

Expérience de pompage par air-lift

F. Ravelet^a

^a *Arts et Metiers ParisTech, DynFluid,*
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
contact: florent.ravelet@ensam.eu

25 novembre 2016

1 Introduction

1.1 Principe

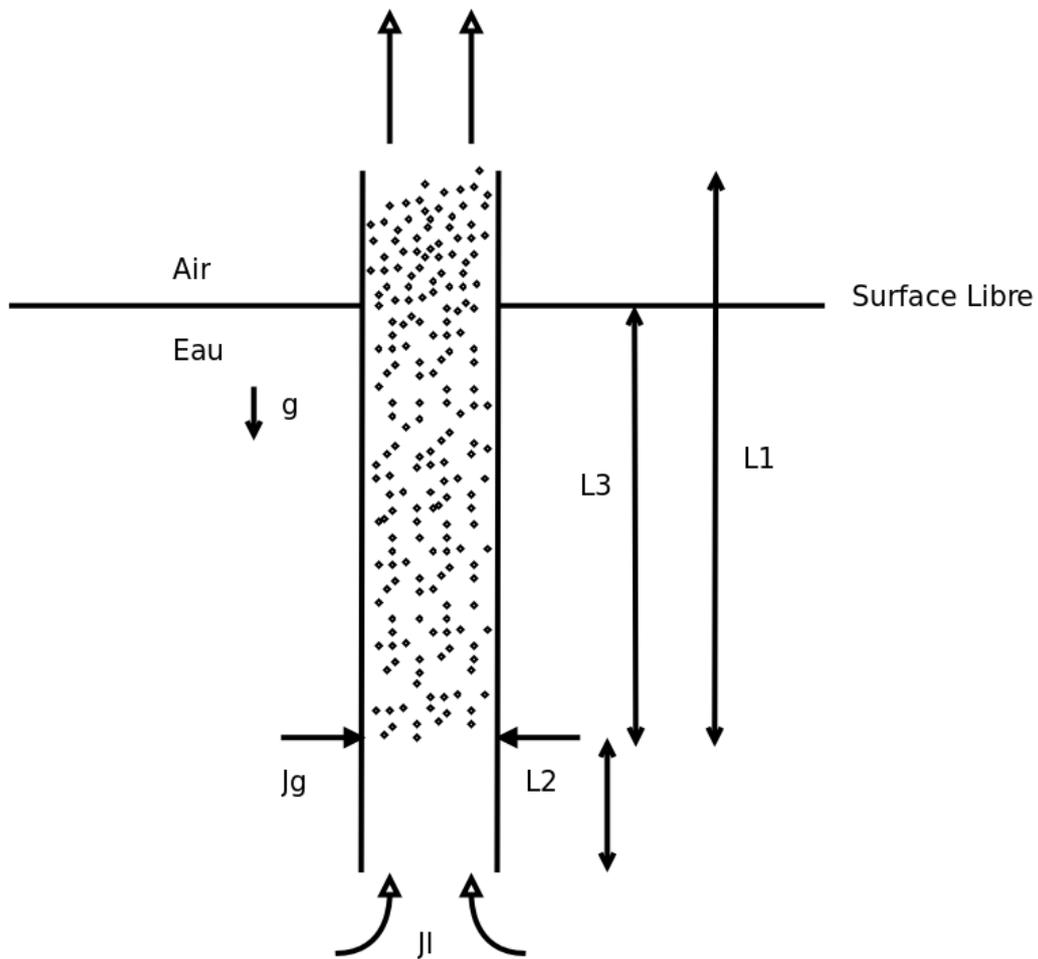


FIGURE 1 – Schéma de principe du pompage par air-lift

Le principe du pompage par air-lift est d'injecter du gaz sous forme de bulles en bas d'une colonne de liquide (voir Fig. 1), afin de pomper ce liquide.

Un compresseur comprime du gaz. Ce gaz est injecté dans le tube de pompage. La colonne de fluide est alors allégée ce qui crée une dépression. La dépression permet le pompage du fluide situé sous le tube de pompage. Ce système est fiable et facilement maintenable, les seules pièces mécaniques étant au niveau de la terre ferme. Toutefois la quantité de gaz à comprimer est importante vis-à-vis de la quantité pompée. De plus, le gaz injecté devra être séparé du fluide pompé. Les applications du pompage par air-lift sont très variées :

- extraction du pétrole ;
- activation de puits géothermiques ;
- pompage d'eaux sales chargées de matière abrasive en suspension ;
- recirculation des boues de clarificateur de stations d'épuration.

1.2 Dispositif expérimental

Le montage sur lequel s'effectue le TP se compose principalement :

- d'un tube de diamètre interne 200 mm, simulant un grand réservoir où l'on va pomper ;
- d'un tube de diamètre interne 40 mm, où l'on injecte l'air ;
- d'un U raccordant ces deux tubes en partie basse ;
- d'un système d'injection d'air par le réseau d'air comprimé, avec un débitmètre à air.

La mesure du débit massique d'air est directe et donne une valeur en kg/h. La mesure du débit d'eau pompée se fait par un débitmètre à diaphragme monté sous l'injection d'air. On crée avec un diaphragme une perte de charge singulière Δp que l'on mesure avec un manomètre différentiel. La loi permettant de convertir cette perte de charge en débit d'eau Q_l est définie dans la norme ISO-5167, et a été ici obtenue par un étalonnage :

$$Q_l = K \pi \frac{d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_l}}$$

Dans notre cas, le diamètre du diaphragme est $d = 25\text{mm}$, et le coefficient K vaut $K = 0.67$.

Une caméra rapide et une plaque d'éclairage à LED permettent de visualiser les régimes d'écoulements obtenus et d'observer le jet se formant en bout de tube.

2 Modélisation

Il est possible de modéliser cet écoulement, en utilisant principalement le bilan de quantité de mouvement projetée sur l'axe de la conduite. Un modèle proposé est celui de Yoshinaga & Sato (1996). Il a été validé par d'autres auteurs sur des expériences différentes (Kassab *et al.*, 2007).

2.1 Description du modèle

Paramètres physiques

Les paramètres physiques sont :

- g l'accélération de la pesanteur ;
- μ_l la viscosité dynamique du liquide ;
- ρ_l sa densité ;
- μ_g la viscosité dynamique du gaz ;
- ρ_g sa densité.

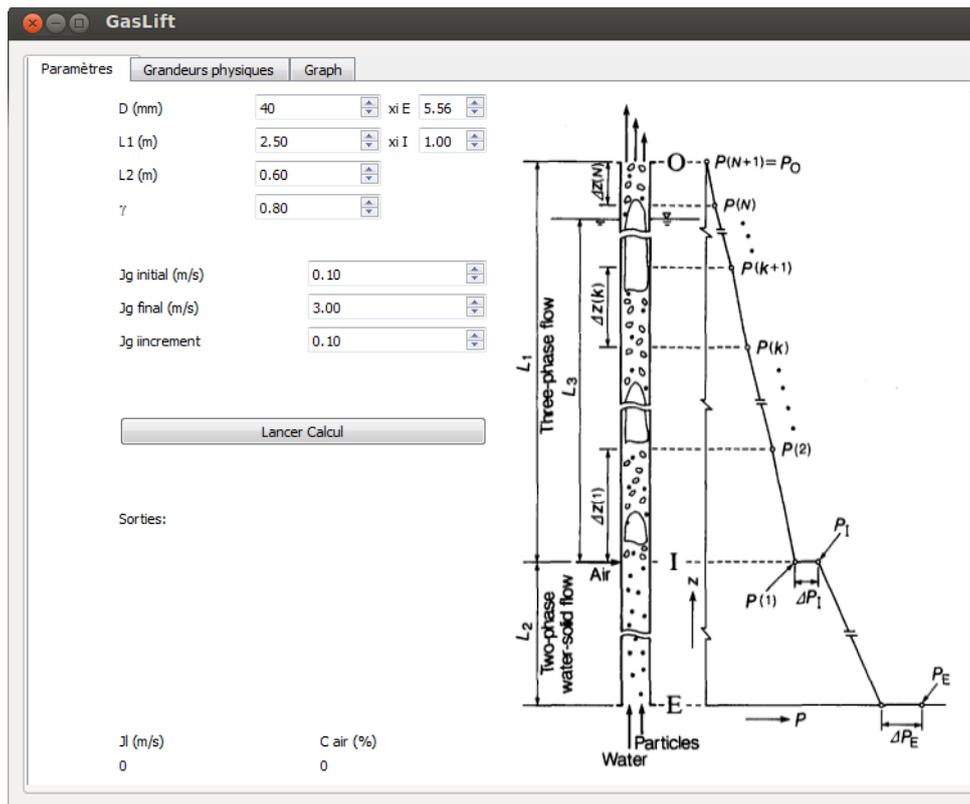


FIGURE 2 – Premier onglet du logiciel.

Paramètres géométriques

Les paramètres géométriques sont (voir Fig. 2) :

- D le diamètre du tube ;
- L_1 la longueur du tube au dessus de l'injection d'air ;
- L_2 la longueur du tube en dessous de l'injection d'air ;
- L_3 la hauteur de la colonne d'eau à l'extérieur du tube, au dessus de l'injection d'air. On définit un rapport de submersion $\gamma = L_3/L_1$.

Paramètres de contrôle

Le seul paramètre de contrôle est le débit volumique d'air Q_g , utilisé sous forme de vitesse superficielle J_g dans les équations (si A est la section du tube de diamètre $D = 40\text{mm}$, $J_g = Q_g/A$).

Paramètres d'ordre

On s'intéresse à la prédiction du débit d'eau pompée Q_l , ou à la vitesse superficielle $J_l = Q_l/A$. On note également :

- α_g la fraction volumique d'air dans le tube ;
- α_l la fraction volumique d'eau dans le tube ;
- $U_{l,O}$ la vitesse moyenne de la phase liquide en sortie de tube ;
- $U_{g,O}$ la vitesse moyenne de la phase gazeuse en sortie de tube ;

On a les relations immédiates :

$$\begin{aligned}\alpha_l &= 1 - \alpha_g \\ U_{l,O} &= \frac{J_l}{\alpha_l} \\ U_{g,O} &= \frac{J_g}{\alpha_g}\end{aligned}$$

Bilan de quantité de mouvement

La variation de quantité de mouvement dans un volume de contrôle est égale à la somme (vectorielle) des forces agissant sur celui-ci. On peut aussi appeler cela « Principe Fondamental de la Dynamique », « Théorème des quantités de mouvement »...

Ici, on va projeter ce bilan sur l'axe de la conduite, et effectuer le bilan sur tout le tube de montée. On doit tenir compte :

- du flux de quantité de mouvement entrant par le bas du tube ;
- du flux de quantité de mouvement sortant par le haut du tube ;
- du poids de la colonne de fluide dans le tube ;
- des forces de pression à l'entrée et à la sortie du tube ;
- des contraintes de frictions en paroi, que l'on note $\tau_{w,mono}$ et $\tau_{w,diph}$, pour les parties monophasiques et diphasiques ;
- d'éventuelles pertes de charges singulières à l'entrée, au diaphragme servant à la mesure de débit liquide et au niveau de l'injection d'air ΔP_{sing} .

Le modèle intégré le long de la conduite peut s'écrire :

$$(\rho_l J_l U_{l,O} + \rho_g J_g U_{g,O}) - \rho_l J_l^2 = \quad (1)$$

$$- (4\tau_{w,mono} L_2 / D) \quad (2)$$

$$- (4\tau_{w,diph} L_1 / D) \quad (3)$$

$$- \Delta P_{sing} \quad (4)$$

$$- (\rho_l \alpha_l + \rho_g \alpha_g) g L_1 - \rho_l g L_2 \quad (5)$$

$$+ (p_a + \rho_l g (L_3 + L_2)) - p_a \quad (6)$$

Modélisation

Les pertes de charges régulières dans la partie monophasique sont modélisées avec un coefficient de frottement qui suit la corrélation de Blasius :

$$4\tau_{w,mono} = 0.316 Re_l^{-0.25} \frac{1}{2} \rho_l J_l^2$$

avec $Re_l = J_l D \rho_l / \mu_l$ le nombre de Reynolds basé sur la vitesse superficielle du liquide.

Les pertes de charges singulières sont modélisées avec un coefficient de perte singulière ξ_i pour l'injection et ξ_e pour l'entrée et le diaphragme.

Pour les pertes de charges régulières dans la partie la partie diphasique, l'équation de Chisholm & Laird (1958) est employée :

$$\tau_{w,diph} = \tau_{w,mono} \left(1 + \frac{21}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \right)$$

avec

$$\chi = \sqrt{\frac{\tau_{w,mono,gaz}}{\tau_{w,mono}}}$$

et

$$4\tau_{w,mono,gaz} = 0.316 Re_g^{-0.25} \frac{1}{2} \rho_g J_g^2$$

Pour la fraction volumique α , on utilisera une corrélation semi-empirique. Yoshinaga & Sato (1996) proposent celle de Smith (1969). Cette équation est aussi utilisée par Fujimoto *et al.* (2003).

$$\alpha = \left[1 + 0.4 \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) + 0.6 \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \left\{ \frac{\frac{\rho_l}{\rho_g} + 0.4 \left(\frac{1}{x} - 1 \right)}{1 + 0.4 \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \right\}^{0.5} \right]^{-1}$$

avec

$$x = \frac{\rho_g J_g}{\rho_g J_g + \rho_l J_l}$$

2.2 Implementation

Le système d'équation à résoudre a été implémenté en C++ avec une méthode de Newton itérative issue des Numerical Recipes pour résoudre le système non-linéaire. Une interface graphique —Graphical User Interface (gui)— a été réalisée avec QtCreator. Le premier onglet du logiciel est présenté en Fig. 2.

Dans cet onglet, on définit les paramètres géométriques. Ici :

- $D = 40\text{mm}$;
- $L_1 = 2.5\text{m}$;
- $L_2 = 0.6\text{m}$. la longueur du tube en dessous de l'injection d'air ;
- le rapport de submersion $\gamma = L_3/L_1$ qui dépend du remplissage initial de l'expérience.

En cliquant sur le bouton « Lancer Calcul », on calcule les résultats du modèle pour une boucle définie par les bornes inférieures (« Jg initial ») et supérieures (« Jg final ») , et l'incrément (« Jg iincrement ») des vitesses superficielles de gaz.

Le deuxième onglet (Fig. 3) contient les valeurs des paramètres physiques.

Le troisième onglet présente les résultats (Fig. 4). En cliquant sur le bouton « Plot », on trace J_l en fonction de J_g pour les points calculés. En cliquant sur « Save », les données courantes sont exportées dans un fichier texte, contenant :

- un header

Jg, Jl, ulo, ugo, el, eg

- les valeurs de J_g , J_l , $u_{l,O}$, $u_{g,O}$, ϵ_l et ϵ_g séparées par des tabulations.

Ce fichier peut facilement être ouvert par n'importe quel logiciel de traitement de données numériques, ou bien encore par un tableur d'une suite bureautique.

Seules les 2 premières colonnes sont utilisées dans le travail demandé.

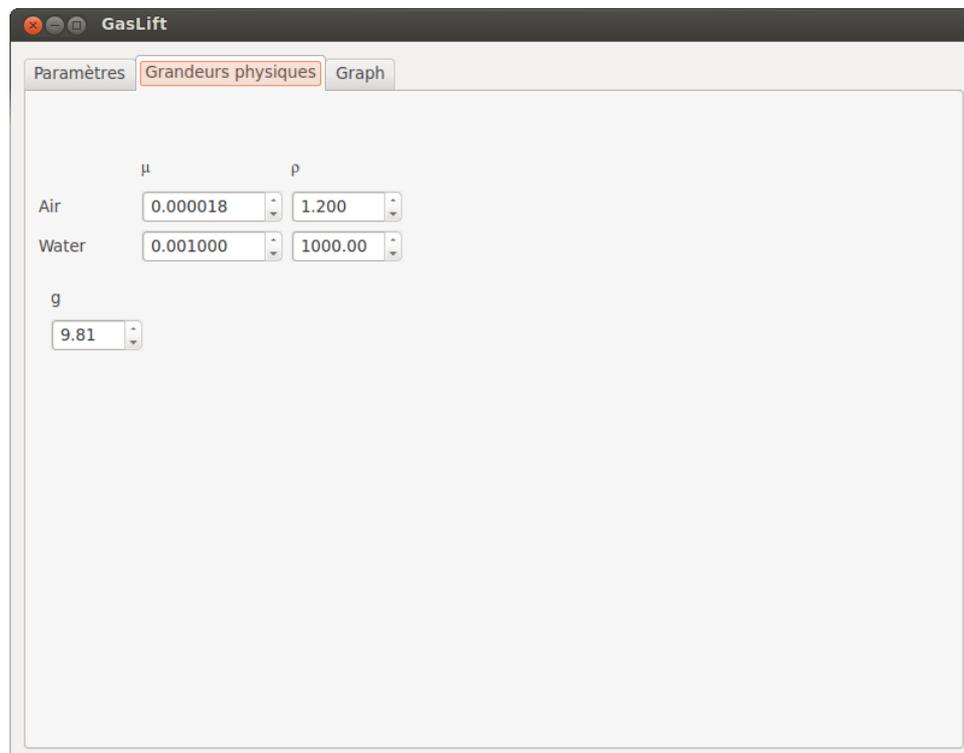


FIGURE 3 – Deuxième onglet du logiciel.

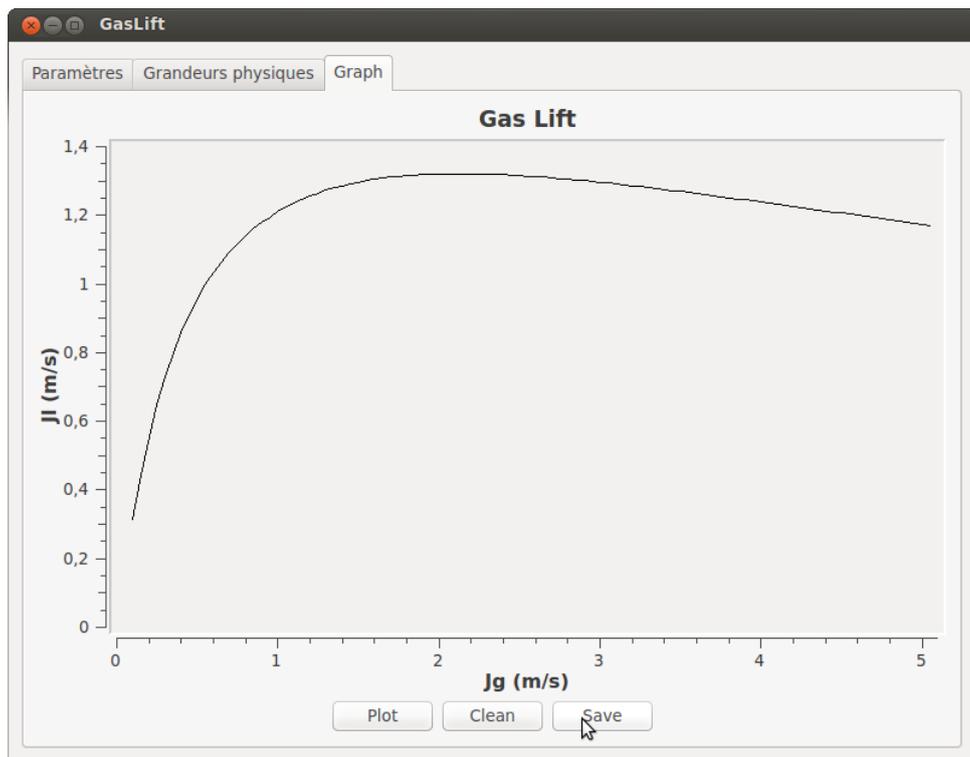


FIGURE 4 – Troisième onglet du logiciel.

3 Travail à effectuer

3.1 Travail préparatoire avant la séance de TP

1. Etudier et comprendre le modèle ;
2. Cela passe par l'identification des différents termes des équations 1 à 6.

Il vous sera demandé dans le rapport (en binôme) de :

- restituer le principe général de fonctionnement de l'air-lift ;
- donner la signification physique des différents termes du modèle (équations 1 à 6) ;
- justifier les expressions de ces termes.

3.2 Acquisition de mesures sur l'expérience

Pour différentes valeurs du rapport de submersion (une par groupe) :

1. On relèvera le Δp au diaphragme en fonction du débit d'air injecté.
2. On pourra aussi faire quelques visualisations avec la caméra rapide.

3.3 Analyse en salle informatique

1. Faire tourner le logiciel de calcul¹ pour différents rapports de submersion L_3/L_1 .
2. Dépouiller les données mesurées. Tracer les courbes J_l en fonction de J_g .
3. La figure 5 présente une carte des régimes établie selon la méthode de Taitel & Duckler, pour un tuyau de diamètre 40 mm. On pourra y représenter les points mesurés.
4. Confronter les résultats de l'expérience au modèle.

Un rapport de synthèse en format pdf est à remettre une semaine après le TP par courriel à florent.ravelet@ensam.eu . Bon courage !

1. téléchargeable à l'adresse http://florent.ravelet.free.fr/ge3mp/GasLift_Windobe_2.16.zip

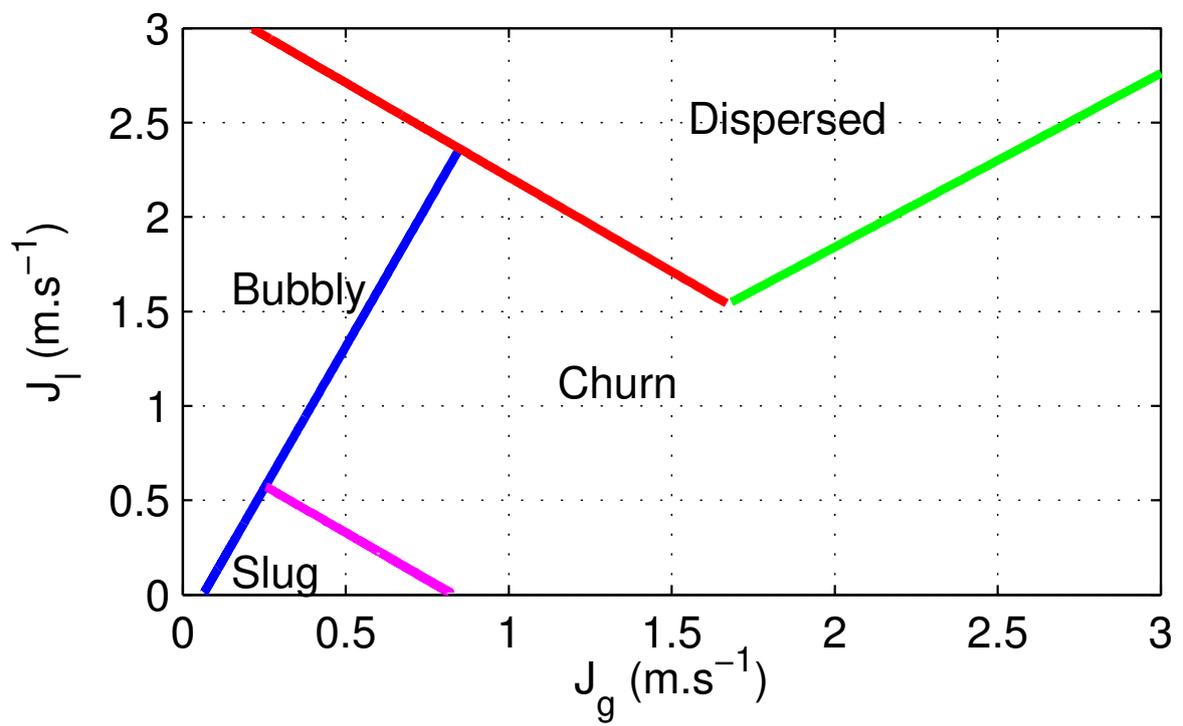


FIGURE 5 – Carte établie pour air / eau $D = 63$ mm, $z_{obs} = 2.5$ m

Références

- CHISHOLM, D. & LAIRD, A. D. K. (1958). *Two-phase flow in rough tubes*. Trans. ASME, **80**, 276.
- FUJIMOTO, H., OGAWA, S., TAKUDA, H. & HATTA, N. (2003). *Operation of a small air-lift pump for conveying solid particles*. J. Energy Resources Technology, **125**, 17.
- KASSAB, S. Z., KANDIL, H. A., WARDA, H. A. & AHMED, W. H. (2007). *Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow*. Chem. Eng. J, **131**, 273.
- SMITH, S. L. (1969). *Void fractions in two-phase flow : a correlation based upon an equal velocity head model*. Proc. Inst. Mech. Engs, **184**, 647.
- YOSHINAGA, T. & SATO, Y. (1996). *Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles*. Int. J. Multiphase FLOW, **22**, 223.