SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

Comité technique — Session n° 127 — Paris — 20 et 21 mars 1985

FONCTIONNEMENT DES TURBOMACHINES A DÉBIT PARTIEL

Synthèse de résultats d'essais en air et en eau en vue de la détection des débits critiques de recirculation à l'entrée et à la sortie de la roue d'une pompe centrifuge

*Synthesis of the results of tests in air and water
aimed at detecting the critical recirculating flow rates on the inlet
and outlet of a centrifugal pump impeller*

J.P. Barrand G. Caignaert
ENSAM
Lille

J.E. Graeser
EPF
Lausanne

E. Rieutord
INSA
Lyon

Dans le cadre d'un contrat de recherche financé par le ministère de l'Industrie et de la Technologie, deux roues de pompe centrifuge géométriquement semblables ($\omega_s = 0.577$) ont été définies et réalisées en vue d'essais en air et en eau. Ces essais réalisés à l'ENSAM Lille (air), à l'INSA Lyon, puis à l'EPF Lausanne (eau), avaient comme principal objectif la détermination des débits critiques de recirculation en entrée et en sortie de roue. Des méthodes très diverses utilisées pour cette détection ont été mises en œuvre (visualisations; exploitation des caractéristiques hydrauliques de fonctionnement : analyse des pressions moyennes et fluctuantes; mesures de vitesses). La concordance des résultats est bonne en ce qui concerne l'entrée de la roue. Le débit critique en sortie de roue apparaît par contre plus difficile à apprécier objectivement; il semble malgré tout plus élevée ($Q_k/Q_N \times 0,7$) que celui d'entrée ($Q_k/Q_N \approx 0.66$). Enfin, l'influence de divers paramètres sur ces débits critiques a pu être analysée (vitesse de rotation; type de diffuseur, fuite au labyrinthe).

In the framework of a research contract funded by the French Ministry of Industry and Technology, two geometrical by similar centrifugal pump impellers ($\omega_s = 0.577$) were designed and built for testing in air and water. The main purpose of these tests, conducted at ENSAM Lille (air) and at INSA Lyon and EPF Lausanne (water) was to determine the critical recirculation flow rates on the impeller inlets and outlets. A variety of methods were used for this detection (visualizations; analysis of the hydraulic operating characteristics; analysis of the mean and fluctuating pressures; velocity measurements). The results are in good agreement for the impeller inlet. However, an objective assessment of the critical flow rate on the impeller outlet appears to be more difficult; in any case, it seems higher ($Q_k/Q_N < 0.7$) than the inlet flow rate ($Q_k/Q_N 0.66$).

Finally, the influence of various parameters (speed of rotation; type of diffuser; leakage on the labyrinth) on the critical flow rates was analyzed.

***Synthèse de résultats d'essais en air et en eau
en vue de la détection
des débits critiques de recirculation à l'entrée
et à la sortie de la roue d'une pompe centrifuge***

Ce travail a été réalisé grâce à l'appui financier du ministère de l'industrie et de la technologie et des sociétés BERGERON et NEYRPIC, dans le cadre d'un contrat DGRST, et à la collaboration de:

- MM. BUEWAERT, COURTOIS, MAROUFI, NISSE, ROUCHETTE, VIDONNE (ENSAM Lille)
- MM. FAUCHERRE, MOMBELLI, PRENAT, RODRIGUEZ (EPF Lausanne)
- Mme TREBINJAC (INSA Lyon)

1. INTRODUCTION

- Dans le cadre du sous-groupe 1ef du groupe de travail No 1 de la division "Applications industrielles de la mécanique des fluides" de la S.H.F., il a été décidé en 1981 de tester, sur un véhicule d'essai de géométrie parfaitement bien définie, les diverses techniques de prédiction du début de recirculation. Ces travaux, tant théoriques qu'expérimentaux, ont pu être conduits grâce à l'obtention d'un financement du ministère de l'industrie et de la technologie (contrats 81.s.0881/0882/0883/0884) et à la contribution effective d'un maximum de participants au sein du sous-groupe.
- Les travaux présentés ici représentent la synthèse des résultats expérimentaux obtenus sur la roue "SHF" dans les laboratoires de l'ENSAM de Lille, de l'EPF Lausanne et de l'INSA de Lyon.
- Des essais en eau ont été effectués à l'INSA puis à l'EPFL sur une roue de diamètre extérieur 354,4 mm; des essais en air ont été

effectués à l'ENSAM sur une roue homothétique de diamètre extérieur 516,8 mm. Des techniques de visualisation ont permis d'observer et d'apprécier la valeur des débits critiques de recirculation en entrée et en sortie de roue; les diverses méthodes (fils, cavitation, injection de bulles) donnent des résultats qui sont assez concordants à l'entrée, mais qui s'avèrent plus dispersés et d'une exploitation beaucoup plus délicate en sortie. Ces résultats de visualisation sont ensuite comparés à ceux de plusieurs procédures quantitatives (utilisation des courbes de hauteur interne H_i et de puissance interne P_i en fonction du débit roue Q_R ; mesure et analyse des pressions et des vitesses). Enfin, l'influence de quelques paramètres sur les débits critiques de recirculation est analysée (vitesse de rotation; largeur et nature du diffuseur; fuite au labyrinthe).

2. MOYENS EXPERIMENTAUX

2.1. Caractéristiques de la roue

Fig. 1 Coupe de la roue essayée en eau

Le dessin de référence de la roue a les caractéristiques suivantes:

- diamètre de sortie $D_2 = 400 \text{ mm}$
- largeur en sortie $b_2 = 30 \text{ mm}$
- diamètre d'entrée $D_a = 220,2 \text{ mm}$
- nombre d'aubes $Z_R = 7$
- angle de sortie d'aubage $\beta_2 = 22^\circ 30'$
- épaisseur moyenne des aubes $e = 7 \text{ mm}$
- vitesse de rotation nominale $N = 1200 \text{ t/min}$
($\omega = 125,66 \text{ rad/s}$)
- débit de référence pour le tracé $Q_n = 0,112 \text{ m}^3/\text{s}$
- hauteur totale d'élévation (eau) $H_n = 31 \text{ m}$

Ces données conduisent aux caractéristiques adimensionnelles suivantes:

- coefficient de débit $\phi = Q_n / (2\pi R_2^3 b_2 \omega) = 0,118$

- coefficient de hauteur

$$\psi = g H_n / (\omega^2 R_2^2) = 0,481$$

- rapidité spécifique

$$\omega_{sn} = \omega Q_n^{1/2} / (g H_n)^{3/4} = 0,577$$

La figure 1 représente la roue utilisée pour les essais en eau.

2.2. Roues pour les essais en eau et en air

Deux roues, géométriquement semblables aux données de référence, ont été coulées en bronze. La table 1 en précise les principales dimensions: la taille de la roue pour essais en eau a été choisie de façon à s'adapter facilement au corps de pompe de l'INSA de Lyon; celle de la roue pour essais en air a été choisie aussi grande que possible compte-tenu de la vitesse de rotation et de la puissance disponibles, en vue de respecter au mieux la condition de similitude de Reynolds sans que les effets de compressibilité ne deviennent notables.

Fluide	$D_2 \text{ (mm)}$	Vitesse de rotation $N \text{ (t/min)}$	Nombre de Reynolds $Re = (\omega R_2^2)/\nu$	Nombre de Mach $M = \omega R_2/a$
eau	354,4	1100	$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $Re = 3,61 \cdot 10^6$	$M = 0$
air	516,80	2500	$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $Re = 1,17 \cdot 10^6$	$a = 340 \text{ m/s}$ $M = 0,197$

Table 1

2.3. Banc d'essais en eau de l'INSA

La figure 2 montre un schéma général du banc d'essais de l'INSA.

Fig. 2 Vue schématique de la boucle d'essais en eau de l'INSA

Fig. 3 Coupe de la pompe pour essais en eau à l'INSA avec le dispositif de contrôle du débit de fuite

La canalisation d'aspiration a une longueur droite de 1,40 m. Cette canalisation et la face avant du corps de pompe sont en plexiglass (voir figure 3). Le débit est mesuré à l'aide d'un venturi; la hauteur totale d'élévation de la pompe est déterminée à partir de la mesure de hauteur piézométrique dans les sections A et B (voir figure 4) à l'aide de deux capteurs de pression Validyne à membrane interchangeable et conformément aux codes d'essais de pompes ([1]); ces capteurs sont étalonnés à l'aide d'un manomètre à mercure.

Fig. 4 Localisation des sections de mesure de la pression pour les essais en eau à l'INSA

Fig. 5 Boucle d'essais en eau de l'EPFL

La pompe est entraînée par un moteur balance à courant continu de 45 kW. Un codeur optique (4096 points) permet d'accéder en permanence à la vitesse de rotation.

2.4. Banc d'essais en eau de l'EPFL

La pompe a été essayée sur une extension (fig. 5) du stand d'essai universel de l'Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides de l'EPFL ([2]). Elle a été montée en position verticale (figure 6) avec le même tube d'aspiration que décrit en 2.3. Le débit est mesuré à l'aide d'un débitmètre électromagnétique. La hauteur totale d'élévation est déterminée à partir de mesures effectuées dans les sections I et III; cette disposition permet d'éliminer les écarts dus à l'influence éventuelle d'une prérotation dans le tube d'aspiration. Le couple sur l'arbre est mesuré directement sur le stator de la machine électrique montée en pendule sur paliers hydrostatiques.

2.5. Banc d'essais en air

La roue de plus grand diamètre est essayée en air en boucle ouverte. La machine est entraînée par un moteur balance à courant continu dont la vitesse peut varier jusqu'à 3000 t/min.

La figure 7 présente les principales dimensions de l'environnement: la roue est suivie d'un diffuseur à 6 aubes géométriquement semblable à celui des essais en eau. Ce diffuseur est suivi d'une volute de section constante à sortietangentielle dont la largeur peut être ajustée.

Fig. 6 Schéma de l'installation de la pompe à l'EPFL

Il faut remarquer que le joint A (figure 7) n'a pas été utilisé durant les essais décrits ci-après, et qu'il nous a donc fallu faire une estimation par le calcul du débit de fuite pour pouvoir accéder au débit traversant la roue.

La figure 8 décrit schématiquement la boucle d'essais. Les performances de la machine sont obtenues à partir des mesures suivantes:

- conditions ambiantes (pression, température, humidité relative)
- différence de pression entre l'entrée et la sortie de la machine

Fig. 7 Coupe de la machine pour essais en air

Fig. 8 Schéma du banc d'essais en air

- température de sortie
 - différence de pression au diaphragme
 - vitesse de rotation et couple sur l'arbre.
- Le débit est mesuré à l'aide d'un diaphragme au refoulement, conformément aux normes ([3]).

2.6. Performances de la machine

Les performances globales obtenues en air et en eau, ramenées aux conditions de définition de la roue (voir 1.1) par application des règles classiques de similitude, sont représentées sur les figures 9 et 10.

Fig. 9 Comparaison des caractéristiques de la pompe à l'INSA et à l'EPFL

Fig. 10 Caractéristiques de la machine essayée en air

Les courbes obtenues à l'INSA et à l'EPFL, bien que concordant dans leur ensemble, présentent des différences parfois appréciables qui trouvent partiellement une explication dans les considérations suivantes:

- la hauteur totale d'élévation n'est pas déterminée entre les mêmes sections

- les pertes mécaniques ont été estimées par l'INSA et prises en compte mécaniquement à l'EPFL

- le positionnement axial de la roue par rapport au diffuseur peut ne pas avoir été identique dans les deux montages.

Pour les essais en air, la courbe de puissance représentée correspond à la puissance interne obtenue à partir de la puissance sur l'arbre diminuée d'une estimation des pertes par frottement de disques.

Les points de meilleur rendement sont obtenus pour des débits mesurés de l'ordre de 90 l/s en eau et de 75 l/s en air. Ces valeurs, plus faibles que le débit de référence (112 l/s), traduisent à la fois l'effet du couplage roue-diffuseur et l'influence des fuites. Par la suite, tous les débits critiques mesurés ont été corrigés d'une estimation des fuites et comparés au débit de référence Q_n de la roue pour éviter toute ambiguïté. Cette estimation des fuites, à l'EPFL, s'appuie sur des mesures de pression dans les chambres des labyrinthes et sur les corrélations de VIANO ([4]). A l'INSA, le montage de la roue ne comportant pas de garniture d'étanchéité, le débit de fuite à l'arrière de la roue a été mesuré directement alors que le débit de fuite par les labyrinthes a été estimé par la méthode de VIANO.

3. VISUALISATIONS

3.1. Moyens mis en oeuvre

Comme le montre la figure 3 (essais en eau/INSA), des fils ont été collés sur la paroi de la canalisation d'aspiration au voisinage de l'entrée de la roue. Des fils ont également été collés sur le bord d'attaque de l'une des aubes de la roue; leur comportement, ainsi que les figures de cavitation sur ce bord d'attaque, ont pu être visualisés à l'aide d'un stroboscope et un film video a été réalisé.

Des fils ont également été placés sur des tiges traversant le diffuseur à un diamètre 365 mm (entre la sortie de la roue et le bord d'attaque des aubes du diffuseur): chaque tige porte deux fils situés à 5 mm du plafond et de la ceinture.

Diverses techniques ont été mises en oeuvre à l'EPFL pour visualiser les écoulements à l'entrée de la roue:

- les figures de cavitation ont été observées pour quelques régimes proches de la recirculation, à diverses valeurs de σ .
- des fils souples collés à la paroi d'aspiration permettent d'observer le comportement de l'écoulement sur la couronne extérieure, avant l'entrée de l'aubage.

Fig. 11 Schéma du dispositif d'injection de bulles d'air et allure des observations

- des bulles d'air ont pu être injectées à l'entrée de la roue, près de la paroi comme le montre la figure 11.

Pour les essais en air, des fils de laine et un générateur de fumée sont utilisés pour visualiser l'écoulement à l'aspiration; la sonde est à chaque fois introduite à travers la canalisation d'aspiration et peut être déplacée radialement et axialement. En sortie de roue, on utilise des fils de laine montés sur une tige traversant le diffuseur (voir figure 12).

3.2. Résultats à l'entrée

Les diverses visualisations effectuées, tant en air qu'en eau, permettent d'affirmer que:

- la recirculation d'entrée commence à la ceinture de la roue, comme le montrent les sondages effectués en air en différentes positions axiales ou radiales de la canalisation d'aspiration (fig. 13).
- la recirculation se traduit d'abord par des oscillations du fil situé le plus près de la roue, puis, pour une très légère réduction du débit, par son inclinaison de manière stable dans le sens de rotation de la roue avec une composante axiale légèrement négative (voir figure 14).

Fig. 12 Position des fils en sortie de roue (essais en air)

Fig. 13 Isovaleurs du débit critique de recirculation dans la canalisation d'aspiration (essais en air)

La figure 11 schématise les observations effectuées à l'EPFL à l'aide de bulles injectées à l'entrée de la roue près de la paroi : au voisinage de la recirculation d'entrée, on constate une modification de la direction d'entraînement des bulles dont le panache s'incline et s'allonge progressivement pour s'étendre ensuite sur toute la périphérie de l'aspiration. De même, les observations des figures de cavitation montrent une évolution progressive au voisinage de la recirculation: les bulles de cavitation se développant à partir de l'arête d'entrée, dans l'aubage, à proximité de la couronne extérieure, sont en partie refoûlées en direction de l'entrée, reprises par le courant et disparaissent dans le canal interaubes voisin.

Le tableau 2 ci-dessous résume les résultats obtenus avec les diverses techniques:

Observations	Banc d'essais	Localisation du phénomène	Débit critique relatif de recirculation Q _k (entrée)/Q _n
Figures cavitation	EPFL	arête d'entrée	0,65 - 0,69
mouvements de fils	EPFL	section IV (fig.6)	0,67
bulles d'air	EPFL	section IV (fig.6)	0,65 - 0,66
mouvements de fils	INSA	fig. 3	0,66
mouvements de fils fumée	ENSAM (2500 t/min)	devant la roue	0,67

Table 2

Fig. 14 Observation de fils dans l'écoulement à l'entrée de la pompe et différence de pression due à la prérotation entre les sections II et IV

3.3. Résultats en sortie

Les visualisations en sortie de roue se révèlent beaucoup plus difficiles à interpréter avec précision, compte tenu du caractère non permanent de l'écoulement. En air, on a pu constater que les quatre fils placés sur la largeur du diffuseur (figure 12) sont quasiment parallèles et présentent peu d'oscillations dans des régimes d'écoulement proches du débit nominal. Lorsqu'on diminue le débit, les fils se rapprochent de la direction circonférencielle; le fil 1 (côté ceinture, voir figure 12) devient plus tangentiel que les autres à partir d'un certain débit, commence à osciller plus fortement et se dirige même par instants vers la roue: ces observations indiquent donc une recirculation, au point de visualisation, du côté ceinture, mais cette recirculation ne semble pas apparaître brutalement et semble plutôt s'établir progressivement sur une plage de débits supérieurs au débit critique de recirculation à l'entrée comme l'indique la table 3 ci-dessous:

Observations	Banc d'essais	Débit critique de recirculation $Q_k(\text{sortie})/Q_n$
fils	INSA	0,68 → 0,72
fils	ENSAM (2500 t/min)	0,78 → 0,81

Table 3

Fig. 15 Comparaison des hauteurs H_1 et H'_1 obtenues à partir des essais en eau à l'INSA et à l'EPFL

Fig. 16 Détermination d'un débit critique à l'aide des courbes de puissance

4. DETERMINATION DES DEBITS CRITIQUES A L'AIDE DES CARACTERISTIQUES

On utilise ici la technique décrite par REY, GUITON, KERMAREC et VULLIOUD ([5]): pour chaque débit, on accède à la hauteur interne H_i à partir de la puissance sur l'arbre corrigée des pertes par frottement de disques et du débit traversant la roue Q_R ; on obtient ainsi l'évolution de H_i en fonction de Q_R , puis on trace la hauteur interne théorique H_i (sans recirculation) en prolongeant vers les faibles débits la courbe sensiblement rectiligne représentant H_i au voisinage du débit nominal; la position du point de séparation entre les deux courbes donne une estimation d'un débit critique de recirculation (voir figure 15). On peut aussi traduire ceci en puissance dissipée par recirculation en fonction du logarithme du rapport Q_R/Q_n (figure 16).

Cette méthode permet de définir un débit critique sans doute plus proche du débit critique de recirculation en sortie de roue comptenu du fait que les montages de mesures ont tous utilisé des conduites d'aspiration sans organe directeur. La table 4 ci-dessous résume les résultats obtenus sur les trois boucles d'essais par ces méthodes; ces résultats paraissent bien indiquer une action de recirculations sur les performances de la machine pour un débit supérieur au débit critique de recirculation visualisée à l'entrée.

Banc d'essais	EPFL	INSA	ENSAM
valeurs de Q_R/Q_n obtenues avec les courbes $H_i(Q_R)$	0,68 - 0,73	0,65 - 0,70	0,65 - 0,71
valeurs de Q_R/Q_n obtenues avec les courbes de puissance	0,74 - 0,78		0,73 - 0,78

Table 4

5. MESURES DE PRESSIONS

5.1. Pressions statiques moyennes

L'analyse de l'évolution des pressions statiques, à la paroi de la canalisation d'aspiration, en fonction du débit, permet de localiser avec une bonne précision l'apparition de la recirculation d'entrée, au droit de la prise de pression, comme le montrent les résultats de mesures effectuées à l'INSA et à l'EPFL (figure 14). Les résultats obtenus sont tout à fait cohérents avec les observations de l'écoulement puisque les débits critiques obtenus sont bien inférieurs au débit critique visualisé en entrée de roue.

Les pressions statiques mesurées sur les parois du diffuseur dans les essais en air n'ont pas donné de résultats significatifs du point de vue de la détection d'une recirculation éventuelle.

5.2. Analyse des fluctuations de pression

Des mesures de fluctuations de pressions ont été effectuées en eau (à l'EPFL) à l'aide de capteurs Kistler piézoélectriques disposés en divers endroits de la machine (positions ① à ⑤ - figure 6), pour différents débits, à deux vitesses de rotation (1100 et 1600 t/min). Des enregistrements effectués, il ressort que l'amplitude des signaux augmente lorsque le débit de la pompe diminue; par contre, les amplitudes à la fréquence de passage des aubes et son premier harmonique deviennent relativement moins importantes. La figure 17 montre les évolutions des niveaux moyens des fluctuations dans le domaine 0-500 Hz, en fonction du débit: à l'entrée de la pompe (capteurs ④ et ⑤) on constate que les courbes s'écartent fortement en dessous d'un certain débit ($Q/Q_n = 0,65$) ce qui peut s'interpréter par l'apparition de la recirculation au niveau du capteur ④; en sortie de roue, on observe un comportement assez "parallèle" des fluctuations de pression sur les deux faces du diffuseur tant que le débit relatif est su-

Fig. 17 Evolutions des niveaux moyens des fluctuations de pression à l'entrée et à la sortie de la roue

périeur à une valeur de l'ordre de 0,57: il existe donc probablement une différence d'écoulement sur les deux faces du canal à débit partiel. Ces courbes ont été traduites différemment sur la figure 18, de façon à tenter de dégager un critère d'apparition d'un changement de comportement de l'écoulement. Deux remarques peuvent être faites à l'entrée; on peut noter une zone critique pour un débit relatif de l'ordre de 0,64 ce qui semble assez cohérent avec les résultats de visualiation; à la sortie, il semble difficile d'exploiter les courbes obtenues.

En air, divers essais d'analyse des fluctuations de pression ont été effectués à l'aide de capteurs piézorésistifs ENDEVCO. Compte-tenu des faibles niveaux de fluctuations, les mesures à l'entrée de la machine n'ont pas donné de mesures exploitables. Seuls sont représentés ici (figure 19) les résultats d'analyse fréquentielle, pour la fréquence de passage des aubes et le double de cette fréquence, obtenus avec un capteur monté en paroi sur la face du diffuseur côté ceinture, à 8 mm environ de la sortie de la roue. A débit partiel, pour un débit relatif de l'ordre de 0,64, le rapport des deux amplitudes présente un maximum très net qui indique probablement un changement assez soudain de la forme du signal. La comparaison avec des essais de même type effectués à l'EPFL montre cependant bien la difficulté d'exploitation de telles mesures (figure 20) pour lesquelles la nature du fluide et les caractéristiques dynamiques de la boucle d'essais jouent sans doute un rôle important.

6. MESURES DE VITESSES

6.1. A l'entrée de la roue

Des essais ont été réalisés à l'EPFL à l'aide d'une sonde à 5 trous de type SENSOR disposée à proximité de l'arête d'entrée (figure 21). La figure 22 résume les résultats de trois sondages, pour trois débits différents, montrant l'existence d'un changement de direction de l'écoulement, à la ceinture, à débit partiel.

La figure 23 montre mieux l'évolution des conditions d'écoulement aux filets extérieurs: on y constate l'apparition de la recirculation du filet extérieur pour un débit relatif compris entre 0,64 et 0,65. Les mesures deviennent plus difficiles à interpréter lorsqu'on s'éloigne de la ceinture.

6.2. Vitesses moyennes en sortie de roue

La sonde précédente, parallèle à l'axe de la pompe, est introduite entre deux aubes du diffuseur, au milieu du canal, dans la disposition figurant sur la coupe de la machine (figure 21). L'étroitesse du canal rend ce sondage fort délicat. Les résultats à quatre dé-

Fig. 18 Evolution des écarts des niveaux moyens de fluctuations à l'entrée et à la sortie de la roue

Fig. 19 Analyse des fluctuations de pression en sortie de roue (essais en air à 2500 t/min avec diffuseur aubé)

Fig. 20 Comparaison des analyses des fluctuations de pression en sortie de roue dans les essais en air et en eau

Sondage de vitesses à l'entrée de la roue
Mesures à 1600 t/min

Fig. 22 Résultat des sondages de vitesse à l'entrée de la roue pour trois débits différents

Fig. 21 Position de la sonde SENSOR à l'entrée et à la sortie de la roue pour la mesure des vitesses moyennes d'écoulement

Sondages de vitesse à l'entrée de la roue

filet extérieur $R_x = 91.96 \text{ mm}$ $c_a = \dots$ $\gamma = \dots$
2ème filet $R_x = 87.63 \text{ mm}$ $c_a = \dots$ $\gamma = \dots$

Fig. 23 Evolution des caractéristiques de l'écoulement à l'entrée de la roue en fonction du débit

Fig. 24 Relevé de vitesse absolue en sortie de la roue lors des essais en eau à l'INSA (vélocimètre laser)

Fig. 25 Evolution de la composante radiale de la vitesse, C_d , en sortie de roue: résultats de mesures avec fils chauds

bits différents montrent une modification sensible de la répartition des vitesses dans le canal, mais aucune tendance permettant de définir une inversion de la vitesse liée à une recirculation.

6.3. Vitesses instantanées en sortie de roue

6.3.1. Vélocimétrie laser (essais en eau INSA)

Un vélocimètre laser à effet Doppler a été utilisé pour la mesure des vitesses instantanées en sortie de roue. Le signal Doppler, obtenu en rétrodiffusion, est traité par un compteur digital; en même temps, la position angulaire est mesurée à l'aide d'un codeur optique fournissant 4096 points par tour. La composante de vitesse mesurée et la position angulaire sont entrées dans la mémoire centrale du microcalculateur HP 9826 utilisé pour le traitement de signal.

Les composantes radiale et circonférencielle de la vitesse ont été relevées successivement à 4 mm derrière la roue, au milieu du canal du diffuseur. Chacun des tracés de la figure 24 est le résultat de la superposition de 2000 mesures ramenées à un tour de roue. Avec ce mode de représentation, les écarts d'un tour sur l'autre, mettant en évidence des phénomènes instationnaires dans l'espace lié à la roue, se présentent sous forme d'une dispersion verticale. Les résultats, pour trois débits choisis à titre d'illustration, indiquent clairement une désorganisation de l'écoulement à un débit critique voisin de $0,070 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui est plus élevé que le débit critique visualisé à l'entrée.

6.3.2. Mesures en air à l'aide de fils chauds

Des mesures de vitesses ont été faites en air à l'entrée du diffuseur, à environ 10 mm de la sortie de la roue, à l'aide d'une sonde à deux fils croisés.

Une description de la technique utilisée a été faite par DESMET ([6]). Les signaux de sortie des deux anémomètres obtenus durant 16 tours de roue sont échantillonnés (environ 500 relevés par tour) et enregistrés dans une mémoire numérique avant transfert et traitement par un microcalculateur permettant d'obtenir les composantes radiale et circonférencielle instantanées de la vitesse absolue au point de mesure. Les 16 valeurs enregistrées à des instants homologues par rapport à la position de la roue sont alors moyennées arithmétiquement. La figure 25 représente un certain nombre des résultats ainsi obtenus pour l'évolution de la composante radiale de la vitesse à 5 mm du flasque arrière (A), en milieu du canal du diffuseur (B) et à 5 mm du flasque avant (C) pour des débits inférieurs au débit nominal. Les intervalles no-

Fig. 26 Evolution de l'orientation des fils placés dans le tube d'aspiration en fonction du débit pour différents réglages du débit de fuite.

Fig. 27 Caractéristiques globales de la pompe équipée d'un diffuseur large lors des essais en eau à l'INSA

tés sur les axes des abscisses représentent les instants correspondant au passage des aubes.

Lorsqu'on réduit le débit, on constate que la composante radiale de la vitesse devient de temps en temps négative au voisinage du flasque avant, ce qui semble confirmer les observations effectuées.

Ces mesures sont actuellement reprises de façon à améliorer leur précision et seront également complétées.

7. INFLUENCE DE DIVERS PARAMETRES

7.1. Vitesse de rotation

En air, des essais ont été effectués à trois vitesses de rotation, et par conséquent à des valeurs différentes des nombres de Reynolds et de Mach. On n'enregistre que de faibles modifications des performances de la machine; le débit critique relatif de recirculation visualisé à l'entrée est quasiment constant; les écarts sont plus importants à la sortie, mais les phénomènes y sont plus difficiles à analyser. La table 5 résume les divers résultats.

Vitesse de rotation (t/min)	$Q_k(\text{entrée})/Q_n$	$Q_k(\text{sortie})/Q_n$
2500	0,67	0,78 - 0,81
2000	0,69	0,81 - 0,85
1700	0,68	0,78 - 0,82

Table 5

7.2. Ecoulement de fuite au labyrinthe

Comme le montre la figure 3, une conception spéciale des labyrinthes a été adoptée, sur la machine essayée en eau à l'INSA, qui permet de faire varier la fuite et d'en contrôler le sens tant à l'entrée qu'à la sortie de la roue: ceci est réalisé au moyen de deux chambres annulaires qui peuvent être reliées à diverses pressions extérieures par l'intermédiaire des vannes de contrôle V1 et V2. La commande de celles-ci provoque les directions de fuite données par la table 6. Le débit critique de recirculation à l'entrée semble uniquement modifié dans le cas d'un écoulement de fuite inversé à l'entrée (voir figure 26).

Une réduction du débit de fuite, sur la machine essayée en air, a pu être réalisée à l'aide d'un labyrinthe; aucun effet sensible sur la recirculation n'a pu être noté.

Position des vannes (figure 3)		Direction de la fuite
V1	V2	
fermée	fermée	standard
reliée à la pression ambiante ($p_1 > p_{atm}$)	fermée	inversion du sens de la fuite à l'entrée de la roue
fermée	reliée à une pression importante	inversion du sens de la fuite à la sortie de la roue
reliée à la pression ambiante ($p_1 > p_{atm}$)	reliée à une pression importante	inversion du sens de la fuite en entrée et sortie de roue

Table 6

7.3. Largeur du diffuseur

Les essais préliminaires en eau, à l'INSA, ont été réalisés avec un diffuseur plus large (43 mm au lieu de 30 mm par la suite). Les résultats de visualisation de fils sur la canalisation d'aspiration sont donnés par la figure 27. Le rendement global maximal est naturellement obtenu pour un débit plus important, et la zone de transition à l'approche de la recirculation est plus large ($Q_k(\text{entrée})/Q_n \approx 0,65$).

7.4. Diffuseur lisse

En air, des essais ont été réalisés avec un diffuseur lisse de même largeur que le diffuseur à aubes. Les débits critiques visualisés sont donnés par la table 7, et semble légèrement plus faibles que ceux obtenus avec le diffuseur aubé.

La figure 28 donne les résultats d'analyses fréquentielles des fluctuations de pression en sortie de roue (côté ceinture); les évolutions obtenues sont totalement différentes de celles rencontrées avec le diffuseur aubé (figure 20), ce qui montre bien les difficultés d'interprétation de telles mesures.

Les essais de variation de largeur de la volute torique n'ont pas mis en évidence de différence sensible sur les visualisations de recirculations.

Vitesse de rotation (t/min)	$Q_k(\text{entrée})/Q_n$		$Q_k(\text{sortie})/Q_n$	
	diffuseur aubé	diffuseur lisse	diffuseur aubé	diffuseur lisse
2500	0,67	0,65	0,78 - 0,81	0,72 - 0,76
2000	0,69	0,64	0,81 - 0,85	0,73 - 0,78
1700	0,68	0,65	0,78 - 0,82	0,77 - 0,81

Table 7

Fig. 28 Analyses des fluctuations de pression en sortie de roue (essais en air à 2500 t/min avec diffuseur lisse)

8. CONCLUSION

Les essais décrits, en air et en eau, destinés à déterminer les débits critiques de recirculation aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de la roue, comportent deux approches:

- l'une, globale, fondée sur l'exploitation des mesures de puissance, permet de définir un débit critique sans pouvoir préciser s'il s'agit de phénomènes localisés à l'entrée ou à la sortie de la roue.
- les autres, fondées sur l'observation et les mesures locales à l'entrée et à la sortie de la roue séparément, permettent de définir des débits critiques dont les valeurs présentent une concordance satisfaisante à l'entrée mais divergent en sortie.

Les débits critiques relatifs Q_k/Q_n à l'entrée de la roue sont concentrés dans une plage assez étroite qui se situe entre 0,65 et 0,67. Ces résultats confirment celui obtenu par utilisation de la corrélation de FRASER ([7]) qui conduit à une valeur située entre 0,63 et 0,67 selon le choix adopté pour l'aire de la section d'entrée.

A la sortie de la roue, la faible largeur du canal ne facilite pas l'observation du phénomène de recirculation. Son caractère non permanent dans l'espace fixe rend également difficile l'utilisation de moyens classiques.

Les variations de vitesse de rotation tant en air qu'en eau n'ont pas apporté de variations significatives des débits critiques.

Une variation du débit de fuite, dans le sens normal de la fuite au labyrinthe, ne semble pas avoir d'effet significatif. Les essais en air montrent enfin que l'utilisation d'un diffuseur lisse conduit à des débits critiques légèrement plus faibles qu'avec le diffuseur aubé essayé.

En conclusion, il nous semble que la poursuite d'essais, destinés à mieux connaître la structure des écoulements en sortie de roue au voisinage du débit critique de recirculation, mérite d'être soutenue. L'utilisation des résultats fournis par l'utilisation de la vélocimétrie laser ou des fils chauds et des techniques d'analyse des phénomènes fluctuants doit fournir une base solide pour l'interprétation des phénomènes complexes qui accompagnent l'apparition des recirculations et apporter ainsi des éléments favorables au développement des codes de calcul.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 Normes NF X 10 - 601, NF X 10 - 602, NF X 10 - 603: Codes d'essais de pompes centrifuges, hélico-centrifuges et hélices.
- 2 BOVET, HENRY - Le nouveau stand d'essai universel pour machines hydrauliques à réaction. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1970.
- 3 Normes NF X 10 - 102, NF X 10 - 104: Mesures de débit au moyen de diaphragmes, tuyères et venturis.
- 3 VIANO - Considérations et essais sur les labyrinthes cylindriques lisses des machines hydrauliques. La Houille Blanche, No 1, 1970, p. 55-61.
- 5 REY, GUITON, KERMAREC, VULLIoud - Etude statistique des caractéristiques à débit partiel des pompes centrifuges et de détermination approchée du débit critique de recirculation. La Houille Blanche, No 2-3, 1982, p. 107-120.
- 6 DESMET - Mesures de pressions et de vitesses dans un ventilateur centrifuge (rotor et stator) avant et après l'apparition et la disparition de décollement tournant. La Houille Blanche, No 2-3, 1982, p. 167-174.
- 7 FRASER - Recirculation in centrifugal pumps. World pumps, 1982, 188 p. 227-235.

Discussion

Président : M. Le Professeur J. MATHIEU

M. AMBLARD constate que la recirculation apparaît à la sortie de la roue en pompe pour un débit supérieur à celui d'apparition de la recirculation d'entrée et que le tourbillon de recirculation à la sortie de la pompe est situé côté ceinture alors qu'en général il se situe côté plafond.

Il fait remarquer que la position de la recirculation à la sortie de la roue dépend peut-être non seulement du tracé de la machine mais aussi du centrage de l'axe médian de la roue par rapport à celui des parties fixes puisqu'à débit nul la puissance absorbée varie selon l'alignement des plafonds ou des ceintures de la roue et des parties fixes; il suggère des essais.

M. BARRAND observe que l'apparition de la recirculation est liée à un défaut de débit et confirme que le dessin de la roue peut donc avoir une influence.

M. BORCIANI souligne l'intérêt de la recherche expérimentale

effectuée sur la pompe S.H.F. aussi bien pour l'étude des phénomènes de débit critique que pour la collaboration internationale France-Suisse-Italie à laquelle elle donne lieu. Il remarque que l'un de ses buts est de permettre la vérification des résultats théoriques obtenus par le sous-groupe de travail « calculs » et demande si des comparaisons calcul-expérience sur les distributions de vitesse à l'entrée et à la sortie de la roue ont été effectuées.

M. BARRAND précise que les résultats expérimentaux doivent être affinés mais qu'une partie de la réponse sera donnée par le sous-groupe « calculs ».

M. WEGNER fait observer que dans l'exposé, les recirculations d'entrée et de sortie semblent découplées, ce qui n'est pas le cas dans l'écoulement physique.

Il suggère d'intercorrélérer les signaux des capteurs de pression d'entrée et de sortie lors des analyses futures.