

Etude du débit d'échange entre deux liquides non-miscibles à travers un orifice horizontal en convection naturelle

Kevin VARRALL^{1,2*}, Olivier VAUQUELIN¹, Hugues PRETREL², Samuel VAUX³

¹Laboratoire IUSTI

Technopôle de Château Gombert, 60 rue Frédéric Joliot Curie - 13453 Marseille Cedex 13

² Laboratoire d'Expérimentation des Feux

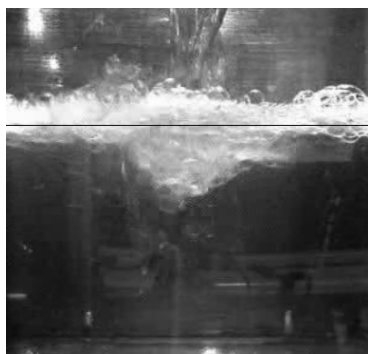
IRSN, Centre de Cadarache - 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex

³ Laboratoire d'Incendie et Explosion

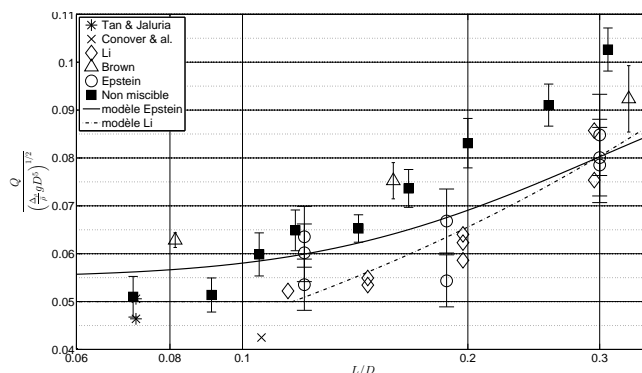
IRSN, Centre de Cadarache - 13115 Saint-Paul-Lez-Durance Cedex

*(auteur correspondant : kevin.varrall@irsn.fr)

Résumé - Dans un contexte de sûreté des installations nucléaires, prédire la propagation de fumée d'incendie, vecteur de matières dangereuses, est un enjeu important. L'écoulement de convection naturelle bidirectionnelle à travers un orifice horizontal défini par son diamètre D et son épaisseur L (passage de câbles, trémie, etc.) est un écoulement peu étudié et pour lequel les modèles prédictifs ne sont pas matures. Les études existantes sont basées pour la plupart sur des expériences où la flottabilité est engendrée par une différence de densité entre deux fluides et pour des écoulements essentiellement laminaires. Celles ci reposent sur des mesures de l'évolution de la densité (Mercer et Thompson (1975), Epstein (1988), Tan et Jaluria (1992)) ou ponctuelles de la vitesse (Conover et al. (1995), Li (2007)). L'analyse des débits d'échange montre qu'il existe un maximum au débit adimensionné $Fr = Q/\sqrt{\Delta\rho/\bar{\rho}gD^5}$ pour un rapport $L/D \approx 0.6$ (Epstein (1988), Li (2007)). La présente étude propose d'étudier cet écoulement à partir d'une autre technique de mesure, non intrusive, du débit d'échange en utilisant deux liquides non miscibles (eau et white spirit). Les expérimentations sont réalisées à échelle réduite (0.027 m^3 par compartiment) pour des régimes faiblement turbulents de convection libre sur une gamme de $0.07 < L/D < 0.3$ et un $\Delta\rho/\bar{\rho}$ d'environ 30%. La variation du ratio L/D est effectuée pour une épaisseur L constante. Des essais de répétabilité sont effectués pour chaque configuration. La mesure du débit est réalisée à partir du suivi optique de l'interface par des enregistrements vidéo (cf. Figure 1). Pour les conditions étudiées, les pertes de charges sont exclusivement dues à la singularité que représente l'orifice, et le débit varie selon une loi quadratique du diamètre D . Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux disponibles dans la littérature.



(a)



(b)

Figure 0: : (a) Image donnant le suivi de l'interface, (b) Comparaison du nombre de Froude fonction du paramètre L/D

1. Introduction

Cette étude traite de la recherche d'une approche corrélative d'un écoulement bidirectionnel à travers un orifice horizontal de longueur L et de diamètre D , reliant deux compartiments (cf. Figure 1). Cet écoulement est gouverné par des forces de flottabilité, engendrées par un gradient de température (convection naturelle) ou le contact entre deux fluides à la même température mais de masse volumique différente (poussée d'Archimède).

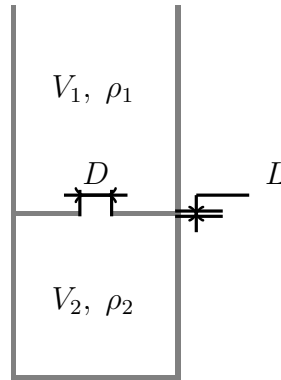


Figure 1: Illustration de la configuration d'étude

La composante du champ de pression qui existe au sein de l'orifice et dans l'un ou l'autre des fluides ainsi que la surface occupée par chacun d'eux rend difficile l'expression d'une relation théorique simple. Le recours à des expériences ou des simulations numériques est alors une alternative pour comprendre et proposer un modèle corrélatif de ces écoulements. Les domaines d'études réalisées par différents auteurs sont recensés dans le Tableau 1.

	Fluides	L/D	$\Delta\rho/\bar{\rho}$	Re	Mesure débit
Brown [1]	air	0.0825 - 0.66	0.19	-	Flux thermique et température
Mercer & Thompson [2]	eau	3.5 - 18	0.1	-	Eq. 2
Epstein [3]	eau	0.015 - 10	0.025 - 0.17	50 - 1000	Eq. 2
Tan & Jaluria [4]	eau	0.07 - 4	0.044 - 0.13	80 - 800	Eq. 2
Conover et al.[5]	eau	0.008 - 0.106	0.05 - 0.12	360 - 670	LDV et Eq. 2
Li [6]	air	0.027 - 4.455	0.02 - 0.12	300 - 4000	Fil chaud et LDA

Tableau 1: Synthèse des études expérimentales relatives à un écoulement à travers un orifice horizontal

La première étude référencée (Brown [1]) propose un modèle décrivant la convection libre d'air chaud à travers un orifice rectangulaire de côté C ($D = 1.128C$). Ainsi, d'après ses mesures, Brown suggère la corrélation $Nu = 0.0546PrGr^{0.55}(L/C)^{-1/3}$, ce qui, rapporté au nombre de Froude, donne $Fr = 0.0824 \left(\frac{L}{D}\right)^{1/6} Gr^{1/20}$ avec ($Fr = Q/\sqrt{\Delta\rho/\bar{\rho}gD^5}$). Le nombre de Froude d'échange croît avec l'augmentation du ratio $\frac{L}{D}$. En se penchant sur le débit d'échange

au sein de conduites longues sous différentes inclinaisons, Mercer et Thompson [2] concluent que ce nombre de Froude diminue avec l'augmentation du rapport $\frac{L}{D}$. Epstein [3] propose une synthèse de ces deux conclusions opposées et constate que la physionomie de l'écoulement change d'un régime pulsé (pour $\frac{L}{D} \rightarrow 0$) pour lequel la fréquence d'oscillation est de l'ordre de $f_o = \frac{2Q(t)}{5\sqrt{LD}}$ (Conover *et al.*[5]), à un régime de diffusion turbulente ($\frac{L}{D} \gg 1$). Entre ces deux limites ($0.01 < \frac{L}{D} < 20$), la concurrence entre les forces de flottabilité et les forces de frottement (fluide/parois et fluide/fluide) conduit à un maximum de la valeur du nombre de Froude autour de $\frac{L}{D} \approx 0.6$. Il observe notamment que pour $\frac{L}{D} \leq 0.4$, l'échange se fait en l'absence de diffusion entre les fluides. Dans ces expériences, réalisées avec deux liquides, eau douce et eau salée, les mesures des débits d'échange sont basées sur le bilan de masse :

$$m_i(t) = \int_{V_i} \rho_i(x, y, z, t) dx dy dz \quad (1)$$

où l'indice i désigne les grandeurs relatives au compartiment 1 ou 2, et $\sum m_i(t) = cte$. Epstein [3] pose l'hypothèse de "réacteur parfait", ce qui lui permet d'exprimer l'Equation 1 par $m_i(t) = V_i \rho_i(t)$. Les fluides étant incompressibles, le débit volumique montant égale le débit descendant, ainsi, la variation temporelle de la masse des locaux 1 et 2 est reliée au débit volumique par les relations $V_i \frac{d}{dt} \rho_i(t) = Q(t)(\rho_j(t) - \rho_i(t))$ (avec $i \neq j$). La combinaison de ces dernières permet de relier le débit d'échange aux volumes considérés ainsi qu'aux densités des deux fluides par la relation suivante :

$$Q(t) = \frac{-V_1 \frac{d}{dt} \rho_1(t)}{(\rho_1(t) - \rho_2(0)) - \frac{V_1}{V_2}(\rho_1(0) - \rho_1(t))} \quad (2)$$

Ainsi, seule la variation de la densité du liquide contenu dans le compartiment 1 est nécessaire pour mesurer le débit d'échange. Afin de satisfaire son hypothèse de réacteur parfait, Epstein [3] rebouche régulièrement l'orifice avant de brasser le liquide contenu dans le compartiment 1 pour en mesurer la densité. En revanche, une erreur est introduite en n'incluant pas l'homogénéisation du liquide du compartiment 2 dans son protocole de mesure, et par conséquent donne une valeur erronée du débit calculé par l'Equation 2. En utilisant les données recueillies avec ce protocole expérimentale, il propose une corrélation présentée Figure 2, dans laquelle le nombre de Froude n'est fonction que du rapport $\frac{L}{D}$. Des travaux similaires utilisant le même protocole de mesure, menés par Tan et Jaluria [4] aboutissent aux mêmes observations. Des expérimentations à grande échelle, couplant mesures LDA et par anémomètre à fil chaud permettent à Li [6] d'analyser l'écoulement bidirectionnel d'air chauffé. Il propose également un modèle donnant la valeur du nombre de Froude en fonction du ratio $\frac{L}{D}$. Les travaux existants, dont les points expérimentaux sont reproduits Figure 2, proposent ainsi des approches corrélatives basées sur des mesures indirectes, ou intrusives du débit, ce qui peuvent entraîner des accumulations d'erreurs sur les mesures difficilement quantifiables.

L'objectif de la présente étude est d'aborder l'écoulement à travers l'orifice à partir de fluides non miscibles, contrairement aux approches de la littérature. Cette approche permet de proposer une méthode alternative à la mesure de débit en ayant une meilleure maîtrise des incertitudes de mesure. Un nombre important de diamètres d'orifice dans une gamme de valeur de $\frac{L}{D}$ peu traitée dans la littérature est étudié. Après avoir présenté le dispositif d'essai et le protocole expérimental en section 2, il sera abordé, en section 3, l'influence du diamètre sur le débit d'échange. Les résultats sont comparés à ceux de la littérature avec des fluides miscibles et une corrélation est proposée section 4.

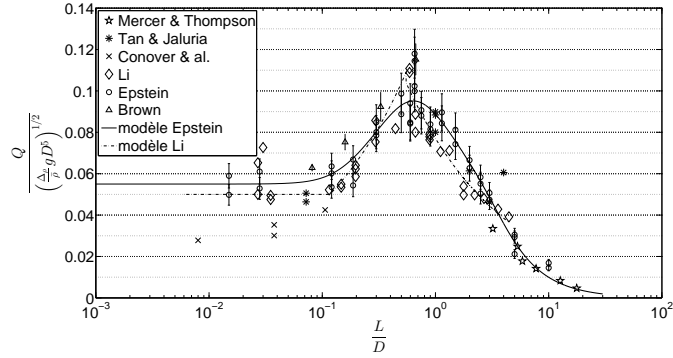


Figure 2: Variation du nombre de Froude en fonction du paramètre $\frac{L}{D}$ pour des écoulements de convection naturelle à travers un orifice horizontal (les barres d'erreurs attribuées aux résultats de Brown [1] représentent l'amplitude de ses résultats et non leur incertitude)

2. Dispositif et protocole expérimentaux

Le dispositif expérimental (cf. Figure 1) est une boîte en PMMA de 0.01 m d'épaisseur dont les côtes intérieures sont de $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ de surface et 0.7 m de hauteur. Une plaque de PMMA de 0.01 m d'épaisseur fixée à 0.3 m du plancher scinde le dispositif en deux compartiments. Une caméra placée face au compartiment bas permet de visualiser le remplissage de l'enceinte. Des règles sont maintenues le long des bords verticaux de la boîte de façon à quantifier l'évolution de la hauteur de l'interface au cours du temps. Les liquides utilisés sont de l'eau douce ($\rho_1 = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$) et du naphta lourd (white spirit comme non commercial, $\rho_2 = 737 \pm 30 \text{ kg.m}^{-3}$). Neuf diamètres d'orifice sont utilisés $D \in [32.5, 39, 50, 60, 70, 85, 95, 110, 140 \text{ mm}]$ pour une même épaisseur $L = 10 \text{ mm}$.

Le compartiment bas est rempli de naphta lourd, ainsi que la zone de l'orifice et le fond de la chambre supérieure de façon à pouvoir chasser les bulles d'air emprisonnées au plafond du local bas. Ces bulles évacuées, l'orifice est fermé. Le compartiment haut est alors rempli d'eau colorée, et laissé ouvert à la pression atmosphérique. Quand la surface libre est stabilisée, la vidéo est lancée puis l'orifice est ouvert. Après plusieurs essais, il est apparu que quelle que soit l'instabilité créée par la façon dont l'orifice est ouvert, le débit atteint rapidement la même valeur constante. Le moyen retenu est alors de déposer une fine plaque sur l'orifice avant le remplissage du compartiment haut, et de la retirer horizontalement pour lancer l'expérience. Une fois les volumes d'eau et de naphta lourd échangés, ainsi que la surface libre à nouveau au repos, l'acquisition vidéo est arrêtée. Dans le but de conforter la précision des mesures effectuées, plusieurs essais de répétabilité sont réalisés pour chaque diamètre.

3. Mesure du débit d'échange

Les deux liquides étant non miscibles, l'Equation 1 devient $m_i(t) = A(H_i \rho_j \pm h_i(t) \Delta \rho)$, où A est la section au sol du compartiment, H sa hauteur, h la hauteur de l'interface entre les deux liquides et $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$. L'évolution temporelle de la masse ne dépend alors que de la variation de la hauteur de l'interface. Une méthode de mesure directe et non intrusive de l'évolution de du débit d'échange est proposée.

L'emploi de liquides non miscibles impose une limite géométrique due aux tensions superficielles, évaluée, pour les conditions expérimentales étudiées ($L = 0.01 \text{ mm}$), à $D_c \approx 20 \text{ mm}$,

à partir de laquelle aucun n'échange n'a lieu.

La hauteur h est recherchée par un traitement des images issues des enregistrement vidéos (cf. Figure 3). Après avoir extrait les images, celles-ci sont quantifiées en 256 niveaux de gris. Les règles placées sur les bords de la maquette permettent de faire la calibration du dispositif (conversion des pixels en mètres et correction des distorsions optiques liées à la camera). L'analyse des images est alors faite en ne considérant que la variation de l'interface sur la face avant du dispositif. Une première estimation de l'interface est réalisée en attribuant à celle-ci un seuil de niveau de gris. Cette estimation est employée pour définir un domaine géométrique plus restreint dans lequel une recherche raffinée est menée. Le traitement d'image dans cette fenêtre de travail est constitué d'un filtrage permettant de détecter les contours et leurs intensités, puis d'un seuillage qui permet de binariser le domaine de travail faisant ressortir la "zone d'interface". La hauteur d'interface est alors considérée comme étant la hauteur moyenne de cette zone. La fréquence d'acquisition de la camera détermine l'échelle de temps. La vitesse de variation de l'interface est donnée par la pente de la courbe $h = f(t)$.

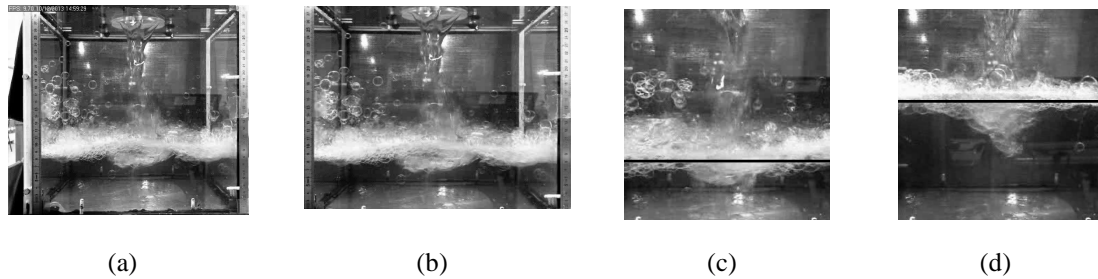


Figure 3: Procédure de traitement d'images (essai D95#1). (a) image en niveau de gris, (b) correction de la perspective, (c) estimation de l'interface à un temps t_1 , (d) estimation de l'interface à un temps t_2

La Figure 4 présente l'évolution temporelle de l'interface dans le caisson inférieur pour six diamètres. Pour un diamètre donné, la vitesse de déplacement de l'interface est constante au cours de l'expérience. De plus, la hauteur initiale d'eau dans le compartiment supérieur n'a pas d'influence sur cette vitesse.

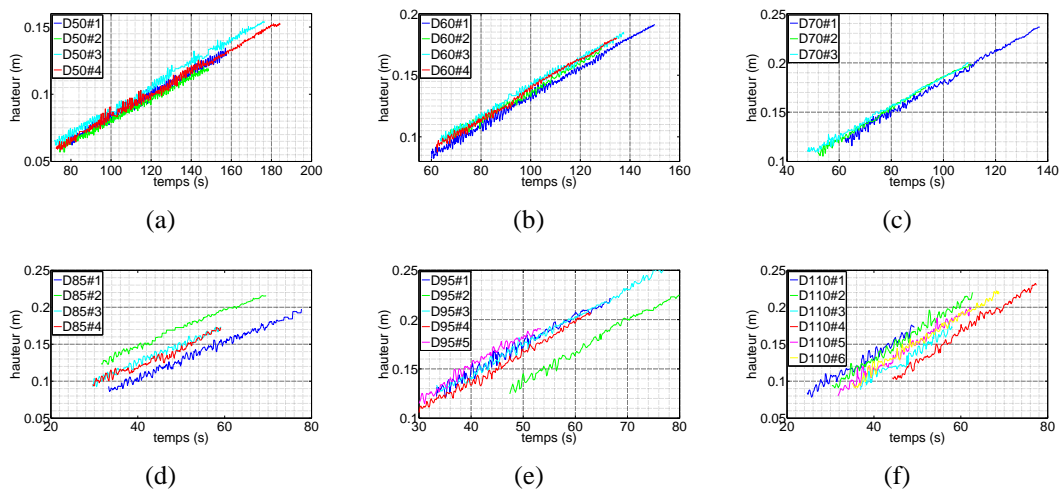


Figure 4: Évolution temporelle de l'interface résultats bruts issus du traitement vidéo. (a) $D = 50$ mm, (b) $D = 60$ mm, (c) $D = 70$ mm, (d) $D = 85$ mm, (e) $D = 95$ mm, (f) $D = 110$ mm

L'incertitude d'une série de mesure est estimée à partir d'une courbe équivalente synthétisant les résultats de cette série. Afin d'octroyer à chaque essai d'une même série autant d'importance, l'erreur est calculée sur l'intervalle où toutes les courbes d'une série coexistent. La demi incertitude correspond alors à l'écart type σ , et $w_{Dk} = a_{Dk} \pm \sigma$, où a est le coefficient directeur de la droite de régression de la courbe équivalente et k le diamètre considéré. La Figure 5 fait la synthèse des résultats obtenus pour huit diamètres.

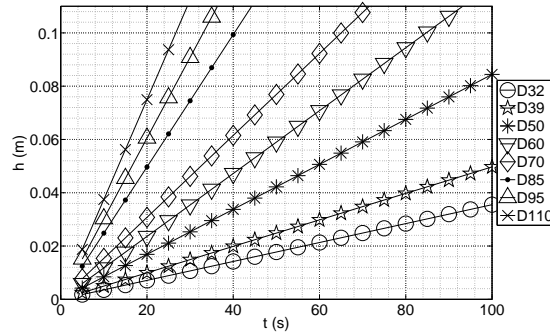


Figure 5: Courbes de régression des résultats expérimentaux donnant l'évolution temporelle moyenne de l'interface dans le caisson inférieur pour huit diamètres d'orifice

En raison de trop fortes perturbations de l'interface, l'analyse vidéo des essais menés avec un diamètre de 140 mm n'a pas pu être faite, une estimation de la vitesse de montée de l'interface est néanmoins donnée par $w = \frac{(h_{fin} - h_{debut})}{(t_{fin} - t_{debut})}$ pour les huit essais réalisés. La vitesse retenue pour cette série de mesures est la moyenne de ces huit essais et l'erreur commise correspond à deux fois l'écart type. Les incertitudes de mesure sur les autres grandeurs physiques (D , $\Delta\rho$, etc.) sont prises en compte dans le calcul du débit ainsi que du nombre de Froude par la relation de mesures indépendantes.

Il apparaît que pour la gamme de $\frac{L}{D}$ étudiée, en ne faisant varier que le diamètre de l'orifice, le débit évolue selon une fonction quadratique du diamètre de l'ordre de $Q = 0.03D^2$ (cf. Figure 6).

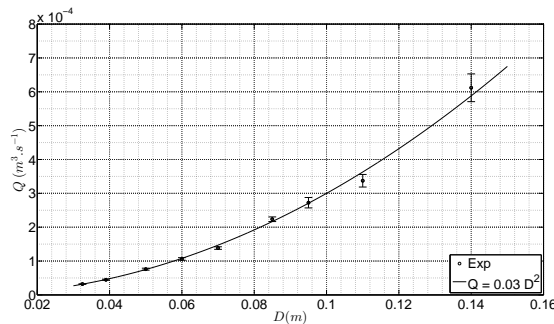


Figure 6: Evolution du débit d'échange en fonction du diamètre de l'orifice

4. Comparaison aux résultats de la littérature

En comparant les données recueillies dans la présente étude à celles disponibles dans la littérature (cf. Figure 7), il apparaît que la variation du nombre de Froude en fonction du ratio

$\frac{L}{D}$ suit le même comportement (loi en racine) quelques soient les fluides mis en jeu. Bien que dans le cas présent les liquides ne soient pas miscibles, cette comparaison est justifiée par le fait que sur la gamme de $\frac{L}{D}$ étudiée, le temps caractéristique lié à la diffusion est très grand devant celui lié à la convection. Les résultats obtenus avec des liquides non miscibles confortent ceux des précédents travaux.

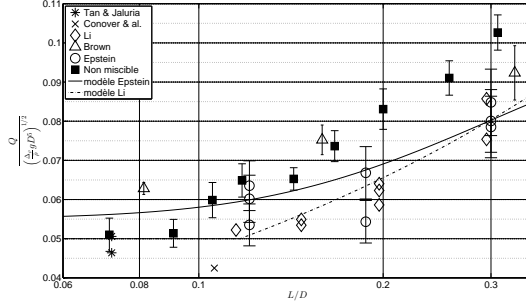


Figure 7: Comparaison entre les données obtenues et celles de la littérature

La variation du nombre de Froude en fonction du paramètre géométrique $\frac{L}{D}$ est améliorée par l'accroissement de la précision des mesures. En outre, l'analyse qualitative des vidéos montre qu'un régime de transition existe sur la gamme $0.143 \leq \frac{L}{D} \leq 0.2$, entre des écoulements oscillants ($\frac{L}{D} \leq 0.143$) et stables ($0.2 \leq \frac{L}{D}$), ce qui confirme les observations d'Epstein [3] qui note cette transition pour $\frac{L}{D} \approx 0.15$.

Une corrélation est recherchée sur la base des données de la présente étude ainsi que celles de la littérature en proposant une relation reposant sur une description physique de l'écoulement (les corrélations existantes d'Epstein [3] ou Li [6] étant des lois mathématiques ajustées aux données expérimentales). L'expression proposée s'appuie sur la formulation du débit d'échange $Q = CSw$. La surface S occupée par chacun des fluides est considérée comme étant la moitié de la section de l'orifice ($S = \frac{\pi R^2}{2}$). La vitesse w est la vitesse moyenne donnée par la relation standard $w = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}gL}$. Les pertes de charges sont prises en compte dans le coefficient $C = \frac{K}{Re^\alpha}$, où K est une constante, $Re = \frac{Rw}{\nu}$ le nombre de Reynolds de l'écoulement bidirectionnel et α une fonction du ratio $\frac{L}{D}$.

Le débit d'échange et le nombre de Froude de cet écoulement deviennent alors :

$$Q = K \frac{\pi}{2} R^{2-\alpha} \left(\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} gL \right)^{\frac{1-\alpha}{2}} \bar{\nu}^\alpha \quad \text{et} \quad Fr \frac{Q}{\sqrt{\Delta\rho/\bar{\rho}gD^5}} = K \frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{L}{D}} Re^{-\alpha} \quad (3)$$

La Figure 8 propose une comparaison du nombre de Froude des expériences de la littérature et celui obtenu avec l'Equation 3 pour les conditions géométriques L et D ainsi que les densités et viscosités de chaque expérimentation disponible, pour des valeurs de $\alpha = 0.075 \frac{L}{D}$ et $K = 0.36$.

L'erreur de ce modèle est estimée par l'écart type $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}}$.

Ainsi l'Equation 3 donne une valeur du nombre de Froude à ± 0.0164 contre ± 0.0102 dans le cas de la corrélation d'Epstein qui est une interpolation polynomiale uniquement fonction du rapport $\frac{L}{D}$. Le fait que le paramètre α ait été choisi comme étant une fonction linéaire de $\frac{L}{D}$ ne

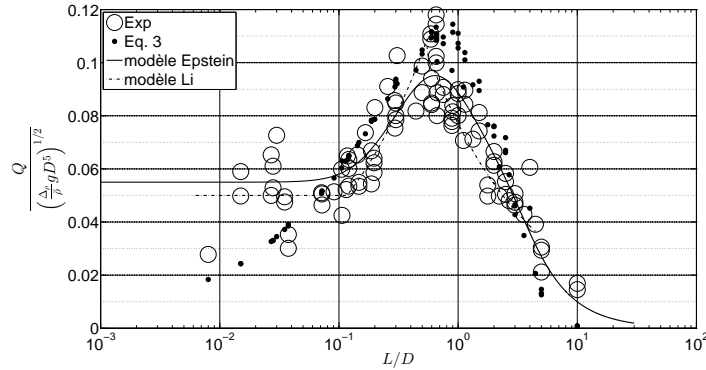


Figure 8: Comparaison du nombre de Froude des points expérimentaux et celui de l'Equation 3 calculée pour les conditions expérimentales correspondantes

permet pas de satisfaire totalement la physique de cet écoulement et notamment pour de faibles valeurs de $\frac{L}{D}$ où la prise en compte de pertes de charges régulières, réduisant considérablement le débit, est inappropriée. Une fonction d'ordre supérieur permettrait de prendre en compte ce phénomène. Néanmoins, la corrélation reproduit de façon satisfaisante l'évolution du nombre de Froude en fonction du rapport $\frac{L}{D}$ sur la gamme $0.08 \leq \frac{L}{D} \leq 18$. Elle offre également une formulation prenant en compte la variation d'autres paramètres physiques que celles proposées dans la littérature.

5. Conclusion

Une étude expérimentale est proposée pour évaluer le débit d'échange lors d'un écoulement de liquides non miscibles en convection naturelle à travers un orifice horizontal circulaire reliant deux compartiments. Cette étude, menée pour un $\Delta\rho$ et un L fixes, propose une mesure directe non intrusive de ce débit par la mesure de la variation de l'interface entre les deux liquides. L'exploitation des vidéos montre que sur la gamme de $\frac{L}{D}$ étudiée, en ne faisant varier que le paramètre D , le débit est estimé par une fonction quadratique du diamètre. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux de la littérature. Le nombre important de points étudiés sur une plage peu fournie permet d'accroître la qualité des observations faites lors des précédentes études. Une proposition de corrélation alternative prenant en compte de façon explicite l'influence des pertes de charge est suggérée.

Références

- [1] W. G. Brown, Natural convection through rectangular openings in partition - Horizontal partitions, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5 (1962) 869-878.
- [2] A. Mercer & H. Thompson, An experimental investigation of some further aspects of the buoyancy driven exchange flow between carbon dioxide and air following a depressurization accident in a magnox reactor, Part I : The exchange flow in inclined ducts & Part II : The purging flow requirements in inclined ducts, *J. Br. Nucl. Enrgy Soc.*, 14 (1975) 327-340.
- [3] M. Epstein, Buoyancy driven exchange flow through small openings in horizontal partitions, *J. of Heat Transfer*, 110 (1988) 885-893.
- [4] Q. Tan & Y. Jaluria, Flow through horizontal vents as related to compartment fire environments, *NIST*. (1992) NIST-GCR-92-607.
- [5] T. A. Conover, R. Kumar, & J. S. Kapat, Buoyant pusating exchange flow through a vent, *J. of Heat Transfer* 117 (1995) 641-648.
- [6] Z. Li, Characteristics of Buoyancy Driven Natural Ventilation through Horizontal Openings, *Aalborg University* (2007) PhD thesis.