

Vers un outil de simulation tridimensionnelle des transferts de chaleur et de masse dans un caloduc tournant

Florent MENU*, Yves BERTIN, Adel BENSELAMA, Cyril ROMESTANT

Institut Pprime CNRS – Université de Poitiers – ENSMA
SP2MI – Téléport 2 – 11 Boulevard Marie et Pierre Curie
BP 30179 F86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex

* (auteur correspondant : florent.menu@ensma.fr)

Résumé – Les caloducs tournants sont des systèmes passifs mettant à profit le changement de phase d'un fluide caloporteur pour transporter une grande quantité de chaleur d'une partie évaporateur à une partie condenseur. La caractéristique d'un caloduc tournant est l'utilisation des forces centrifuges pour transporter le fluide liquide de la partie condenseur vers la partie évaporateur. Ils sont utilisés pour refroidir des machines tournantes et leurs atouts sont de pouvoir transporter à faible différentiel de température une quantité importante de chaleur dans un encombrement restreint, de ne pas avoir d'entretien, de respecter les contraintes de masse. La physique, dont celle de l'interface libre liquide-vapeur, intervenant dans un caloduc tournant est très complexe et est difficile à modéliser à cause de la multitude d'échelles mises en jeu. L'outil choisi ici, et qui sert à implémenter le modèle représentatif de la physique associée, est OpenFOAM car libre, ouvert et évolutif. Cet outil utilise la méthode des volumes finis pour la discrétisation spatiale et la méthode VOF pour la capture de l'interface libre liquide-vapeur. Le problème pour le fluide est valable dans la phase liquide, dans la phase vapeur et à l'interface liquide-vapeur. Ce problème reste le plus complexe et fait intervenir différentes forces : forces capillaires et forces centrifuges, notamment. Les forces capillaires utilisent la courbure de l'interface liquide-vapeur qui nécessite un traitement particulier pour éviter le bruit numérique à l'origine des écoulements parasites proche interface libre. L'outil étant finalisé, il a permis d'effectuer des simulations tridimensionnelles sur un caloduc. La simulation réalisée est sur un caloduc tournant de géométrie lisse en régime transitoire. La topologie des écoulements et des transferts ainsi que les résultats concernant l'effet de la force centrifuge, du changement de phase, du caloduc sont présentés et analysés.

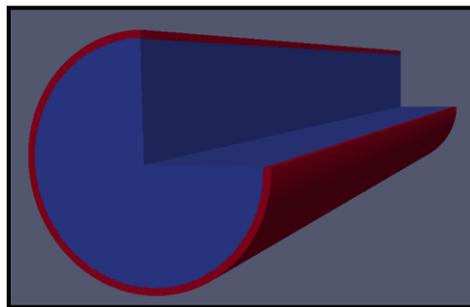


Figure 1 : Caloduc lisse en vue perspective $\frac{3}{4}$ sous OpenFOAM : film liquide tapissant la paroi sous l'effet de la force centrifuge et le cœur de vapeur.

Mots-clés : caloduc tournant, CFD tridimensionnelle, forces centrifuges, interfaces libres, VOF

Nomenclature

P pression, Pa

T température, K

U vitesse, m/s

Symboles grecs

α fraction volumique

η viscosité de volume, Pa.s

κ courbure totale, m^{-1}

λ conductivité thermique, W/m/K

μ viscosité dynamique, Pa.s

ϕ densité de flux, W/m²

ρ masse volumique, kg/m³

σ tension de surface, N/m

Indices

0 initial

c compression

g généralisée

i interface

l liquide

sat saturation

v vapeur

Exposants

+ condensation

- évaporation

1. Introduction

La technologie des caloducs est utilisée depuis plus d'un demi siècle dans les systèmes tournants [1]. Les caloducs tournants sur leur axe de révolution permettent, grâce aux forces centrifuges, de ramener le liquide de la partie condenseur vers la partie évaporateur. Dans les années 1980, Marto a émis plusieurs possibilités pour utiliser des caloducs tournants dans les machines tournantes [2]. Les résultats expérimentaux et numériques ont montré le potentiel d'utiliser cette technologie. Cependant, ces études sont restées à des vitesses de rotations modestes. C'est dans les années 1990 que Ponnapan a réussi à réaliser des mesures de performance pour des vitesses de 10000 à 30000 tours/min [3]. Les caloducs tournants sont étudiés grâce à différents dispositifs expérimentaux très complexes de par la mobilité de l'objet à instrumenter et de par les fortes contraintes de sécurité. Ainsi l'outil numérique est un moyen d'"observer" les phénomènes physiques se déroulant dans un caloduc tournant, encore faut-il le concevoir de manière fiable et robuste. Des récents travaux ont été réalisés par Song [4] sur la modélisation des échanges dans un caloduc tournant lisse. Les travaux suivants s'inscrivent dans cet optique de caloduc tournant lisse, à savoir développer un outil numérique permettant de simuler aussi finement que possible (et nécessaire) un tel dispositif.

Plusieurs méthodes permettent de rendre compte de la physique inhérente au caloduc, dont le mécanisme clé est l'échange diphasique. La méthode choisie ici pour décrire le problème diphasique associé est la méthode "Volume Of Fluid" (VOF). Cette méthode permet de conserver notamment la masse. Cette méthode consiste à définir une variable α représentant la fraction volumique du liquide en présence qui est transportée par l'écoulement.

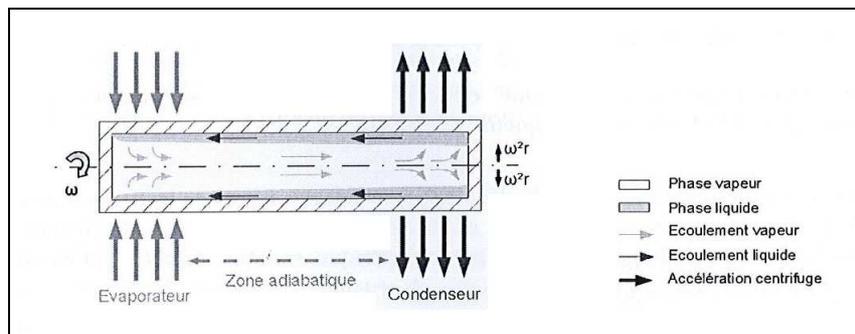


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un caloduc tournant

Dans le cadre de la méthode VOF, les forces capillaires F_σ sont calculées en utilisant le modèle “Continuum Surface Force” (CSF) sans densité moyenne, pour plus de détail voir Brackbill [7].

2.2. Les extérieures : conditions limites

Les conditions limites appliquées aux parois solides sont :

- ❖ $\nabla P \cdot \mathbf{n} = 0$
- ❖ $U = 0$

Les conditions limites pour la température dépendent de la partie du caloduc concernée.

- ❖ $\begin{cases} T = T_c & \text{si partie condenseur} \\ -\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} = \phi_c & \text{si partie évaporateur} \\ -\lambda \nabla T \cdot \mathbf{n} = 0 & \text{sinon (région adiabatique et disques aux extrémités du caloduc)} \end{cases}$

avec \mathbf{n} la normale sortante.

La phase α a pour condition limite, pour toutes les frontières, un angle statique de 90° , c.-à-d. $\nabla \alpha \cdot \mathbf{n} = 0$.

2.3. L'interface liquide-vapeur

2.3.1. Le changement de phase : modèle Schrage

Il existe différents modèles pour exprimer les termes de changement de phase. Celui qui a été choisi de par son fondement physique est le modèle de Schrage déduit des équations de la cinétique des gaz [8]. Le modèle suggère la proportionnalité du flux massique à la différence entre la pression à l'interface et la pression de saturation, la dépendance avec le saut entre la température d'interface et la température de saturation est négligée par rapport au premier terme.

Les flux massiques de changement de phase du modèle Schrage s'expriment ainsi comme suit :

$$\begin{cases} \dot{m}^+ = C^+ \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{1/2} \max(P_i - P_{sat}(T)) \\ \dot{m}^- = C^- \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{1/2} \min(P_i - P_{sat}(T)) \end{cases} \quad (5)$$

Cependant, dans l'approche VOF, ce sont des termes sources/puits volumiques qu'il convient de définir. Ces sources/puits sont données par le produit de la quantité m^\pm par le terme $\zeta = \|\nabla \alpha\|$. Ainsi on en déduit l'expression de $\dot{\rho}$ en fonction des termes sources/puits :

$$\dot{\rho} = (\alpha \dot{m}^- + (1 - \alpha) \dot{m}^+) \zeta \quad (6)$$

2.3.2. Les forces capillaires

La dynamique de l'écoulement peut être fortement influencée par les forces capillaires qui dépendent du rayon de courbure de l'interface, une grandeur qu'il faut estimer correctement. La méthode choisie pour évaluer avec plus de précision les forces capillaires revient à un couplage VOF-méthode Level Set [9].

La méthode Level Set (LS) définit une distance ψ entre les volumes de fluide et l'interface. De cette distance est calculée la courbure de l'interface liquide-vapeur et les forces capillaires.

Le système pour résoudre cette grandeur ψ est le suivant [10] :

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \text{signe}(\psi_0)(1 - |\nabla \psi|) & \text{avec } \psi_0(\mathbf{x}) = (2\alpha - 1)0.75\Delta x \\ \psi(\mathbf{x}, 0) = \psi_0(\mathbf{x}) & \text{et } \Delta \tau = 0.1\Delta x \end{cases} \quad (7)$$

Ainsi on en déduit la courbure et la force capillaire en fonction de ψ :

$$\kappa(\psi) = \nabla \cdot \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|} \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_\sigma = \sigma \kappa(\psi) \delta(\psi) \nabla \psi \quad \text{avec} \quad \delta(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\psi| > \epsilon \\ \frac{1}{2\epsilon} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi\psi}{\epsilon}\right) \right) & \text{if } |\psi| \leq \epsilon \end{cases} \quad (9)$$

et ϵ l'épaisseur de l'interface, choisi de manière que $2\epsilon = 3\Delta x$ avec Δx la taille typique du maillage.

En exprimant les forces capillaires en fonction de ψ , on peut ainsi résoudre le système d'équations (3).

Le couplage de la méthode VOF et de la méthode LS permet d'améliorer la précision sur le calcul de la courbure, soit d'améliorer la précision sur les forces capillaires \mathbf{F}_σ sans pour autant nécessiter de ressources de calcul prohibitives.

3. Résultats et analyses

Dans cette partie, une première phase de validation du calcul de la courbure de l'interface est effectuée. Ensuite, des résultats relatifs au caloduc à proprement parler, sont exposés.

3.1. Relaxation d'une goutte cubique d'eau liquide en microgravité

Il s'agit de créer une goutte cubique d'eau liquide entourée de vapeur d'eau à l'instant initial et celle-ci se relaxe en une goutte sphérique grâce aux forces de capillarités. L'objectif ici est de quantifier l'erreur sur la courbure de l'interface liquide-vapeur grâce au saut de pression entre les deux phases, en comparant la résolution sans LS et la résolution avec le couplage VOF-LS.

Le cube fait 50 mm et le cube d'eau liquide a pour côté $d_{goutte} = 10$ mm à l'initialisation.

Les conditions limites sont des gradients nuls pour les grandeurs α, ρ, T, U . La température vaut 20°C et la pression 2333,44 Pa dans le cube pour le liquide et la vapeur, tous deux à saturation.

L'erreur pertinente qui convient d'analyser est calculée à partir de la différence de pression entre le liquide et de la vapeur :

$$E(P) = \left| \frac{(P_l - P_v)_{simulation} - (P_l - P_v)_{exacte}}{(P_l - P_v)_{exacte}} \right| \quad (10)$$

Avec la formule de Laplace exacte pour un milieu de forme parfaitement sphérique au repos immergé dans un autre milieu non miscible (état vers lequel est sensé relaxer le problème)

$$\left\{ \begin{array}{l} P_l - P_v = \frac{2\sigma}{R_{goutte}} \end{array} \right. \quad (11)$$

Pour un maillage cartésien de taille $\Delta x = \frac{R_{goutte}}{5}$, à $t = 0,1s$ on a $E(P) = 13,3\%$ avec la méthode VOF classique alors qu'avec la méthode couplée VOF Level Set donne $E(P) = 3,3\%$.

Ainsi il y a gain d'un facteur 4 sur l'erreur de calcul de la pression capillaire. Ce résultat suggère l'utilité du couplage VOF Level Set dans un calcul diphasique notamment pour les caloducs.

3.2. Le caloduc tournant

Le caloduc tournant simulé est un tube cylindrique lisse de rayon 5 mm et de longueur 5 cm. Il se compose de trois parties réparties selon la longueur : une partie condenseur, une partie adiabatique et une partie évaporateur. La partie condenseur et la partie évaporateur font 1 cm de long, la partie adiabatique fait 3 cm de long.

Le fluide utilisé est l'eau. Le liquide tapisse l'enveloppe du caloduc d'une épaisseur de 0,3 mm et la vapeur occupe le reste du volume, soit une masse totale injectée de 0,48 g.

Les valeurs initiales considérées sont : $T_c = 273,15$ K (20 °C), $\phi_c = 10$ W/cm², $\sigma = 0,07$ N/m, $R_{interface} = 4,7$ mm, $\omega = 5000$ tr/min, $T_{v0} = T_{l0} = 273,15$ K (20 °C), $P_{v0} = P_{sat}(T_{v0}) = 2333,44$ Pa, $P_{l0} = P_{v0} - \sigma\kappa = 2318,55$ Pa (loi de Laplace avec une courbure cylindrique égale à 5 mm).

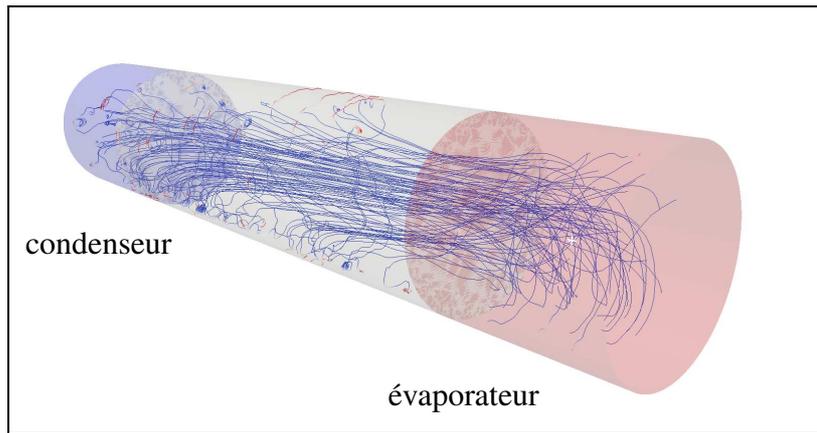


Figure 2 : Ligne de courant partant de l'évaporateur (les couleurs n'indiquent que les régions condenseur et évaporateur)

Dans la partie évaporateur, on observe d'abord l'évaporation du liquide. Cet excès de vapeur est suivi d'une augmentation de la pression coté évaporateur qui va mettre la vapeur en mouvement vers le condenseur. Par suite des forces de Coriolis qui s'exercent plus sur la veine vapeur froide que la colonne vapeur chaude dans la partie évaporateur, les filets de courants vapeur sont mis en mouvement rotatif. Une fois arrivés au niveau condenseur, où la colonne est plus froide, ces mêmes filets se mettent à tourner dans un mouvement contra-rotatif.

Par ailleurs, la pression liquide dépend de la vitesse de rotation et de la distance entre la paroi et l'interface. Sa loi de variation est donnée par [11] :

$$P_l(r, \omega) = P_{sat}(T_i) + \rho_l \omega^2 R (\delta^* - h) \quad (12)$$

avec h la distance à la paroi et δ^* l'épaisseur du film liquide.

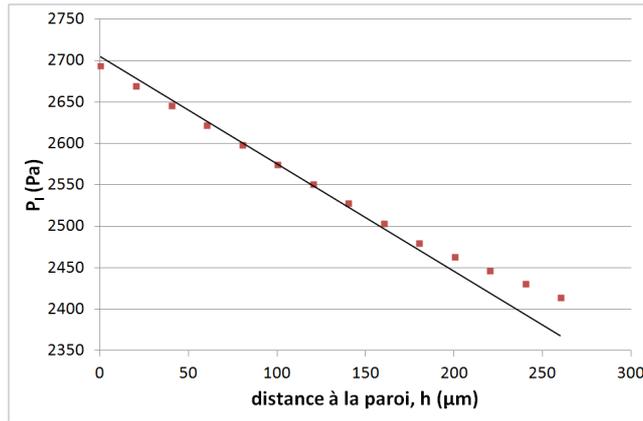


Figure 3 : *Champ de pression*

La Figure 3 montre une bonne concordance entre les résultats théoriques et numériques de la pression dans le film liquide. La pression est maximale aux frontières du caloduc car les forces centrifuges sont les plus importantes.

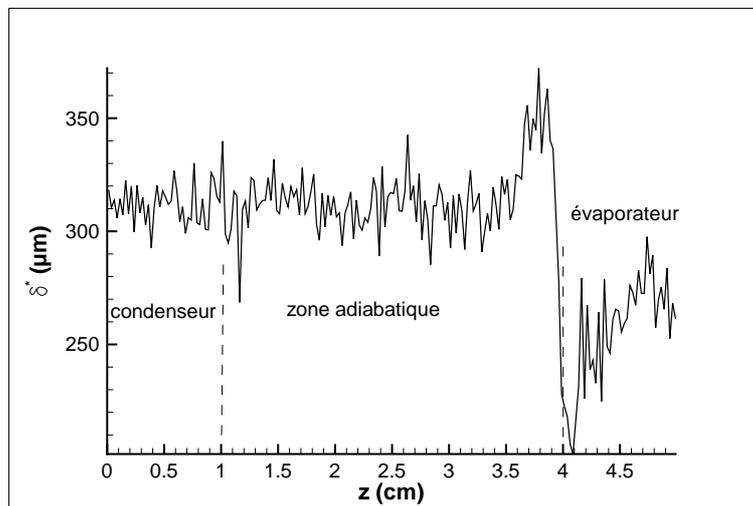


Figure 4 : *Profil moyenné de l'interface le long de la direction axiale*

La Figure 4 représente l'évolution de l'épaisseur moyennée du film liquide le long de l'axe du caloduc. Cette évolution est bruitée du fait de l'interpolation de la solution sur un maillage non structuré assez grossier de $120 \mu m$. On observe une réduction de l'épaisseur du film liquide du condenseur vers l'évaporateur. Ceci est consistant avec la physique car le film liquide à l'évaporateur est plus mince que celui du condenseur du fait des phénomènes de évaporation/condensation. En revanche, ce qui semble moins intuitif est la variation brusque de l'épaisseur de ce film au voisinage de la transition zone adiabatique-évaporateur et, dans une moindre mesure, au voisinage de la transition condenseur-zone adiabatique. Nous pensons que cela est dû à l'instabilité de Rayleigh-Bénard qui se manifeste localement à ces endroits suite aux forts gradients thermiques occurrents [12].

4. Conclusion

Dans ce travail, une méthode numérique permettant la modélisation tridimensionnelle, diphasique avec changement de phase d'un caloduc lisse soumis aux forces d'inertie a été proposée. L'outil numérique implémenté ne représente, pour l'instant, que la partie diphasique (fluide) du caloduc tournant.

La méthode pour le suivi de l'interface liquide-vapeur, qui consiste en un couplage VOF-LevelSet, a permis de calculer avec une meilleure précision la courbure de l'interface liquide-vapeur et ainsi de réduire les courants parasites (un artéfact purement numérique) au niveau de l'interface liquide-vapeur.

Les premières simulations ont permis une visualisation inédite, à la connaissance des auteurs, de l'écoulement vapeur au sein de ce dispositif, inaccessible autrement. L'outil développé semble allier fiabilité et évolutivité.

Des améliorations sont en cours de développement, incluant la prise en compte de la dynamique de la paroi du caloduc, avec toute la problématique d'interfaçage solide-fluide qui en découle ainsi qu'un déploiement de calculs parallèles, pour une meilleur réactivité de l'outil.

Remerciements

Ce travail rentre dans le cadre du projet HIROPEAM supporté par l'Union Européenne et Liebherr-Aerospace Toulouse sous le contrat SP1-JTI-CS-2012-01 SGO-02-39.

Références

- [1] V. Gray, "The rotating heat - pipe a wickless hollow shaft for transferring high heat fluxes," *J. Heat Transfer*, vol. 69, pp. 1–28, 1969.
- [2] P. J. Marto and A. S. Wanniarachchi, "Influence of internal axial fins on condensation heat transfer in co-axial rotating heat pipes," in *Heat Transfer and Fluid Flow in Rotating Machinery* (W.-J. Yang, ed.), pp. 235–244, 1987.
- [3] R. Ponnapan, Q. He, and J. Leland, "Test results of water and methanol high-speed rotating heat pipes," *J. Thermophys. Heat Transfer*, vol. 12, pp. 391–397 – 49, 1998.
- [4] F. Song, D. Ewing, and C. Ching, "Fluid flow and heat transfer model for high-speed rotating heat pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 23, pp. 4393 – 4401, 2003.
- [5] G. Harikrishnan, P. Ebin, and J. Jayakumar, "Cfd simulation of subcooled flow boiling using open-foam," *Phys. Rev. E*, vol. 79, p. 036306, Mar 2014.
- [6] E. Berberović, N. P. van Hinsberg, S. Jakirlić, I. Roisman, and C. Tropea, "Drop impact onto a liquid layer of finite thickness : Dynamics of the cavity evolution," *Phys. Rev. E*, vol. 79, p. 036306, Mar 2009.
- [7] J. Brackbill, D. Kothe, and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension," *Journal of Computational Physics*, vol. 100, no. 2, pp. 335 – 354, 1992.
- [8] R. W. Schrage, *A theoretical study of interphase mass transfer*. Columbia Univ. Press, New York, 1953.
- [9] C. Kunkelmann and P. Stephan, "Modification and extension of a standard volume-of-fluid solver for simulating boiling heat transfer," *ECCOMAS CFD Lisbon*, 2010.
- [10] A. Albadawi, D. Donoghue, A. Robinson, D. Murray, and Y. Delauré, "Influence of surface tension implementation in volume of fluid and coupled volume of fluid with level set methods for bubble growth and detachment," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 53, pp. 11 – 28, 2013.
- [11] R. Bertossi, N. Guilhem, V. Ayel, C. Romestant, and Y. Bertin, "Modeling of heat and mass transfer in the liquid film of rotating heat pipes," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 52, pp. 40 – 49, 2012.
- [12] A. M. Benselama, C. Romestant, Y. Bertin, and V. Ayel, "Investigation of thermogravity/thermocapillary effects in rotating heat pipes : prediction of instabilities at the liquid film," *IHPC India*, Oct 2013.