été étudiées. Les campagnes de visualisation et de mesures pariétales instationnaires dans les conduites amont et aval ont permis de déceler dans le plan $NPSH_{disp} / Q$ des domaines de fortes instabilités de fonctionnement de l'inducteur fretté.

Le domaine B dans lequel des pulsations de cavitation sont observées à la traversée de la roue de gavage, correspond à des fluctuations de faibles amplitudes, de basses et moyennes fréquences. Il est décalé vers des plus faibles $NPSH_{disp}$ dans le cas de l'inducteur fretté.

Le domaine C, lieu de manifestation de fortes pulsations de cavitation avec recirculation, présente des fluctuations de pression d'amplitudes très importantes et de basses fréquences. La limite supérieure de ce domaine est décalée vers des plus faibles $NPSH_{disp}$ dans le cas fretté.

Le domaine D correspond à des amplitudes de fluctuations relativement faibles qui vont en augmentant lorsque l'on se rap-

proche de la zone de formation de la torche. Les basses fréquences sont prépondérantes dans ce domaine. La limite droite du domaine est décalée vers des débits plus élevés dans le cas de l'inducteur fretté.

Le domaine E dans lequel la recirculation apparaît sous la forme d'un tore montre des fluctuations de fortes amplitudes. Les hautes fréquences sont très présentes dans ce domaine qui s'étend sur une plage de débit plus restreinte dans le cas de l'inducteur fretté.

Dans le domaine F, caractérisé par la présence de la torche, les fluctuations d'amplitudes sont relativement élevées pour de forts $NPSH_{disp}$ et de plus en plus importantes lorsque $NPSH_{disp}$ diminue. Dans ce domaine seules les basses fréquences sont présentes.

Dans tous les domaines, les fluctuations de pression dans le cas fretté sont pratiquement identiques à celles du cas non fretté. Ces fluctuations étant néfastes pour le circuit et la machine, leur atténuation est envisagée par un traitement de carter actuellement en cours d'essais.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée en collaboration avec EDF - DER (Electricité De France - Direction des Etudes et Recherches) et GEC ALSTHOM - BERGERON.

RÉFÉRENCES

- [1] PIGNIER P. (Dec. 1994). — Etude des Instabilités de Fonctionnement à Débit Partiel, de Roues de Gavage (Inducteurs) en Alimentation de Pompes Centrifuges. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 203 p.
- [2] ACOSTA A.J. (1958). — An experimental Study of Cavitating Inducers. Proceedings of Second Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington D.C., Aug. 25-29, pp 553-557.
- [3] JANIGRO A., FERRINI F. (1973). — Recent Progress in Pump Research. Von Karman Institute lecture serie 61.
- [4] LAKSHMINARAYANA B. (Dec. 1972). — Visualization Study of Flow in Axial Flow Inducer. ASME Journal of Basic Engineering, pp 777-787.
- [5] YENDIAR S. (May 1986). — Certain Effects of Recirculation on Cavitation in Centrifugal Pumps. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 260, n° A4, pp 283-292.