Prédiction des poches de cavitation à l'entrée d'une pompe

Comparaison calculs/expérience

J.M. Dorey

EDF. Direction des Etudes et recherches, Chatou

1. Introduction

L'extension de plus en plus fréquente des plages de fonctionnement de matériels de centrales thermiques ou hydrauliques a conduit EDF à chercher à se doter de moyens d'analyse du comportement des machines hydrauliques dans ces conditions. Vis-à-vis de la cavitation en pompe, les critères étant souvent visuels, notre intérêt s'est porté sur les modélisations des structures de vapeur. L'aspect prépondérant dans ce type de problème étant la cavitation par poche attachée au bord d'attaque des aubes, EDF/DER a demandé au CREMHyG d'appliquer aux pompes des méthodes qu'il avait développées en bidimensionnel, permettant la prévision de l'extension des poches.

Le code est un calcul aube-à-aube basé sur une méthode de singularités, bien adapté dans ce cas du fait du peu de nombre d'inconnues et de la souplesse possible sur la géométrie. Elles sont d'ailleurs aussi utilisées en méthode inverse pour l'optimisation de forme d'aubes vis-à-vis de la cavitation (réf. 3).

Si le but premier d'une telle démarche est de permettre de porter un jugement avant essais (visualisation sur machine réelle ou modèle réduit), à terme d'autres applications devraient découler de ses développements : information sur l'agressivité érosive (gradient de pression derrière la poche), incidence sur les performances de la machine.

Pour tester le code proposé, des essais et calculs comparatifs ont été réalisés sur un modèle de pompe-turbine.

2. Le code de calcul

2.1. Principe

Ce code est l'application aux turbomachines d'une méthode déjà utilisée dans des configurations bidimensionnelles. Il s'insère dans un calcul de type quasi tridimensionnel (Q 3 D) en effectuant la partie « aube-à-aube ».

A partir de la géométrie du tube de courant et du profil que définit son intersection avec une aube, l'écoulement est modélisé à l'aide de singularités réparties sur le profil et la poche, et la grille axisymétrique est transformée en grille plane. Les singularités sont du type sources + doublets normaux. Le problème est résolu en vérifiant les conditions aux limites d'une façon exacte aux points de contrôle (milieux des facettes) et d'une façon optimale entre ces points (réf. 1). Ces conditions aux limites sont, outre les conditions classiques (vitesse normale sur le profil et la poche, condition de Joukowski), des conditions spécifiques : pression constante dans la poche, longueur du raccordement au profil (ici sur 4 facettes), condition limite sur ce raccordement.

Le point de détachement et la longueur de la poche étant préalablement fixés, un processus itératif permet de converger vers la forme de la poche qui est à la fois une ligne de courant et une ligne isobar. Le résultat est alors la valeur du C_p dans la poche, dont on peut déduire le NPSH.

Forecasting of cavitation sheets at a pump inlet. Calculations/experiment comparison.

By applying an integral equation method to a blade to blade calculation, an attempt is made to forecast the cavitation pocket expansion at the peripheral edges of pumps according to the NPSH function. The code, created by the CREMHyG, has been linked to a quasi-3-D calculation. A comparison with the experiment was effected on a pump-turbine model. The calculation results express in relief form the high repressing behind the pocket which extends over a zone larger than the corresponding non-cavitating depression zone. The cavity lengths obtained are, however, shorter than those observed on the model. This seems ascribable to the modelization being too constrained concerning the downstream profile pocket readherence, the fixed profile calculation showing strong sensitivity of the type of connection.

(a) roue (b) manchette plexiglass

1. Schéma du modèle turbine pompe.

	Q/Q_0	NPSH			
		(1)	(2)	(3)	(4)
2A	1	7,56	7,36	6,14	5,03
2B	0,8	5,27	6,11	7,39	
2C	0,9	4,94	6,18	7,05	9,81

2. Relevés photographiques des poches de cavitation.

3A. Poche de cavitation ($m\theta$).

3B. Valeurs du C_p sur l'aube.

4. Longueur des poches en fonction du NPSH. Comparaison mesure-calculs.

Ajoutons que, dans le cas des machines hydrauliques, une boucle d'itération supplémentaire est nécessaire pour prendre en compte la non-harmonicité du potentiel due à la variation d'épaisseur du tube de courant.

2.2. Utilisation

L'interface de ce code vers un calcul méridien n'ayant pas encore été réalisée, le test a consisté à effectuer d'abord un calcul complet Q 3 D classique (couplage COMETR-KATSANIS sur 9 tubes de courant), puis à utiliser les résultats du second méridien comme données pour le calcul en cavitation. L'éventuelle influence de la poche sur l'équilibre radial n'a donc pas été prise en compte.

Les poches ont été calculées sur 3 tubes de courant : 2 (proche du moyeu), 5 (milieu de pale), et 8 (poche du carter), et l'aube a été maillée par 64 facettes.

3. Expérimentation

La comparaison avec l'expérience a porté sur un modèle de turbine-pompe (Venteuil) de n_s 45 à 9 aubes, de diamètre d'entrée 25 cm (fig. 1) installé sur le banc d'essais de turbine-pompe de Chatou. Les essais ont été effectués à 1 500 tr/mn à 3 débits : $Q_n/0,9$, $Q_n/0,8$, Q_n pour plusieurs NPSH. Une manchette d'aspiration en plexiglass a permis une visualisation directe. Des photographies des pales, sur lesquelles a été tracé un quadrillage, ont été prises à l'aide d'un flash court (4 ms) et puissant (20 Joules), déclenché par un top-tour, ce qui a montré l'extension de la cavitation selon le NPSH et le débit.

Dans un premier temps, il a été constaté que la cavitation avait un aspect discontinu, en forme de dièdre prenant naissance au bord d'attaque et/ou de bulles. Cela a été imputé à la faible rugosité, les pales ayant été peintes. Pour augmenter cette rugosité, nous avons collé sur certaines pales de fines particules de taille inférieure à 50 μ m sur 3 à 4 mm au bord d'attaque. La cavitation est devenue plus homogène, se présentant sous la forme d'une poche continue du carter au moyeu. Cependant, son extension dans le sens de l'écoulement est du même ordre que sous la forme précédente, sauf pour de faibles longueurs de poche (inférieures à 5 mm) pour lesquelles, en l'absence de rugosité, il n'y a pas de structure de vapeur.

Les relevés de géométries de poche (fig. 2A, B, C) à divers NPSH sont le résultat d'une moyenne sur une quinzaine de photographies par point (Q, NPSH) les écarts étant inférieurs à ± 3 mm.

4. Résultats et commentaires

La comparaison avec le code aube-à-aube du Q 3 D (KATSANIS) ayant montré une bonne similitude des résultats, les calculs ont porté sur des longueurs de poche inférieures à 60 mm.

Les figures 3A et B présentent des résultats typiques : le C_p est constant dans la poche et le recollement au profil s'accompagne d'une recompression notable. La poche se développe au-delà de la zone en dépression correspondante en calcul non cavitant.

La convergence est obtenue en moins de 10 itérations. Le choix de la facette de début de poche (ici 1^{re} ou 2^e facette de la face en dépression) a peu joué sur les résultats.

La confrontation avec les résultats d'expérience montre cependant de forts écarts sur les courbes NPSH - longueur de poche (fig. 4).

D'une part, à débit nominal, le déséquilibre entre moyeu et carter (progression plus rapide de la poche au carter) ne se retrouve pas sur le calcul qui fait apparaître à NPSH donné une plus grande poche en milieu de veine qu'au carter (ce déséquilibre se réduit à 0,8 Q_n et 0,9 Q_n).

D'autre part, les écarts bruts pour une longueur de poche donnée entre calcul et expérience sont relativement importants (de l'ordre de 30 %) sur les tubes 5 et 2 et très importants sur le tube 8.

Plusieurs éléments peuvent être à l'origine de tels écarts :

- *la modélisation de la fermeture de la poche* : Les comparaisons calcul-expérience sur profil fixe ont déjà mis en évidence l'importance du raccordement en aval sur la forme des courbes (σ , l). Le type de fermeture adapté aux écoulements en pompe reste à mettre au point et valider ;
- *la précision du calcul méridien en entrée* : Les courbes (NPSH, L) sont bien évidemment étroitement liées à la répartition des épaisseurs de tubes de courant en entrée. Divers points (prise en compte du blocage des aubes, forme fortement gauche de l'aube, blocage par couches limites pariétales) peuvent être à l'origine d'écarts entre calcul et mesures ;
- *l'influence de la présence de la poche sur le calcul méridien* : Dans notre procédure, elle n'est pas prise en compte, ce qui pourra être fait à terme, si le bouclage Q 3 D est fait avec les résultats du calcul cavitant ;
- *la fluctuation des poches*, qui affecte dans notre cas 15 à 20 % de la longueur de la poche : la définition du point de fin de poche est alors relativement imprécise.

5. Conclusions

Une méthode de calcul de poche de cavitation en pompe a été testée et comparée à l'expérience. Les principes qu'elle utilise rendent le calcul rapide et compact, mais les résultats, bien que meilleurs que ceux obtenus par la simple approximation « poche = zone à pression inférieure à la pression de vapeur » sur les calculs classiques équivalents, sont actuellement encore loin d'être précis.

Cependant, la méthode est en évolution et divers éléments sont encore à ajuster, notamment la modélisation de la fermeture de poche qui s'avère être le point sensible du modèle. De plus, il apparaît souhaitable que la validation soit faite sur une expérimentation permettant de s'affranchir des problèmes méridiens.

Références

- [1] PELLONE C. — *Calcul de l'écoulement autour des structures minces par la méthode des singularités*. Thèse Doctorat d'Etat INPG, Avril 1985.
- [2] PELLONE C., BLOTTIAUX O. — *Etude des poches de cavitation dans les pompes*. CREMHYG Convention EDF, Décembre 1985.
- [3] FAURE J.N., AVELLAN F., RYMING I.L. — *Cavitation performance improvement by using a 2D inverse method of hydraulic runner design*. ICIDES II, Octobre 87, Pennsylvania St. Univ.

Adresse de l'auteur
Monsieur J.M. Dorey
EDF-DER
Département Machines,
6, quai Watier
78406 Chatou
Tél. : 30 71 77 17

Discussion

Présidents : MM. CHI-YIEN-CHIEM et J. M. MICHEL

M. AVELLAN : fait remarquer que la longueur de la cavité estimée à partir de l'observation visuelle est nettement supérieure à celle que l'on peut déterminer à partir de mesures de pression, en considérant le palier $p = p_r$ et demande comment est estimée la longueur de cavité dans l'étude présentée par M. DOREY.

M. DOREY : précise que la longueur de cavité prise en compte correspond à la partie de la cavité cohérente visuellement c'est-à-dire non fluctuante. Il fait remarquer que même dans la zone de recompression, il existe des structures de vapeur qui tendent à surévaluer la longueur de poche observée par rapport au palier $p = p_r$.

M. AMBLARD (Neyrpic) : fait remarquer que la poche n'est pas équilibrée entre plafond et ceinture.

M. DESCLAUX : insiste sur les hypothèses simplificatrices des modèles de cavitation qui sont développés au Cremhyg. D'une part, le calcul aube à aube est fait en bidimensionnel et d'autre part, le calcul est stationnaire alors que le comportement des poches est fortement instationnaire en réalité.

M. DOREY : répond que la modélisation de la fermeture de la poche, par introduction d'un sillage, tend à prendre en compte l'aspect fluctuant de l'arrière de la poche.

M. DESCLAUX : se demande si le bouclage entre le calcul aube à aube cavitant et calcul méridien est vraiment utile à prendre en compte ?

M. VINH : fait remarquer que l'équilibre radial peut être affecté par développement de la poche. Il demande à M. DOREY si des calculs de répartition de pression sans poche ont été faits.

M. DOREY : rappelle que le calcul sans poche conduit à une évaluation de la longueur de poche inférieure à celle obtenue par un calcul en cavitant.

M. ROWE : s'étonne des résultats présentés, en particulier du fait que la longueur mesurée soit supérieure à celle donnée par le calcul. Dans le cas d'un modèle à cavité fermée, il rappelle que le calcul donne une cavité trop longue en écoulement bidimensionnel.

Par ailleurs, M. ROWE insiste sur l'importance que peut avoir le choix du point de détachement et les conditions de détachement de la cavité en particulier sur le σ . Il demande à M. DOREY si l'influence de la position du point de détachement de la poche a été testée.

M. DOREY : répond que pour évaluer l'influence de ce paramètre la position du point de détachement a été un peu modifiée mais qu'elle n'a pas d'influence notable.

M. AMBLARD (Neyrpic) : A mon avis d'un point de vue pratique, les calculs de M. DOREY me paraissent plutôt satisfaisants, la différence entre la longueur de poche calculée et celle constatée expérimentalement étant de l'ordre de 30 %.

La réalisation des aubes de la roue d'un modèle réduit présente, dans le cadre des tolérances, des imperfections ; le profil réel peut être légèrement différent du profil théorique utilisé pour le calcul. Cela est d'autant plus à souligner que la roue du modèle de Venteuil-Tincourt est en bronze ; elle date d'une vingtaine d'années ; c'était le premier modèle de turbine-pompe construit pour EDF. Les imperfections sont plus grandes que celles qui peuvent exister avec les roues actuelles en résine. Les aubes ne sont pas intégralement identiques. Les angles d'entrée peuvent différer d'un demi-degré à un degré par exemple. Lorsqu'on fait des essais sur plate-forme, on peut s'apercevoir surtout avec les roues en bronze, qu'il y a des aubes sur lesquelles apparaît la cavitation alors qu'il n'y a pas de cavitation sur les aubes voisines. Enfin, il y a des arrondis effectués par meulage aux raccordements aube-moyeu et aube-ceinture qui ne sont pas absolument identiques.

Tout ceci peut expliquer en partie que le calcul ne coïncide pas exactement avec l'expérimentation et que la longueur de poche observée soit différente de celle calculée.

M. le Président : fait référence à d'anciens travaux dans lesquels il avait modélisé une poche de cavitation derrière un coin donc sans circulation et rappelle qu'il avait obtenu une longueur théorique trop courte d'un facteur 2,4 environ ; il avait fallu notablement compliquer la modélisation du sillage pour améliorer les résultats du calcul. Par ailleurs, il se demande si le coefficient de pression dans la poche est bien égal à $-\sigma_v$, ce qui pourrait expliquer en partie certains écarts.

M. DOREY : rappelle que pour des essais en canal, il a bien obtenu une pression égale à p_r dans la poche et que cet effet n'est probablement sensible que pour les petites poches.

M. ROWE : demande si la position du point de détachement a été calculée ?

M. DOREY : répond que non ; elle a été imposée par référence à l'expérimentation et légèrement variée.

M. DESCLAUX : confirme le point de vue de M. ROWE sur l'importance des conditions de détachement de la poche. Il estime qu'il s'agit d'un problème de premier ordre par rapport à la modélisation du sillage et au problème des pertes qui apparaissent comme secondaires.

M. DOREY : précise que des améliorations ont été récemment apportées par le Cremhyg par rapport au calcul présenté ici.