

# Étude des écoulements diphasiques en changement de phase : application à l'évaporation directe dans les centrales solaires à concentration

Rémi DINSENMEYER<sup>1,2\*</sup>, Nadia CANEY<sup>2</sup>, Jean-François FOURMIGUÉ<sup>1</sup>, Philippe MARTY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEA, LITEN/DTBH/SCTR/LST

17, rue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex, France

<sup>2</sup>Université Joseph Fourier, LEGI

BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

\*remi.dinsenmeyer@cea.fr

**Résumé** - Cette étude porte sur les écoulements diphasiques en changement de phase, et leur application aux centrales solaires à concentration à évaporation directe. Dans l'évaporateur, le fluide caloporteur peut être sous forme diphasique. Ainsi ce travail consiste à étudier spécifiquement les régimes d'écoulement en changement de phase de façon numérique. Les différents modèles diphasiques d'un code commercial utilisant la méthode numérique des volumes finis sont confrontés et utilisés en fonction du régime d'écoulement. Une validation adiabatique du logiciel est effectuée.

## Nomenclature

$a$	amplitude de perturbation, $m$
$A$	aire de section de tube, $m^2$
$c$	vitesse complexe, $m/s$
$D$	diamètre, $m$
$g$	accélération de la gravité, $m/s^2$
$h$	hauteur, $m$
$i$	unité imaginaire
$J$	vitesse superficielle, $m/s$
$\dot{m}$	flux massique, $kg/m^2/s$
$t$	temps, $s$
$v$	vitesse, $m/s$
$x$	titre massique
$z$	coordonnée axiale, $m$

## Symboles grecs

$\alpha$	taux de vide
$\eta$	perturbation sur la hauteur de liquide, $m$
$\kappa$	nombre d'onde, $m^{-1}$
$\lambda$	longueur d'onde, $m$
$\Phi$	densité de flux thermique, $W/m^2$
$\rho$	masse volumique, $kg/m^3$

## Indices et exposants

$I$	imaginaire
$R$	réel
$l$	liquide
$v$	vapeur
$tot$	total

## 1. Introduction

Dans un contexte de raréfaction des sources d'énergies fossiles, il devient nécessaire de développer des sources d'énergies alternatives. L'utilisation de la chaleur solaire pour produire indirectement de l'électricité est beaucoup moins connue que celle mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Les technologies de concentration solaire utilisent des collecteurs qui concentrent les radiations solaires pour porter à haute température un fluide caloporteur. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour la génération d'électricité au moyen d'un cycle thermodynamique. Si la limitation due au stockage est importante pour des énergies comme l'énergie éolienne ou photovoltaïque, elle l'est moins pour la concentration solaire, qui utilise généralement des systèmes de stockage de chaleur (par voie latente, sensible ou thermochimique) ou qui peut être hybridée avec d'autres sources énergétiques (gaz naturel, biomasse, etc.). Le principe de l'énergie solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire afin de le transformer en énergie utilisable. Le rayonnement est concentré et capturé par des « collecteurs » ponctuels ou linéaires. La concentration optique se fait au moyen de miroirs, le but étant de fournir une intensité lumineuse plus importante sur le collecteur. Ainsi

les systèmes à concentration peuvent atteindre des températures élevées de l'ordre de 500°C, ce qui permet d'augmenter le rendement des cycles thermodynamiques utilisés. Dans le cas présent, le rayonnement est concentré sur des tubes horizontaux.

La plupart des centrales actuelles fonctionnent avec un circuit primaire et un circuit secondaire. Un fluide caloporteur est chauffé par le champ solaire, puis celui-ci échange avec un circuit secondaire chargé de la production électrique. Plus récemment, la voie de la génération directe de vapeur a été explorée. Elle consiste en la production de vapeur d'eau sans l'utilisation d'un fluide caloporteur intermédiaire (cf. figure 1). Dans ce cas le fluide passant dans le champ solaire est de l'eau à haute pression (de l'ordre de 80 à 100 bar). La transition vers cette technologie, éliminant les échangeurs thermiques et supprimant le besoin d'huile de transfert thermique (qui a besoin d'être remplacée régulièrement), peut permettre de réduire les coûts. De plus, l'utilisation de l'évaporation directe de l'eau élimine les risques d'incendie et de pollution dus à l'utilisation de l'huile et permet de travailler à plus de 400°C sans risque d'endommager l'huile synthétique.

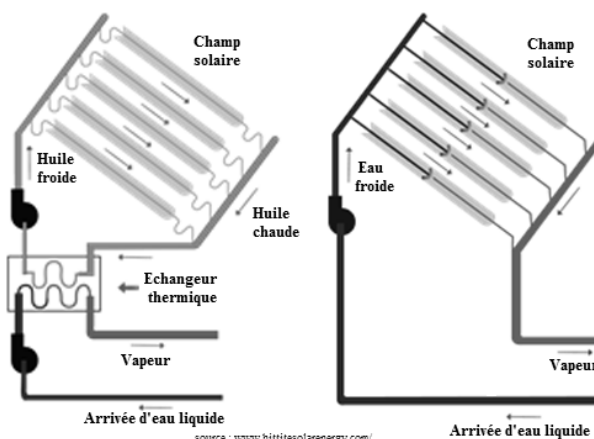


Figure 1: Principe d'une centrale classique (à gauche) et de l'évaporation directe (à droite)

Cependant l'évaporation directe génère également des inconvénients. Concernant l'écoulement, une possible instabilité du système diphasique eau/vapeur dans le collecteur ou des problèmes liés aux changements importants des volumes de fluide durant l'évaporation peuvent amener à des changements de débit de vapeur à la sortie. Il faut également éviter le phénomène d'assèchement des parois du tube, conséquence d'un mauvais mouillage de la paroi, provoquant une augmentation très rapide de la température. Cela peut amener à des fortes contraintes voire à une fusion du collecteur: une réflexion sur les matériaux utilisés pour réaliser le collecteur est donc nécessaire.

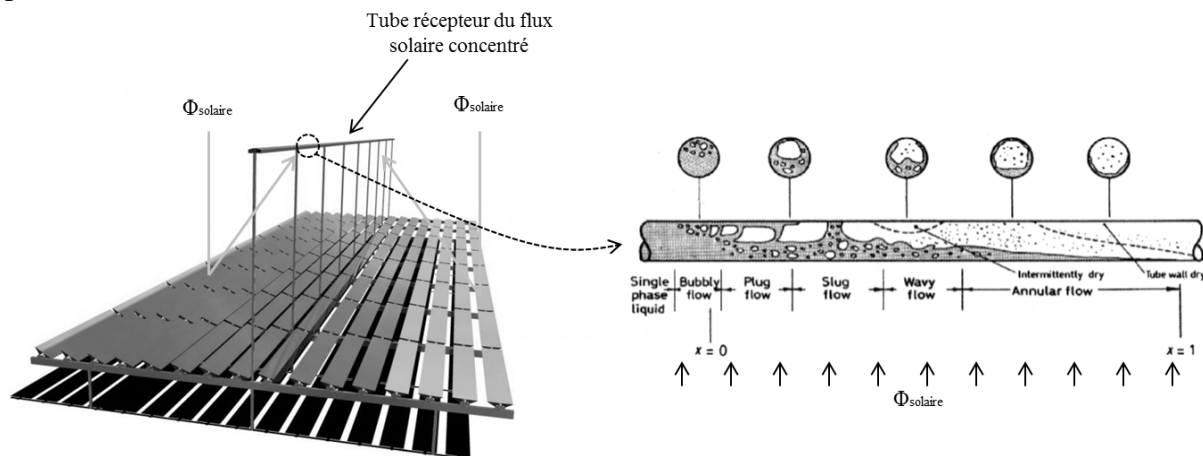


Figure 2 : Régimes d'écoulement dans un tube horizontal d'une centrale solaire [1]

Un problème majeur qui devra être résolu pour la mise en œuvre d'un système d'évaporation directe à grande échelle est le contrôle des modes d'écoulement diphasiques et de l'ébullition à l'intérieur du capteur solaire. Dans un système à concentration linéaire, l'eau entrant dans le tuyau va être chauffée jusqu'à la température de saturation. De la vapeur va être créée puis surchauffée. Selon le débit et la quantité de chaleur apportée au système, différentes configurations d'écoulements diphasiques peuvent être observées (cf. figure 2). Ainsi, pour ces applications, il est important de connaître les configurations d'écoulement dans le tube afin de mieux contrôler la thermique du système, et prévenir les instabilités qui peuvent le limiter.

Afin de prédire les régimes d'écoulement présents dans le tube récepteur de la centrale solaire, on peut tracer des cartes d'écoulement représentant les différents régimes, avec en abscisse la vitesse superficielle du liquide et en ordonnée la vitesse superficielle du gaz. La vitesse superficielle  $J$  d'une phase correspond à son débit volumique divisé par la section totale du canal. Il s'agit donc d'une vitesse qui peut également être considérée comme un flux volumétrique. Elle est définie pour la phase vapeur, en fonction du titre thermodynamique  $x$ , du flux massique  $\dot{m}_{tot}$  et la masse volumique  $\rho_v$  par :

$$J_v = \frac{x \dot{m}_{tot}}{\rho_v} \quad (1)$$

La plupart des cartes ont été construites pour des écoulements diphasiques adiabatiques à l'aide de résultats expérimentaux obtenus avec différents fluides. Les cartes de Baker [2], Taitel et Dukler [3] et de Steiner [4] comptent parmi les plus connues pour les écoulements horizontaux. Il existe peu de cartes spécifiques aux écoulements non adiabatiques, et l'utilisation de cartes adiabatiques pour des écoulements avec changement de phase est souvent peu fiable, car celles-ci ne prennent pas en compte l'effet du flux de chaleur apporté. De plus, il n'existe pas actuellement de carte spécifique à l'eau, encore moins sous pression, les fluides étudiés étant généralement des réfrigérants. Une des premières cartes d'écoulements prenant en compte le flux de chaleur est celle de Kattan *et al.* [5]. Elle est issue de leur étude de cinq réfrigérants en évaporation dans des tubes horizontaux, et est une modification de la carte de Steiner [4], elle-même étant une modification de la carte de Taitel et Dukler [3]. Depuis, de nombreuses adaptations de cette carte ont été faites pour d'autres réfrigérants, comme par exemple celles de Zürcher [6] ou Wojtan [7].

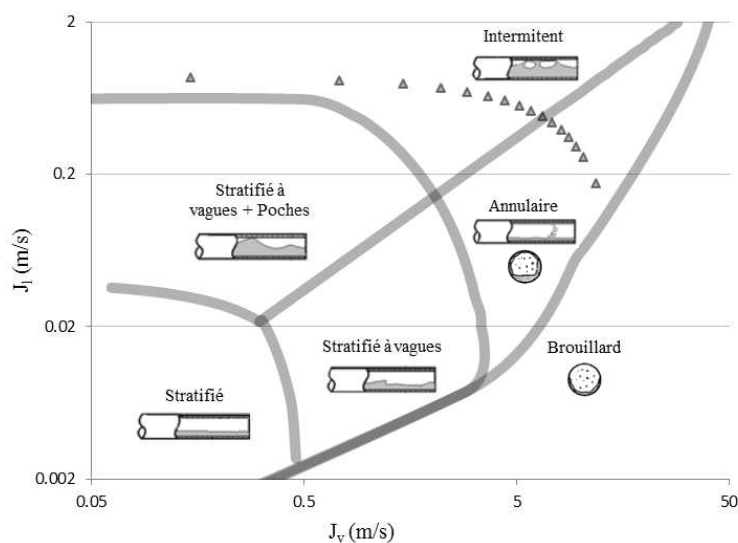


Figure 3 : Carte d'écoulement de Wojtan [7] et points correspondants à un fonctionnement en régime nominal de la centrale solaire à différentes positions dans le tube

Sur la figure 3, les points correspondants à un fonctionnement en régime nominal à différentes positions dans le tube de la centrale solaire étudiée sont superposés à une carte tracée par la méthode de Wojtan [7]. Au début de la zone d'évaporation, les points sont à la frontière entre deux zones, l'écoulement est donc attendu comme étant à la limite entre les régimes stratifié à vagues avec formation de poches et intermittent, et il aura tendance pour des titres plus élevés à être de type annulaire. Cependant afin d'éviter des problèmes thermiques comme l'assèchement de la paroi, ce régime sera évité. Le modèle numérique devra donc pouvoir simuler divers régimes d'écoulement, et principalement le régime intermittent.

## **2. Présentation des outils de simulation**

Les écoulements diphasiques en changement de phase sont des phénomènes complexes à modéliser. A cette fin, une approche de modélisation par CFD (Computational Fluid Dynamics) avec le logiciel Ansys Fluent 14.5 est utilisée.

Trois approches principales sont utilisées pour aborder de tels écoulements en CFD : Le modèle de mélange (mixture model), le modèle VOF (Volume Of Fluid) et le modèle Eulérien (6 équations). Les deux premiers sont basés sur des approches homogènes. Les champs de vitesse, pression, turbulence, etc., sont calculés pour un pseudo-fluide représentant le mélange des deux phases. Cette méthode consiste donc à résoudre un problème monophasique en ajoutant une équation supplémentaire de transport de taux de vide  $\alpha$ . Celui-ci représente le taux d'occupation volumique d'une maille par chacune des deux phases. Dans le cas du modèle de mélange les deux phases sont représentées par des pourcentages de présence dans une maille. Le modèle VOF permet de simuler une interface nette entre le liquide et la vapeur, et est ainsi bien adapté au suivi de grandes interfaces mouvantes comme c'est le cas pour des écoulements stratifiés. Cette méthode n'est donc pas adaptée à la simulation des régimes à bulles où le calcul devient trop lourd.

A l'opposé, le modèle Eulérien se base sur une approche multi-fluides et donc sur la résolution des équations de conservation de masse, de moment et d'énergie pour chacune des phases. Il est très utilisé dans les applications nucléaires couplé à des modèles mécanistes afin de modéliser finement les phénomènes d'ébullition nucléée en paroi. Cependant cette approche dépend beaucoup de la qualité des modèles de fermeture, et est gourmande en temps de calcul. Ainsi, on utilise seulement ce modèle pour simuler la première partie de l'écoulement lorsque celui-ci est dispersé, et on le couple à un modèle de transfert en paroi personnalisé.

Afin de modéliser les configurations d'écoulement en régime horizontal, ces deux derniers modèles seront utilisés en fonction du régime d'écoulement majoritaire. Dans les zones à faible titre, dominées par un régime à bulles, le modèle Eulérien sera plus adapté que le modèle VOF. Ce dernier sera mis en œuvre pour des titres plus élevés lors de régimes à poches ou stratifiés, en faisant apparaître une interface distincte entre le liquide et la vapeur.

## **3. Validation du régime intermittent avec Fluent**

### **3.1 Travaux antérieurs**

Les régimes d'écoulement à vagues, poches et plus généralement intermittent ont été très étudiés expérimentalement. En effet ces régimes apparaissent fréquemment dans les applications liées aux industries chimiques, pétrolières et nucléaires. Pourtant, du fait de la complexité physique de ces écoulements, leur simulation en CFD reste peu abordée [8]. Une

des premières tentatives a été réalisée grâce au code commercial FIDAP (éléments finis) pour simuler en 2D un écoulement à poches [9]. L'air et l'eau sont injectés par deux entrées séparées, et des vagues sont observées à une certaine distance de l'entrée. L'auteur de cette étude a rencontré des problèmes dus au faible nombre de mailles et du manque de puissance de calcul, mais il conclut que la simulation de ce type d'écoulement semble possible.

Une autre étude se base sur le logiciel Ansys CFX pour étudier les régimes à vagues en CFD 3D [10]. Le modèle eulérien non homogène est utilisé et l'auteur parvient à modéliser des vagues en utilisant des conditions aux limites oscillantes. De plus l'écoulement est initialisé avec une surface libre de forme sinusoïdale et un taux de vide volumique moyen dans le tube de 50%. Il note que la distance nécessaire à partir de l'entrée pour commencer à former des vagues est qualitativement plus importante qu'en expérimental.

Dans le cadre d'études en sûreté nucléaire, un travail expérimental et numérique a été mené au Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) [8;11;12]. Les auteurs utilisent les résultats de deux installations expérimentales pour les confronter à trois codes de CFD. Ils concluent que CFX et NEPTUNE\_CFD (un code CFD développé par le CEA et EDF) sont aptes à simuler ce type d'écoulements, mais que Fluent 2D ne l'est pas. En simulant leur installation expérimentale avec le modèle 6-équations (eulérien) et une détection d'interface, ils arrivent à reproduire qualitativement le processus de formation d'une vague, en comparant leurs résultats avec les visualisations expérimentales.

Plus récemment, une étude expérimentale et numérique a été menée afin de comparer les résultats numériques du logiciel libre OpenFOAM avec des résultats expérimentaux [13]. L'écoulement est étudié localement en différents endroits. Numériquement, une impulsion est utilisée pour initialiser les vagues. Grâce à une remise à l'échelle temporelle et spatiale, les résultats numériques sont confrontés aux résultats expérimentaux.

Il apparaît donc qu'il existe peu d'études qui traitent de la simulation de poches en CFD, et que celles-ci ont souvent recours à une perturbation pour les déclencher. Il existe peu de résultats quantitatifs majeurs sur le sujet. Nous allons donc nous intéresser à ce régime et utiliser le logiciel Fluent afin de le simuler. Mais avant cela nous allons nous pencher sur le mécanisme de formation des vagues et des poches.

### 3.2 Mécanisme de formation des vagues

La théorie de Kelvin-Helmholtz est fondée sur une analyse d'instabilités d'une interface entre deux fluides (liquide et gaz par exemple), ou d'une perturbation infinitésimale de la surface. Nous allons ici analyser les instabilités de Kelvin-Helmholtz sous forme linéaire, non visqueuse et incompressible pour des soucis de simplification [14]. L'analyse de stabilité consiste à résoudre le bilan des forces (cf. figure 4) et à le résoudre pour la vitesse de la vague [3;14;15].

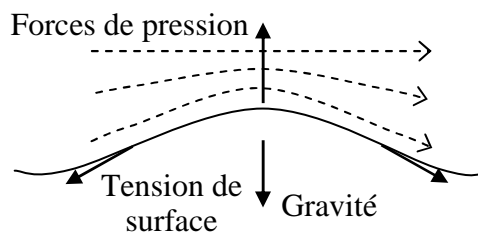


Figure 4 : Forces agissant sur une vague à l'interface liquide-gaz

Les forces physiques en jeu sont ici la gravité, la tension de surface et l'inertie. Les deux premières s'opposent à la croissance de la vague et tendent donc à la stabiliser. Mais

l'accélération de la vitesse de la vapeur au sommet de la vague (du fait de la réduction de section) provoque une baisse de pression juste au-dessus de l'interface. Cette accélération provoque une force de type inertielle qui a tendance à faire croître la perturbation.

Prenons une perturbation se propageant à la surface du liquide. C'est une vague, elle peut être décrite par la forme générale d'une onde :

$$\eta = a \exp[i\kappa(z - ct)] = a \exp[\kappa c_I t] \exp[i\kappa(z - c_R t)] \quad (2)$$

Dans l'équation (2),  $c$  sa vitesse complexe, qui est de la forme :

$$c = c_R + ic_I \quad (3)$$

La partie droite de l'équation (2) permet d'analyser cette onde : elle voyage suivant la direction  $z$ , avec une vitesse  $c_R$  et son amplitude varie dans le temps avec le taux  $\exp[\kappa c_I t]$ . Ainsi l'amplitude de la vague augmente ou diminue en fonction du signe (positif ou négatif) de la partie complexe de la vitesse. Le but dans une analyse de stabilité est donc de déterminer  $c_I$  en fonction du nombre d'onde ainsi que les forces physiques qui amènent à l'atténuation ou la croissance d'une instabilité. L'analyse de stabilité conduit après quelques simplifications [15] à une inégalité sur la différence de vitesse de gaz et de liquide. Dans un tube, on peut montrer qu'une vague grandit si la condition exprimée par l'équation (4) est respectée.

$$v_g - v_l > \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)gA_g}{\rho_g D \sqrt{1 - \left(\frac{2h_l}{D} - 1\right)^2}}} \quad (4)$$

La figure 5 représente la valeur de la limite calculée, en fonction du taux de présence de liquide, défini par  $(1-\alpha)$ . Il faut remarquer qu'en dessous d'un taux de présence de liquide de 50%, Taitel et Dukler prédisent dans leur étude de stabilité [3] que l'écoulement est stratifié ou annulaire. En effet, l'accélération de la vapeur au-dessus d'une vague ne suffit plus dans ce cas pour la faire grandir, ce que nous avons vérifié numériquement.

### 3.2 Validation des calculs numériques

Des calculs sont réalisés dans des tubes horizontaux pour différents points de fonctionnement, en faisant varier les couples vitesses superficielles de liquide et de gaz, et en imposant un taux de vide à l'entrée constant de 50 %.

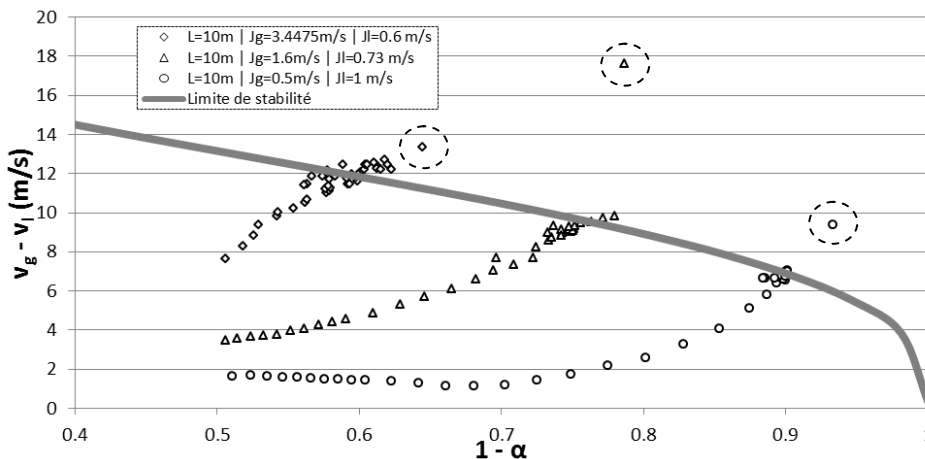


Figure 5 : Limite de stabilité et comparaison avec différents points de fonctionnement

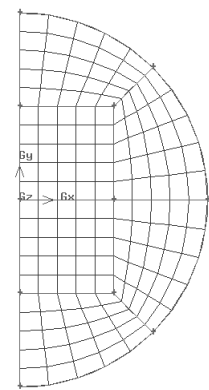


Figure 6 : Détail du maillage utilisé

Les calculs sont effectués sur un demi-domaine pour économiser du temps de calcul (de l'ordre de la semaine avec 8 processeurs en parallèle). Le maillage en coupe transversale

utilisé est celui de la figure 6. A différentes distances de l'entrée avant la première vague du canal, on compare les points avec la limite de stabilité (cf. équation (5)).

On observe sur la figure 5 que les points partent d'un taux de présence liquide de 50% en entrée, et au fur et à mesure que l'on avance dans le canal, le taux de liquide augmente avec la différence de vitesse (dû à un équilibre des forces et une conservation de débit), mais ils restent globalement en dessous de la limite calculée. Cependant certains points (entourés sur la figure 5) passent au-dessus, et correspondent à la formation et la croissance d'une vague. Ce phénomène peut être observé sur la figure 7, où l'on a tracé l'interface en fonction du temps pour une distance à l'entrée fixée. Le code reproduit donc bien les limites de stabilités prévues par une analyse simple de Kelvin-Helmholtz. Des vagues sont engendrées uniquement par des instabilités hydrodynamiques, car aucune condition aux limites oscillante n'est imposée.

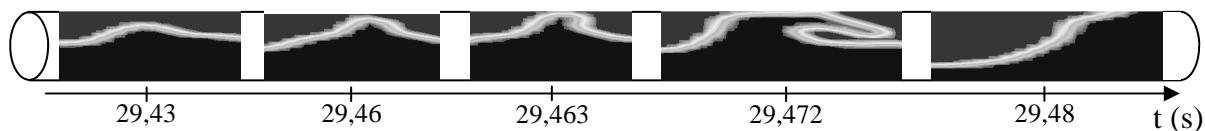


Figure 7 : Evolution de l'interface à une distance fixe de l'entrée, en fonction du temps

Afin de valider la fréquence de formation des poches créées, le code est confronté à des résultats expérimentaux de la littérature (figure 8). Il s'agit d'une étude expérimentale de la fréquence de passage des poches en fonction de la longueur du canal [16]. Il s'agit d'un écoulement co-courant d'eau et d'air, dans un tube de diamètre interne 0.078m, à pression atmosphérique, et à différentes vitesses superficielles. Des calculs ont été réalisés dans les mêmes conditions, sur un temps physique de 60 secondes. Des moyennes de taux de vide à différentes distances de l'entrée ont été réalisées en fonction du temps et sont comparées aux données expérimentales.

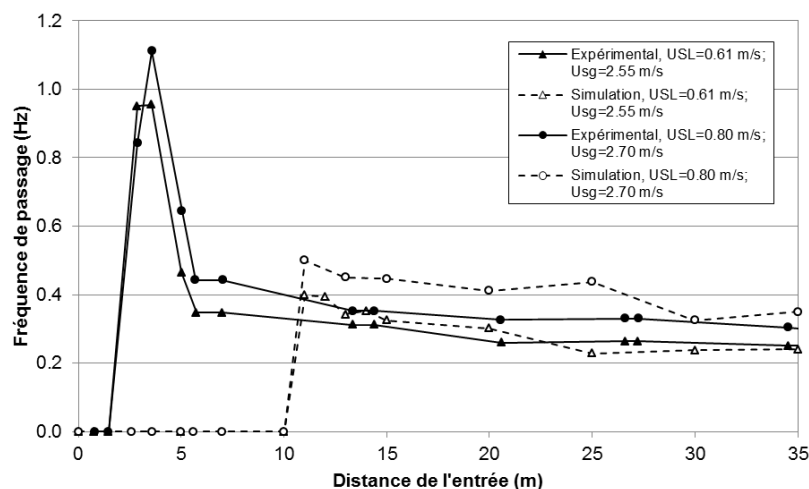


Figure 8 : Comparaison des fréquences de passage de poches obtenues par la simulation avec des données expérimentales [16].

On observe que la fréquence de passage des poches se stabilise avec la longueur du tube (à une distance de l'entrée d'environ 30 mètres) et tend vers les fréquences relevées expérimentalement. Les vagues se forment à une distance plus importante de l'entrée, ce qui est attribué au fait que nos conditions aux limites d'entrée sont très stables par rapport aux conditions réelles. En effet des instabilités dues aux éléments du circuit hydraulique (pompes, vannes, etc.) permettent aux vagues de se former plus rapidement dans les conditions réelles. L'effet de l'augmentation de la fréquence au début du tube est également présent en simulation, mais il est moins marqué.

## 4. Conclusion

Le but de l'outil de simulation est d'exploiter le modèle Eulérien afin de traiter le régime à bulle jusqu'à sa transition vers le régime stratifié, puis d'utiliser le modèle VOF pour reproduire des configurations d'écoulement de la littérature. La simulation d'un régime d'écoulement à poches est validée avec le logiciel Fluent de manière adiabatique, tant sur les mécanismes de formation d'instabilités que sur la fréquence de passage des poches.

Un modèle de transfert thermique en paroi, couplé à un terme de création de vapeur par une corrélation d'échange thermique en ébullition est en développement. Celui-ci sera implémenté dans les modèles diphasiques afin de prendre en compte la création de vapeur en paroi, le but à terme étant de pouvoir simuler une évolution des configurations d'écoulement lors du changement de phase.

## Références

- [1] J. G. Collier and J. R. Thome, *Convective Boiling and Condensation*, 3rd ed. Oxford, Oxford University Press, (1994).
- [2] O. Baker, "Simultaneous Flow of Oil and Gas", *Oil Gas Journal*, vol. 53, pp. 185-190, (1954).
- [3] Y. Taitel and A. E. Dukler, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow", *AIChE Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 47-55, (1976).
- [4] D. Steiner, "Heat transfer to boiling saturated liquids," in *VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure*. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV), Ed. Düsseldorf: 1993.
- [5] N. Kattan, J. R. Thome, and D. Favrat, "Flow boiling in horizontal tubes: Part 1 - Development of a diabatic two-phase flow pattern map", *Journal of Heat Transfer*, vol. 120, no. 1, pp. 140-146, (1998).
- [6] O. Zücher, D. Favrat, and J. R. Thome, "Development of a diabatic two-phase flow pattern map for horizontal flow boiling", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 45, no. 2, pp. 291-301, (2002).
- [7] L. Wojtan, T. Ursenbacher, and J. R. Thome, "Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I - A new diabatic two-phase flow pattern map", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 14, pp. 2955-2969, (2005).
- [8] C. Vallée, T. Höhne, H. M. Prasser, and T. Sühnel, "Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 238, no. 3, pp. 637-646, (2008).
- [9] I. Lun, R. K. Calay, and A. E. Holdo, "Modelling two-phase flows using CFD", *Applied Energy*, vol. 53, no. 3, pp. 299-314, (1996).
- [10] T. Frank, "Numerical Simulation of Slug Flow Regime for an Air-Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipes," Avignon, France, (2005), pp. 1-13.
- [11] C. Vallée, D. Lucas, M. Beyer, H. Pietruske, P. Schütz, and H. Carl, "Experimental CFD grade data for stratified two-phase flows", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, no. 9, pp. 2347-2356, (2010).
- [12] Y. Bartosiewicz, J. M. Seynhaeve, C. Vallée, T. Höhne, and J.-M. Lavieville, "Modeling free surface flows relevant to a PTS scenario: Comparison between experimental data and three RANS based CFD-codes. Comments on the CFD-experiment integration and best practice guideline", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, no. 9, pp. 2375-2381, (2010).
- [13] M. Czapp, M. Utschick, J. Rutzmoser, and T. Sattelmayer, "Investigations on Slug Flow in a Horizontal Pipe Using Stereoscopic Particle Image Velocimetry and CFD Simulation with Volume Of Fluid Method," 3rd ed Anaheim, California, USA, (2012), pp. 477-486.
- [14] A. K. Vij and W. E. Dunn, "Modeling of Two-Phase Flows in Horizontal Tubes," Air Conditioning and Refrigeration Center, University of Illinois, USA, ACRC TR-098, May 1996.
- [15] L. N. Milne-Thomson, *Theoretical Hydrodynamics*, 4th ed. Londres, MacMillan & Co Ltd, (1962).
- [16] P. M. Ujang, C. J. Lawrence, C. P. Hale, and G. F. Hewitt, "Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow", *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 32, no. 5, pp. 527-552, (2006).