



HAL
open science

Étude numérique de la cavitation avec effet thermodynamique

Julien Rolland, Eric Goncalves da Silva, Regiane Fortes Patella

► **To cite this version:**

Julien Rolland, Eric Goncalves da Silva, Regiane Fortes Patella. Étude numérique de la cavitation avec effet thermodynamique. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-00266091

HAL Id: hal-00266091

<https://hal.science/hal-00266091v1>

Submitted on 25 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Etude numérique de la cavitation avec effet thermodynamique

Julien Rolland, Eric Goncalvès & Regiane Fortes Patella

CNES
LEGI-INPG
BP 53 38041 Grenoble Cedex 9
julien.rolland@hmg.inpg.fr

Résumé :

Dans le but de mieux comprendre et de maîtriser les phénomènes de cavitation pour des fluides thermosensibles, des développements numériques sont menés par l'équipe Turbocav du LEGI dans le code FineTM/Turbo pour prendre en compte les effets thermodynamiques dus au changement de phase. Ces travaux sont basés sur l'évolution d'un modèle précédemment développé par le LEGI suivant une approche barotrope, Delannoy et al., (1990), Coutier et al. (2005), Pouffary et al. (2005). L'énergie nécessaire à la vaporisation est prélevée au sein même du fluide provoquant un refroidissement local qui ralentit les phénomènes de cavitation. Afin de valider et de comparer les résultats numériques à des données expérimentales, les calculs ont été effectués avec un fluide thermosensible de référence, le R114 en géométrie Venturi 2D. Les résultats globaux mais aussi locaux sont analysés. Le taux de vide local dans la poche, la température et la pression en paroi montrent une bonne représentation par le modèle utilisé de la physique du changement de phase pour un fluide thermosensible, Fruman et al., (1999).

Abstract :

Correlated experimental and numerical studies were carried out to analyse cavitating flows in Venturi geometries. By applying a computational method previously developed in Laboratory LEGI based on the code FineTM/Turbo and on a barotropic approach Delannoy et al. (1990), Coutier et al. (2005), Pouffary et al. (2005), the physical and numerical models were improved to take into account thermodynamic effects. As a matter of fact, because of the latent heat of vaporization, heat transfer may strongly affect the cavitation behaviour of refrigerants and cryogenic fluids. Vapour production through cavitation extracts heat from surrounding liquid and produces a local cooling effect, which delays the cavitation phenomenon. A first application of the model is carried out for a Venturi geometry in the case of R114 flows. Global et and local numerical results were analyzed. Local void ratio, cooling, and wall pressure are in good agreement with experimental data, Fruman et al., (1999).

Mots-clefs : cavitation ; RANS ; thermodynamique

Nomenclature :

| | | |
|--|---|---|
| A_{\min} | paramètre de la loi barotrope $A_{\min}^2 = \frac{\rho_L - \rho_V}{2} c_{\min}^2$ | ($\text{kg}^{1/2} \cdot \text{m}^{-1/2} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| c_{\min} | célérité du son minimale dans le mélange | ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
| L | longueur de la poche | (m) |
| p_V | pression de vapeur saturante | (Pa) |
| T | température | (K) |
| α | taux de vide $\alpha = \frac{\rho_L - \rho}{\rho_L - \rho_V}$ | (-) |
| ρ_L | masse volumique du liquide | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
| ρ_V | masse volumique de la vapeur | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
| ρ | masse volumique du mélange $\rho = \alpha \rho_V + (1 - \alpha) \rho_L$ | ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
| $\sigma_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}} - p_V(T_{\text{ref}})}{\frac{1}{2} \rho_L u_{\text{ref}}^2}$ | nombre de cavitation de référence | |

1 Introduction

Cette étude se situe dans la continuité des travaux réalisés par l'équipe Turbomachines et Cavitation du LEGI (Grenoble) qui consistent à mieux comprendre les phénomènes de cavitation Rebound *et al.* (1998), Pouffary *et al.* (2005). Elle est menée en collaboration avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), la division moteurs spatiaux de SNECMA et Numeca^{int}. L'objectif à terme est d'analyser les écoulements cavitants instationnaires dans les inducteurs de turbopompes des fusées, opérant avec des fluides cryogéniques (LH2 et LOx).

Nous présenterons dans ce papier les résultats numériques obtenus avec un nouveau modèle cavitant qui prend en compte les effets thermodynamiques et qui a été développé et implémenté par notre équipe dans le code FineTM/Turbo. En vue d'une première validation de ce modèle, des calculs sont comparés aux résultats expérimentaux de Fruman *et al.* (1999), pour une géométrie de Venturi, 2D, avec le fluide thermosensible R114 (C₂Cl₂F₄).

La cavitation est un phénomène endothermique. La transformation du liquide en vapeur consomme de l'énergie, cette énergie étant prélevée principalement au liquide, Rolland *et al.* (2006), créant un refroidissement local dans la poche constituée d'un mélange liquide/vapeur. Dans le cas de la cavitation en eau froide, ce refroidissement est faible et influence peu les grandeurs thermodynamiques du fluide (Fig 1 : $P_v \sim \text{constant}$ pendant le processus). Par contre pour un fluide thermosensible, ce refroidissement est plus important et les grandeurs thermodynamiques du fluide varient de manière plus significative aux variations de température, en particulier la pression de vapeur saturante (Fig 1). Pour une température locale plus faible, la pression de vapeur saturante diminue, et les phénomènes de cavitation sont atténués, ce qu'on appelle le retard thermodynamique à la cavitation.

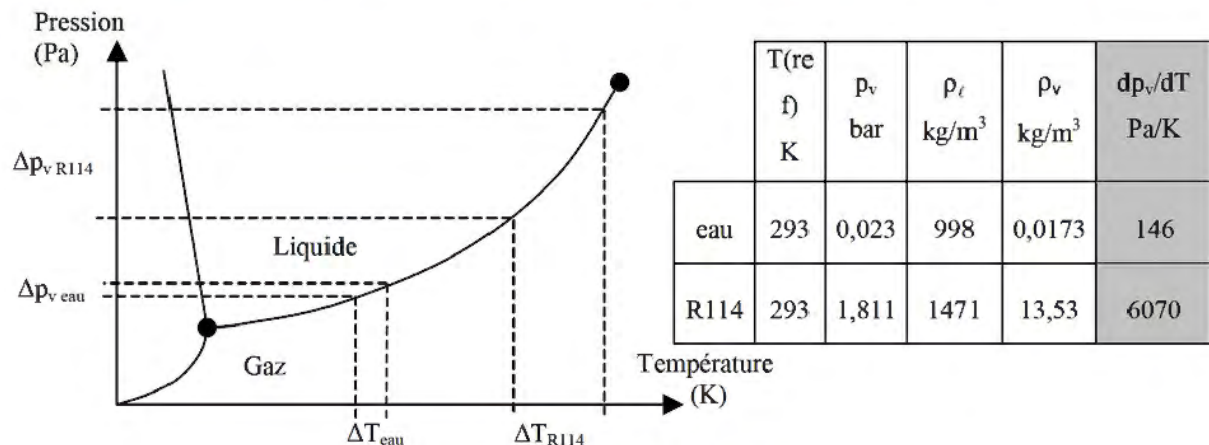


FIG. 1 – Diagramme de phase et caractéristiques thermodynamiques ;
variation des grandeurs à saturation pour deux fluides

Ces phénomènes de retard thermodynamique à la cavitation ont initialement été calculés par des méthodes analytiques basées sur le facteur B, Stahl H.A, *et al.* (1956) puis caractérisés expérimentalement par Hord J. (1973). Plus récemment des calculs en géométrie de turbomachines, Hosangadi A., *et al.* (2006) ont permis de décrire la chute de performance d'un inducteur en LH2. On pourra trouver une synthèse des travaux menés sur les effets thermodynamiques dans Utturkar Y., *et al.* (2005). Malgré les efforts réalisés dans ce domaine, la simulation des écoulements cavitants en fluides thermosensibles présente encore des challenges scientifiques importants. Les modèles physiques proposés nécessitent d'être implémentés dans des outils fiables de calcul, d'être testés sur différentes configurations, calibrés et validés par des comparaisons avec des essais. Les travaux présentés s'insèrent dans cette logique d'étude.

2 Présentation du code

Les développements numériques sont réalisés dans le code commercial FineTM/Turbo (Numeca Int.) qui résout le système des équations RANS pour un écoulement turbulent compressible d'un mélange homogène. Un préconditionnement à bas nombre de Mach, développé par Hakimi (1998), est nécessaire pour traiter les zones incompressibles. Une description plus complète du schéma numérique est détaillée dans Coutier *et al.* (2005).

Le système est fermé par une loi barotrope initialement proposée par Delannoy *et al.* (1990), qui modélise les changements de phase (vaporisation et condensation) lors du processus de cavitation. La loi d'état lie explicitement la masse volumique du mélange à la pression par la vitesse du son minimale dans le milieu (corrélée dans le modèle au paramètre Amin). La pente de la loi est un paramètre dont l'influence a été testée, Rolland *et al.* (2006). Le contrôle de cette pente se fait par le paramètre Amin (Fig 2). Au plus ce paramètre est faible, au plus la pente est raide ce qui fait tendre le modèle vers un modèle à l'équilibre.

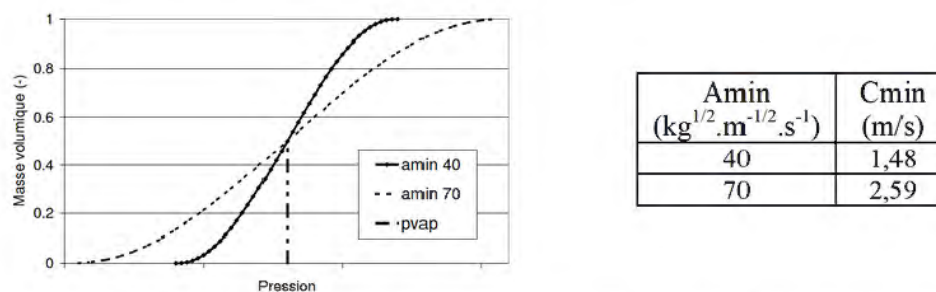


FIG. 2 – Influence d'Amin sur la loi barotrope $\rho_v = 12,4\text{kg/m}^3$ et $\rho_l = 1470\text{ kg/m}^3$

Dans le but de prendre en compte les effets thermodynamiques, ce modèle initial a été modifié au sein du laboratoire LEGI par Rolland *et al.* (2006).

3 Résultats

Les calculs présentés sont stationnaires et concernent la géométrie de type Venturi illustrée Fig 3. Le modèle k- ϵ de Yang-Shih avec lois de paroi est utilisé pour représenter la turbulence. Le maillage contient 201x85 nœuds (Fig 3). Le nombre de Reynolds est de l'ordre de $2 \cdot 10^7$. La section de référence est située en amont du col.

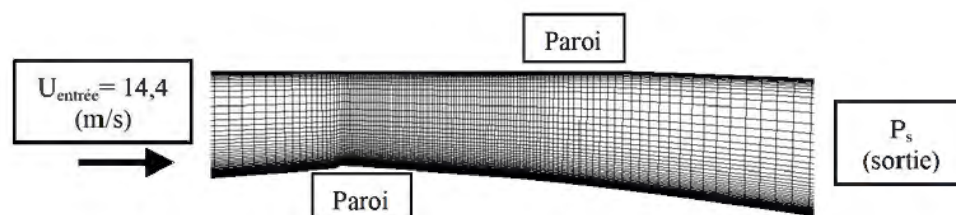


FIG. 3 – Maillage du Venturi 2D

Afin de valider le modèle thermodynamique implémenté et de tester l'influence du paramètre Amin, trois calculs ont été comparés : un calcul de référence avec une valeur d'Amin de 70(A) sans prise en compte des effets thermodynamiques et deux calculs prenant en compte ces effets pour des valeurs d'Amin de 70 (B) et 40 (C).

3.1 Analyse globale

Pour les trois calculs présentés ici, le nombre de cavitation en entrée a été fixé et la forme de la poche est analysée. Premièrement l'influence de la modélisation des effets thermodynamiques, ainsi que du paramètre A_{min} , sur la longueur de la poche pour des conditions de vitesse et de pression en entrée identiques ($\sigma_{ref} = 0,63$) est représentée Fig 4.

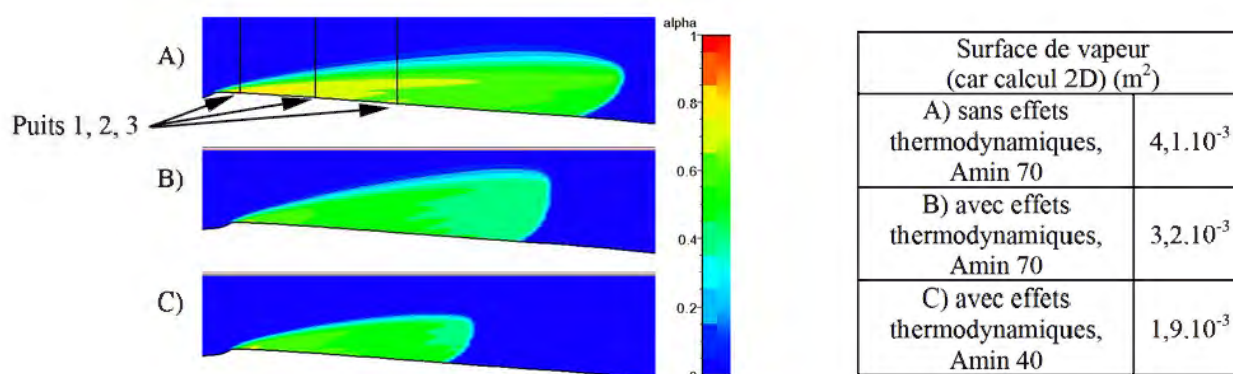


FIG. 4 – Taux de vide pour trois calculs, $\sigma_{ref} = 0,63$

Avec la prise en compte des effets thermodynamiques, on observe une diminution de la quantité de vapeur. La longueur de la poche diminue, et le taux de vide à l'intérieur est plus faible. On observe également une légère augmentation de l'épaisseur de la cavité.

D'après les calculs réalisés avec prise en compte des effets thermodynamiques, la réduction d' A_{min} diminue la longueur et l'épaisseur de la poche.

Cette atténuation des phénomènes de cavitation pour un fluide thermosensible est en bon accord qualitatif avec les précédents travaux, Utturkar Y., *et al.* (2005).

3.2 Analyse locale

Afin de réaliser des comparaisons quantitatives locales entre les calculs et les résultats d'essais disponibles, les trois modélisations considérées (à savoir sans effet thermo Amin 70, avec effet thermo Amin70 et avec effet thermo Amin 40) ont été appliquées en vue d'analyser une poche de 80 mm environ. La valeur de σ_{ref} est alors différente selon le cas considéré. Des comparaisons locales du taux de vide (Fig 5), de la température à la paroi au puits 1 et de la pression statique au plancher (Fig 6) ont pu être réalisées.

Nous disposons de mesures de taux de vide par bi-sonde optique, Fruman *et al.* (1999), pour les trois puits représentés sur la Fig 4A. Le taux de vide est tracé Fig 5 en fonction de la distance à la paroi (y) pour les puits 1, 2 et 3.

Globalement, les calculs numériques surestiment le taux de vide dans la poche par rapport aux données d'essais (symboles losanges). Sans prise en compte des effets thermodynamiques, le taux de vide est plus élevé dans la poche. En prenant en compte les effets thermodynamiques, la pression de vaporisation étant plus faible, le taux de vide diminue. Mais ce modèle a tendance à augmenter l'épaisseur de la poche, notamment avec une valeur d' A_{min} de 70.

Pour une valeur d' A_{min} plus faible, la pente de la loi barotrope est plus raide. Cela entraîne une augmentation du gradient de masse volumique. Le taux de vide à l'intérieur de la poche est alors plus élevé. L'épaisseur de la poche, surestimée par le calcul B) (A_{min} 70), est plus proche des résultats d'essais.

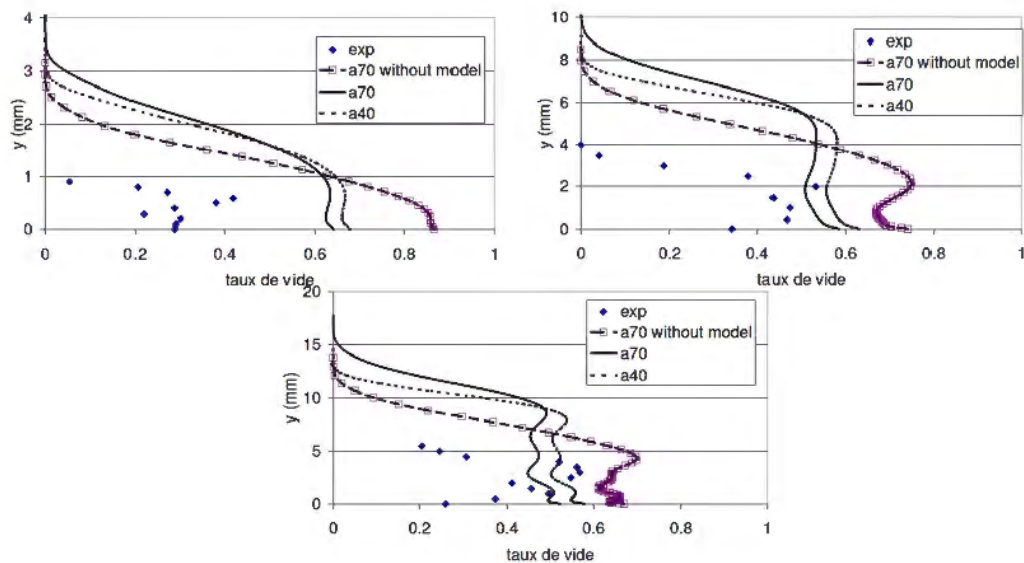


FIG. 5 – Taux de vide aux puits 1, 2 et 3 en fonction de la distance à la paroi : Comparaisons calculs/essais pour des poches de même longueur ; $L \cong 80$ mm

Le refroidissement au puits 1 est correctement prédit, Fig 6. On remarque que le calcul sans modèle thermodynamique surestime fortement la température, dû à un taux de vide trop important dans la poche. La valeur expérimentale seulement disponible à la paroi donne un refroidissement de 2,1K.

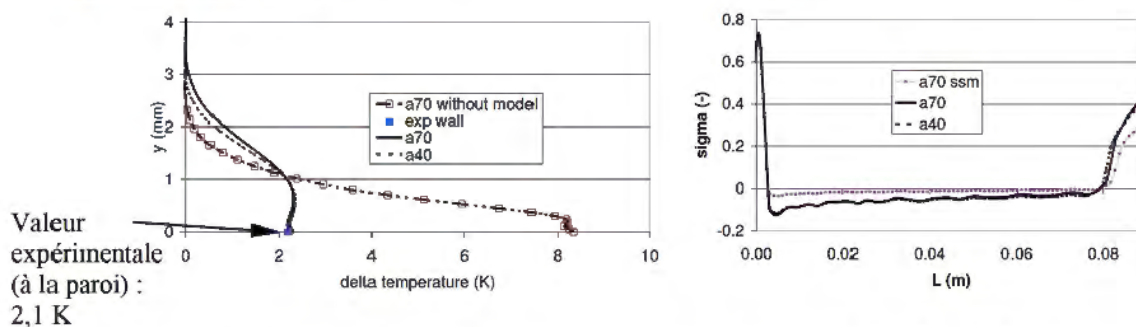


FIG. 6 – Variation de température au puits 1 et pression sur le plancher de la veine

Concernant la pression sur le plancher, les résultats sont qualitativement corrects. On observe une dépression importante dans la zone amont de la poche due à une pression de vaporisation plus faible. Le calcul cavitant sans modèle de prise en compte des effets thermodynamiques donne une pression dans la poche quasiment constante, proche de la pression de vaporisation de référence. Le paramètre A_{min} ne semble pas avoir d'influence sur la pression en paroi.

4 Conclusions

Par des comparaisons entre nos calculs et des résultats expérimentaux nous avons pu réaliser une première validation d'un nouveau modèle de cavitation avec prise en compte des effets thermodynamiques. Les résultats pour un calcul 2D stationnaire dans un Venturi avec du R114 sont en bon accord qualitatif avec les données des essais Fruman *et al.* (1999). La

longueur de la poche ainsi que le taux de vide à l'intérieur sont diminués du fait de la baisse de la pression de saturation corrélée au refroidissement local. Cette pression plus faible est observée sur la paroi du Venturi. Le refroidissement de 2,1 K, observé expérimentalement, est aussi correctement prédit par nos calculs. Dans le but de caractériser la chute de performance d'une turbopompe de moteur spatial en fluide cryogénique, des calculs sont en cours sur des géométries d'inducteurs en LH2.

Remerciements :

Nous souhaitons remercier le Cnes et la Snecma pour leur contribution, ainsi que Numeca^{int} pour leur coopération concernant les développements numériques.

Références:

- Coutier-Delgosha, O., Fortes-Patella, R., Reboud, J.L., Hakimi, N., Hirsch, C. 2005 Numerical simulation of cavitating flow in 2D and 3D inducer geometries. *Int. Journal for Numerical Methods in Fluids*. **48**, Issue 2, pp. 135-167
- Delannoy, Y., Kueny, J.L. 1990 Two phase flow approach in unsteady cavitation modeling. *Cavitation and Multiphase Flow Forum*. ASME-FED **98**, pp. 153-158
- Fruman, D. H., Reboud, J-L., Stutz, B. 1999 Estimation of thermal effects in cavitation of thermosensible liquids, *Int J of Heat and Mass Transfer*. **42**, pp. 3195-3204
- Hakimi, N. 1998 Preconditioning methods for time dependent Navier-Stokes equations. Ph.D.Thesis, Vrije Univ., Brussels
- Hord, J. 1973 Cavitation in liquid cryogenes, NASA CR-2156
- Hosangadi, A., Ahuja, V., Ungewitter, R.J. 2006 Numerical study of a flat plate inducer: Comparison of performance in liquid hydrogen and water, CAV2006, Wageningen, The Netherlands
- Pouffary, B., Fortes-Patella, R., Reboud, J.L. 2005 Numerical analysis of cavitation instabilities in inducer blade cascade. ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition, Houston
- Reboud, J-L. Stutz, B. and Coutier, O. 1998 Two-phase flow structure of cavitation : experiment and modelling of unsteady effects, 3rd Int. Symp. on Cavitation, Grenoble, France
- Rolland, J., Boitel, G., Barre, S., Goncalves, E., Fortes Patella, R. 2006 Experiments and Modelling of Cavitating Flows in Venturi: Part I: Stable Cavitation, CAV2006, Wageningen, The Netherlands
- Stahl, H.A, Stepanoff, A.J. 1956 Thermodynamic aspects of cavitation in centrifugal pumps. *Transaction ASME Journal of basic engineering*. **78**, pp. 1691-1693
- Utturkar, Y., Wu, J., Wang, G., Shyy, W. 2005 Recent progress in modelling of cryogenic cavitation for liquid rocket propulsion. *Progress in aerospace sciences*. **41**, pp. 558-608