Modélisation numérique d'écoulements partiellement cavitants dans les turbomachines

par F.X. Catelan, T. Maître

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble

P. Morel

Société Européenne de Propulsion

I ■ INTRODUCTION

La nécessité de construire des turbomachines de plus en plus performantes et plus compactes donc moins onéreuses motive depuis plusieurs décennies les recherches dans ce domaine. Une des principales contraintes limitant l'augmentation des vitesses de rotation est le phénomène de cavitation qui se développe quand la pression est abaissée au niveau de la pression de vapeur saturante. La vaporisation du fluide apparaît principalement dans les zones où la géométrie présente de fortes courbures, comme au bord d'attaque des aubes où se développent parfois des poches de vapeur ainsi que dans les régions où le fluide est soumis à une vorticit importante.

La prsence de la cavitation au sein d'un systme gnre diffrents problmes dont le plus connu et certainement le plus gnant est le phnomne d'rosion des matriaux pour un fonctionnement cavitant prolong. Mais elle provoque galement des chutes de performances des machines tournantes lorsque le volume de vapeur devient important.

Si l'apparition de la cavitation dans une turbomachine n'est pas directement signe de chute de performance, le volume de vapeur doit toutefois rester limit. Cela demande donc une matrise et surtout une connaissance des diffrents rgimes de fonctionnement de la machine. La simulation numrique des rgimes cavitants et la prvision des conditions de perte de performances reprsentent une approche intressante qui permet d'agir en amont au niveau de la conception. Le code cavitant tridimensionnel, CALECHE-MOCA3D, a t dvelopp pour atteindre ces objectifs.

II ■ LE CODE CALECHE-MOCA3D

L'utilisation des modles tridimensionnels visqueux est limite dans le milieu industriel o ils sont, le plus souvent, employs uniquement dans la dernire phase de validation d'un prototype. La dfinition prcise de la gomtrie, la construction des maillages avec les raffinements adquats, les temps de calcul et les outils complexes ncessaires au post-traitement sont trop contraignants pour tre insrs dans une chane de dimensionnement des machines hydrauliques.

Si on considre une machine travaillant prs de son point de fonctionnement nominal, les effets visqueux, confins la proximit immdiate des parois, n'entranent pas de modifica-

NOTATIONS

Q :	débit (m ³ /s)
Qn :	débit nominal (m ³ /s)
ρ :	masse volumique (kg/m ³)
Vz :	vitesse débitante (m/s)
W :	vitesse relative (m/s)
W ^m :	vitesse relative calculée par le module CALECHE (m/s)
W' = W - W ^{3D} :	vitesse relative de perturbation (m/s)
Ψ' :	fonction de courant de perturbation
$\sigma = (P_{\text{amont}} - P_{\text{vapeur}}) / (\rho \omega^2 r^2)$:	nombre de cavitation
σ^* :	sigma correspondant à un abaissement de 3% de la hauteur manométrique
R :	rayon (m)
m :	abscisse curviligne
θ :	direction azimutale
r :	direction radiale
z :	direction axiale

tion majeure de l'coulement. La modlisation peut alors se faire sur la base d'une rsolution tridimensionnelle des quations d'EULER.

Le code dvelopp est donc bas sur une formulation EULER-3D (CALECHE, [1]), laquelle est couple une modlisation tridimensionnelle (MOCA3D [2] [3]) des poches de cavitation partielle issue des modles bidimensionnels [4]. La poche de cavitation tant traite comme une perturbation de l'coulement non cavitant, un couplage entre le module 3D et le module cavitant est indispensable. chaque itration, la poche de cavitation nouvellement calcule par MOCA3D agit comme un corps solide qui forme une sur-paisseur la pale et qui rduit l'espace destin au fluide dans le canal inter-aubes. Le calcul suivant, effectu par CALECHE, permet de ractualiser le champ de vitesses dans le nouveau domaine de calcul qui correspond l'espace inter-aubes rel diminu du volume de la poche. Cette

1. Organigramme général du code CALECHE-MOCA3D.

interaction qui est à l'origine du processus itératif (figure 1) donne à convergence une modélisation de l'écoulement correspondant aux conditions de fonctionnement imposées en début de calcul par l'utilisateur.

2.1 Modélisation de l'écoulement subcavitant (le code CALECHE-MOCA3D)

Ce code basé sur une formulation EULER-3D, a été développé par le laboratoire METRAFLU sous l'impulsion de l'Electricité de France [1]. Son originalité provient de l'utilisation d'une formulation de Clebsch des équations d'EULER, qui décompose le vecteur vitesse absolue en une partie potentielle et une partie rotationnelle. L'utilisation de certaines hypothèses simplificatrices permet notamment de se restreindre à la formulation de Clebsch-Hawthorne qui diminue le nombre de variables du problème.

2.2 Le modèle numérique de cavitation

Le modèle utilisé, adapté à la représentation de la cavitation partielle, est issu du développement de codes bidimensionnels et quasi-tridimensionnels [4]. Il repose sur une formulation simplifiée (modèle à interface) dont les idées principales sont :

- La vapeur est séparée du liquide par une surface imperméable stationnaire.
- Sur les trois-quarts avant de la poche de cavitation, la pression est égale à la pression de vapeur saturante.
- Sur le quart arrière, le collapse des structures de vapeur est simulé par un modèle de sillage.

2.2.1 Formulation du problème

Dans notre modélisation, la construction de la surface délimitant la poche de cavitation est le résultat d'une succession de calculs bidimensionnels sur chacune des surfaces axisymétriques constituant le maillage complet de la machine. Cela ne constitue qu'une procédure de calcul étant donné que la modélisation prend en compte, de façon rigoureuse, les effets tridimensionnels par l'intermédiaire des conditions aux limites.

Au cours de l'étape cavitante, la divergence et le rotationnel du champ en projection sur la surface de calcul seront figés. Cette hypothèse se justifie par un rapport faible entre le volume de vapeur et le volume global du canal inter-aubes, exprimant le fait que la cavité ne perturbe que très localement l'écoulement de la machine. Ces hypothèses de conservation, qui ne sont pas restrictives du fait de la procédure itérative de la résolution, se traduisent par les équations suivantes :

$$\text{rot}(\vec{W}) = \text{rot}(\vec{W}^{3D}) \quad (1)$$

$$\text{div}(\vec{W}) = \text{div}(\vec{W}^{3D}) \quad (2)$$

Dans le but d'alléger la formulation et d'accélérer la convergence des calculs, nous avons raisonné en terme de perturbation. Cette dernière correspond aux modifications causées par la présence de la cavité ; d'où l'introduction d'une vitesse relative $\vec{W}'$ dite de perturbation définie comme la différence entre les vitesses relatives cavitantes et subcavitantes à une itération donnée. Par conséquent, on peut introduire une fonction de courant de perturbation Ψ' qui doit être solution de l'équation de Laplace :

$$\Delta \Psi' = 0 \quad (3)$$

La fonction de courant de perturbation solution de cette équation est obtenue par une méthode des éléments finis afin de rester cohérent avec le module CALECHE.

2.2.2 Les conditions aux limites du calcul cavitant

L'utilisation d'une formulation en perturbation simplifie considérablement les conditions aux limites du calcul cavitant. La frontière du domaine de calcul est découpée en trois zones :

1. La condition de cavité qui est une condition de Neumann s'exprime sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \Psi'}{\partial n} = \vec{W}'(M) \cdot \vec{e} = \vec{W}(M) \cdot \vec{e} - \vec{W}^{3D}(M) \cdot \vec{e} \quad (4)$$

Cela permet d'exprimer le fait que la vitesse de perturbation est purement tangentielle à l'interface liquide-vapeur. En utilisant les résultats du calcul Euler tridimensionnel, notamment la vitesse relative et la rothalpie, on peut exprimer cette condition en fonction de la vitesse tangentielle au point de détachement $W(D)$:

$$\frac{\partial \Psi'}{\partial n} = C \vec{W}(D) \cdot \vec{e} - \vec{W}^{3D}(M) \cdot \vec{e} \quad (5)$$

2. La condition de sillage : il est imposé un raccord quadratique à la fonction de courant de perturbation sur une zone de longueur arbitraire. Nous utiliserons une longueur de sillage qui représente le tiers de la zone à pression constante ; cette proportion est en bon accord avec les résultats expérimentaux.
3. La zone extérieure à la poche de cavitation. Dans cette région il n'existe pas de phénomène perturbant l'écoulement non cavitant, ce qui se traduit par l'annulation de la fonction de courant de perturbation dans cette zone.

2.2.3 Recherche de la longueur de cavité

La difficulté de ce type de modélisation est qu'a priori les points d'application des conditions aux limites ne sont pas

connus. Pour débiter le calcul il faut se donner une "géométrie de départ", sachant que le point de détachement "D" est fortement lié à l'écoulement au niveau du bord d'attaque de l'aubage et à l'état de la couche limite dans cette région, et que la longueur de la cavité est fonction des répartitions de pression sur l'aube. Pour développer un code prédictif, nous avons mis en place une méthode d'estimation de la longueur de la cavité correspondant au niveau de pression en amont de la machine, qui repose sur un balayage de la loi "L(σ)" par dichotomie.

2.2.4 Déformation du maillage

La recherche de la position de l'interface séparant l'écoulement extérieur de l'intérieur de la cavité est assurée par la conservation du débit initial sur chaque ligne iso-M du maillage.

2.3 Modélisation du régime critique d'une turbomachine

La chute de performance d'une machine hydraulique est caractérisée par son sigma critique (noté σ^*). Cet état correspond à une cavitation très développée qui s'étend au-delà du col et qui modifie le triangle des vitesses en sortie de roue provoquant une chute des performances de la machine. Pour les constructeurs, le régime critique correspond, le plus souvent, à un abaissement de 3 % de la hauteur manométrique. Du point de vue numérique, le plus simple consiste à considérer que le sigma critique correspond à une poche de cavitation qui atteint le recouvrement. Cela représentera donc notre critère numérique pour déceler un régime critique.

Lorsque l'on approche du blocage, la cavitation modifie sensiblement l'écoulement général, ce qui perturbe fortement le couplage "3D-cavitant". Par conséquent, pour modéliser ce fonctionnement extrême, nous réalisons une "descente en sigma" qui s'apparente à une procédure expérimentale. Le calcul est alors réalisé en plusieurs étapes avec un sigma évoluant du fonctionnement non cavitant au régime critique.

III ■ PROBLÈME SPÉCIFIQUE AU DÉTACHEMENT

Les simulations numériques d'écoulements cavitants, notamment avec un modèle à interface, nécessitent le positionnement du point de détachement de la cavité dont dépendent fortement les résultats des modélisations. Lorsque la géométrie considérée présente une arête vive au niveau du bord d'attaque, nous savons que la cavitation prendra naissance sur cette discontinuité ; mais pour les aubages dont l'extrémité est arrondie, la position exacte du détachement des poches de vapeur est numériquement plus délicate à obtenir. Le nombre de publications liées à ce sujet est probablement une preuve de cette difficulté ([5], [6]).

2. Schéma du dispositif expérimental.

De plus, ce positionnement est fortement lié à la discrétisation utilisée pour le bord d'attaque de l'aubage ; pour les géométries tridimensionnelles, le raffinement du maillage coûte cher en temps de calcul et en place mémoire. Par conséquent, notre objectif est d'étudier la sensibilité des calculs cavitants à la définition géométrique du bord d'attaque des profils, dans le but de supprimer le problème du positionnement du point de détachement (tout en réalisant une discrétisation économique). Pour cela nous utiliserons la démarche suivante :

1. Adaptation du code CALECHE-MOCA3D pour le calcul de configurations bidimensionnelles (hydrofoils).
2. Utilisation de résultats expérimentaux obtenus sur deux hydrofoils différant par leur bord d'attaque.
3. Comparaisons avec les résultats d'un code bidimensionnel déjà validé auparavant.

3.1 Les essais dans la veine à grande vitesse

Le projet expérimental [7] est réalisé sur deux géométries de type hydrofoil placées dans une veine disponible au laboratoire (La Veine à Grande Vitesse : V.G.V.). Pour valider le code sur une géométrie bidimensionnelle, il est nécessaire d'utiliser une géométrie qui ne présente aucune ambiguïté sur la position du détachement des cavités. La seconde géométrie constitue un support expérimental nécessaire pour progresser sur le problème de la discrétisation des profils à bord d'attaque pointu : cet hydrofoil est assez effilé et son extrémité amont est décrite par un arrondi "d'usinage" de $4/10^{\text{ème}}$ de millimètre.

Les formes des poches de cavitation sont obtenues par traitement informatique des images vidéo enregistrées lors des essais avec une caméra CCD. Les niveaux de pressions sont estimés soit par les prises pariétales soit par des sondes à quatre trous. Enfin, les vitesses près du bord d'attaque sont mesurées par vélocimétrie laser.

3.2 Comparaisons calculs - expériences

Le calcul de l'écoulement cavitant autour des profils, par le code CALECHE-MOCA3D, est réalisé à l'aide d'un maillage construit avec une seule maille en largeur et 3036 éléments trilineaires soit 31 275 nœuds. Le raffinement est important dans les zones sensibles comme le bord d'attaque du profil, le bord de fuite, mais également près de l'extrados et de l'intrados du profil.

Les comparaisons sont donc réalisées avec les résultats expérimentaux mais également avec un code bidimensionnel qui peut prendre en compte les effets visqueux par une méthode d'obstruction, ce qui permettra d'expliquer plus précisément les éventuels décalages.

3.2.1 Modélisation de l'écoulement cavitant autour du profil biseauté (validation de la version veine)

Les tendances observées expérimentalement (décroissance de l'épaisseur relative des poches avec leur allongement par exemple) sont reproduites par les calculs. Les formes de poches prédites par les deux codes sont similaires (figure 3) mais souvent plus volumineuses que celles obtenues expérimentalement. La différence provient principalement de la non prise en compte des effets visqueux puisque l'utilisation du code bidimensionnel avec le modèle de pertes améliore les résultats. Cette sim-

3. Comparaison des formes de poches.

plification du modèle est également à l'origine des fortes surpressions visibles sur les répartitions de coefficients de pression à l'aval du palier de pression (effet classique du sillage fermé). L'exploitation des courbes exprimant le sigma en fonction de la longueur de la cavité (figure 4) fait apparaître ce décalage entre les résultats numériques et les mesures. Toutefois, lorsque l'on considère les pertes dans la veine à l'aide du modèle bidimensionnel on s'aperçoit que la correspondance calcul-expérience en est nettement améliorée. Cette dernière constatation, nous assure que les calculs cavitants effectués avec le code CALECHE-MOCA3D sont représentatifs de l'écoulement réel.

3.2.2 Discretisation du bord d'attaque des aubages fins

Si les variations de débit d'une machine hydraulique affectent les figures de cavitation qui se développent sur ses aubages, la définition géométrique des aubages, et notamment de leur extrémité, est un facteur déterminant. Stripling [8] dans un article consacré à la cavitation, fait état d'un effet bénéfique, sur les performances en cavitation, de l'affinage du bord d'attaque des aubages, notamment avec une forme arrondie côté extrados. On retrouve les mêmes tendances dans des articles de Horie et Oshima [9] et Moore et Meng [10]. Par conséquent, les résultats expérimentaux montrent clairement l'importance d'une bonne description géométrique du bord d'attaque des aubages pour la modélisation des écoulements cavitants ; un maillage non adapté dans cette région (ne décrivant pas fidèlement la géométrie) peut fortement perturber le calcul des cavités attachées aux aubages.

5. Les différentes géométries.

4. Comparaison des lois " $\sigma(Lcav)$ ".

L'objectif est de simplifier la discrétisation au niveau du bord d'attaque sans perturber les résultats des modélisations. Pour cela nous avons testé trois discrétisations différentes (figure 5) en plus de celle qui considère l'arrondi d'usinage.

- Pour la géométrie arrondie, le maillage comporte 3036 éléments dont une vingtaine répartie sur l'arrondi ; la taille moyenne d'une maille est donc de l'ordre du dixième de millimètre. Le positionnement du point de détachement est effectué au moyen du critère du départ tangent (la poche se détache tangentiellement au profil). Remarquons que ce critère est en accord avec une modélisation par interface ; cette dernière ne peut en aucun cas être fidèle à la géométrie réelle de la cavité qui est soumise à la tension superficielle.

- Le bord d'attaque triangulaire remplace l'arrondi par un triangle isocèle dont le sommet est placé au centre de l'arrondi. Chaque côté est défini à l'aide de deux mailles, ce qui réduit le nombre d'éléments dans le sens amont-aval de 18. Le raccordement des faces du triangle avec le profil provoque une arête vive qui sera le point de détachement des poches à l'extrados.

- Le bord d'attaque affiné correspond à une pointe "numérique" (bord d'attaque restreint à un seul nœud qui appartient aussi bien à la première facette placée à l'extrados qu'au premier élément de l'intrados). Pour cela, le profil est affûté sur 10 mm soit 1 % de la corde.

Les premiers calculs révèlent un comportement irréaliste pour le bord d'attaque triangulaire. Ce dernier présente des angles trop importants qui imposent un contournement exagéré néfaste au couplage CALECHE-MOCA3D. Pour les poches courtes, on

6. Lois " $\sigma(Lcav)$ " sur les différents bords d'attaques.

7. Profil de vitesses débitantes.

observe une légère divergence entre les deux autres géométries (affinée et arrondie) qui n'excède pas 5 % sur le nombre de cavitation (figure 6). Pour une valeur du sigma donnée, la poche attachée au profil fin a tendance à être plus courte que celle observée sur l'arrondi, ce qui peut s'expliquer par un contournement moins fort du fluide et par conséquent des dépressions moins accentuées en non cavitant.

"L'affûtage" du profil pour créer une pointe numérique n'affecte quasiment pas les résultats. L'utilisation des géométries de substitution, qui permettent de réduire sensiblement le raffinement du maillage au niveau du bord d'attaque et d'éliminer le problème du positionnement du point de détachement, est par conséquent envisageable pour les aubages fins. Dans ce cas, le nombre d'éléments du maillage a été réduit de 30 %, permettant d'économiser un temps de calcul du même ordre, ce qui est non négligeable pour les applications tridimensionnelles.

IV ■ CALCUL D'UNE GÉOMÉTRIE TRIDIMENSIONNELLE

Jusqu'à présent le code CALECHE-MOCA3D avait été utilisé pour prévoir, avec succès, les régimes cavitants de turbomachines présentant des aubages biseautés. Par exemple, pour la dernière machine calculée [11], le code CALECHE-MOCA3D prévoit, en régime subcavitant, une recirculation au niveau du bord d'attaque en tête de pale qui est en accord avec les résultats de calculs Navier-Stokes, mais également avec les mesures par vélocimétrie laser. Toutefois, le modèle étant de type fluide par-

8. Comparaison des sigmas critiques calculés et mesurés.

fait, la recirculation est moins importante que dans la réalité. En effet, expérimentalement on mesure une réduction de 40 % de la section de passage débitante (augmentation de 40 % également de la vitesse débitante dans la zone non recirculante) alors que dans notre calcul cette obstruction est de l'ordre de 25 % (figure 7). En régime cavitant, la prévision des sigmas de blocage à différents débits (figure 8) est d'autant meilleure que les effets visqueux sont faibles ; en sur-débit les résultats numériques et expérimentaux sont très proches car l'écoulement présente moins de recirculations qu'en sous-débit.

À présent, notre objectif est de calculer les régimes cavitants d'une machine axiale, type pompe de gavage, qui présente des aubages fins mais avec un arrondi de $2/10^{\text{ème}}$ de millimètre à leur extrémité. Le maillage d'un canal inter-aubes de cette machine est réalisé avec une grille $12 \times 22 \times 80$, soit 24 219 nœuds, en remplaçant l'arrondi d'usinage par une pointe (§ 3.2.2).

4.1 Le régime non cavitant

À l'issu du calcul en régime non cavitant, on relève (figure 9) un fort gradient de pression statique entre l'extrados et l'intrados de l'aubage, notamment au niveau du carter. Notons également un fort décalage entre les niveaux de pression en pied et en tête de pale, avec des aubages beaucoup plus chargés en périphérie. Les importantes dépressions en tête d'aubage sont le signe d'une apparition précoce de la cavitation.

9. Répartitions de pression sur l'aubage.

10. Vitesse débitante à l'entrée du canal inter-aubes.

11. Vue axiale de la poche modélisée par le code CALECHE-MOCA3D.

12. Forme de la poche modélisée par le code CALECHE-MOCA3D à $\sigma/\sigma^*=1,8$.

Expérimentalement, cet écart de pression se traduit par la présence au carter d'un vortex cavitant à tous les régimes de fonctionnement. Toutefois, le fort gradient de pression entre l'extrados et l'intrados, qui favorise l'écoulement d'entrefer, doit jouer un rôle important dans l'écoulement au niveau de la ceinture ; et le fait de le négliger conduit probablement à une surestimation des gradients de pression moyeu - carter dans notre calcul.

Pour connaître l'influence de la recirculation sur les modélisations cavitantes, nous avons utilisé une fonctionnalité du code CALECHE qui permet de prendre en compte des pertes de pression totale relative. Par une distribution de pertes adaptée, on pourra accroître l'intensité de la recirculation amont et se rapprocher de l'écoulement réel. Dans ce cas, le calcul montre clairement que l'écoulement contourne cette zone de basse pression, ce qui se traduit par des survitesses en dessous de la zone affectée par les pertes, et une réduction de la vitesse dans la région où la pression totale relative est minimale (près du carter, figure 10). Avec cette distribution de pertes, nous avons donc augmenté l'intensité de la recirculation amont et modifié l'incidence du fluide à l'entrée du canal : réduction de l'incidence dans la zone où la vitesse est augmentée et augmentation de l'incidence près du carter. Par conséquent, l'utilisation de cette distribution contribue à une augmentation du gradient de pression moyeu-carter.

4.2 Le régime cavitant

L'objectif de ce calcul est de prédire les conditions de fonctionnement (notamment la pression en entrée) qui entraînent une chute de 3 % des performances de la pompe. Le critère utilisé est celui détaillé au §2.3 : modélisation d'une poche de cavitation atteignant le recouvrement au moins en un point de l'aubage.

Les résultats d'une étape de "prospection" réalisée sans couplage CALECHE-MOCA3D confirment les principales constatations effectuées à l'issue du calcul non cavitant, à savoir l'apparition de la cavitation en périphérie pour des sigmas assez importants. D'autre part, on relève un comportement "explosif" de la poche de vapeur qui est traduit par des lois $\sigma(L)$, à différents rayons, assez plates. Par conséquent, une petite variation

de la pression amont se traduit par une forte variation de la longueur de poche. Ce caractère instable donne une importance particulière au couplage et à la procédure de descente en sigma. La figure 11 met en évidence l'intérêt de bien prendre en compte les effets tridimensionnels par le biais du couplage, sans quoi nous obtiendrions une surestimation de la longueur de la poche et du volume de vapeur.

Après une dizaine de couplages, soit environ une heure Cray, le code CALECHE-MOCA3D prévoit une poche qui atteint le recouvrement sur la partie supérieure de l'aubage, pour une pression d'aspiration supérieure à celle qui est obtenue expérimentalement ($\sigma/\sigma^*=1,8$). Il ne prévoit aucune cavitation près du moyeu (quart inférieur de l'aubage), puis une poche de longueur très faible jusqu'à la mi-hauteur ; ensuite la longueur progresse régulièrement jusqu'au trois-quarts de la pale, et elle part brusquement au recouvrement sur le haut de la machine. On est donc en présence d'une poche "triangulaire" (figure 12) dont le contour est similaire aux visualisations réalisées lors des essais. Cette poche tridimensionnelle a un volume de 0,68 % du volume inter-aubes, ce qui reste assez faible mais proche du volume estimé par traitement d'images qui est de 0,6 %.

Notons que sur ce type de machine, où les effets tridimensionnels sont assez importants, seule l'utilisation d'un code tridimensionnel peut permettre de modéliser une poche évoluant aussi fortement du moyeu au carter. On peut notamment souligner que des calculs faits sur cette géométrie par un code quasi-tridimensionnel [4] ont abouti à une poche homogène du moyeu au carter qui n'est pas réaliste.

Malgré une bonne prévision de la forme de la cavité et du volume de vapeur, le code ne prévoit pas correctement le régime critique de la machine ; la poche atteignant le recouvrement est obtenue pour une pression d'aspiration supérieure à la pression mesurée expérimentalement. Cet écart peut provenir principalement de deux raisons :

- Le critère de chute de performance n'est pas adapté à la machine que nous venons de calculer. En effet, la poche étant principalement développée en périphérie, elle s'allonge peut-être dans le canal inter-aubes sans provoquer une chute des performances.

- La deuxième raison serait une surestimation du gradient de pression moyeu-carter due à la non prise en compte de l'écoulement d'entrefer ou des pertes sur les aubages. Dans ce cas, une distribution de pertes évoluant dans la direction azimutale peut permettre de modifier l'incidence du fluide à l'entrée du canal et donc les dépressions.

V ■ CONCLUSION

Le calcul cavitant effectué avec le code CALECHE-MOCA3D sur cette nouvelle géométrie prévoit un développement non uniforme de la cavitation entre le moyeu et le carter, ce qui est en accord avec les visualisations. La forme de la poche est par conséquent fortement tridimensionnelle. La prévision du régime critique (abaissement de 3 % de la hauteur manométrique) est pénalisée par l'utilisation d'un critère purement géométrique (longueur de cavité égale à la distance au col). Par conséquent, le développement d'un critère plus physique est envisagé, qui pourra porter soit sur la modification du triangle de vitesses en sortie du canal inter-aubes soit sur le couple.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société Européenne de Propulsion et le Centre National d'Etudes Spatiales pour le financement de ces travaux, ainsi que toutes les personnes qui ont participé à cette étude. Les calculs ont été réalisés sur le Cray de l'Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EL GHAZZANI E.M. (1990). — Calcul de l'écoulement dans une turbomachine à l'aide des variables de Clebsch et par une méthode d'éléments finis, Thèse de docteur, Ecole Centrale de Lyon 1990.
- [2] CATELAIN F.X. (1996). — Modélisation tridimensionnelle de la cavitation partielle dans les turbomachines. Thèse de docteur, Institut National Polytechnique de Grenoble 1996.
- [3] MAÎTRE T., KUENY J.L., GEAU P., VON KAENEL A. (1993). — Numerical predictions of three-dimensional partial cavitation in a rocket turbopump inducer. Pumping Machinery Symposium, ASME, Washington.
- [4] SCHOLZ J.L. (1988). — Modélisation de la cavitation partielle dans les pompes. Thèse de docteur, Institut National Polytechnique de Grenoble 1988.
- [5] YAMAGUCHI H., KATO H. (1983). — On application of nonlinear cavity flow theory to thick foil sections. Congrès IMECH, 2nd Intern. Conf. on Cavit. Edinburgh, pp.164-174.
- [6] LEMONNIER H., ROWE A. (1988). — Another approach in modelling cavitating flows. Jour. of Fluids Mech., vol. 195, pp. 557-580.
- [7] REBOUD J.L., REBATTET C., MOREL P. (1996). — Effect of the leading edge design on sheet cavitation around a blade section. XVIII IAHR symposium: Hydraulic machinery and cavitation, Valencia, Sept. 1996.
- [8] STRIPPLENG L.B., ACOSTA A.J. (1962). — Cavitation in turbo pumps (part 1 et 2). Journal of Basic Engineering, septembre 1962.
- [9] HORIE C., OSHIMA M. (1964). — Experimental study on cavitation in mixed flow pump impellers. Bulletin of JSME, vol. 7, n°25, pp. 62-71.
- [10] MOORE D., MENG P.R. (1970). — Effect of blade leading edge thickness on cavitation performance of 80.6° helical inducer in hydrogen. NASA TN D-5855, june 1970.
- [11] VON KAENEL A., MAÎTRE T., REBATTET C., KUENY J.L., MOREL P. (1995). — Three-dimensional partial cavitating flow in a rocket turbopump inducer : numerical predictions compared with laser velocimetry measurements. International Symposium of Cavitation, CAV '95, Deauville, France.