



# Etude expérimentale du transport hydraulique de grandes particules en conduite horizontale et en forme de S

F. Ravelet<sup>a</sup>, A. Lemaire<sup>a</sup>, F. Bakir<sup>a</sup>

a. Arts et Metiers ParisTech, DynFLuid, 151 bld de l'hôpital, 75013 PARIS

## Résumé :

*Nous étudions les pertes de charges et les régimes d'écoulement pour des sphères grandes devant le diamètre de la conduite (5, 10 et 15%), par mesures de pression et visualisations. Deux densités sont utilisées. La perte de charge est plus faible pour les grandes tailles de grains, et la densité a un effet fort sur le point de transition entre écoulement à lit stationnaire et dispersé. Des modèles basés sur le nombre de Froude sont testés. Nous étudions enfin des mélanges de taille et/ou de densité. Nous nous intéressons également aux transitoires de bouchage et débouchage.*

## Abstract :

*We study the pressure drop and flow regimes for large spheres with respect to the diameter of the pipe (5, 10 and 15%) by differential pressure measurements and visualizations. Two densities are used. The losses are smaller for large grain sizes, and density has a strong effect on the transition point between regimes with a stationary bed flow and dispersed flows. Models based on the Froude number are tested. Finally, we study mixtures of size and / or density. We are also interested in plugging and unplugging transients.*

**Mots clefs :** transport solide ; conduite horizontale ; pertes de charge

## 1 Introduction

Le transport hydraulique de particules solides est un procédé largement utilisé dans les industries chimiques et minières. De nombreux modèles prédictifs existent dans le cas de suspensions, c'est-à-dire lorsque le diamètre des particules est petit devant le diamètre du tuyau [1, 9]. Il est alors possible de prédire les pertes de charges en conduite horizontale ou verticale. Ces dernières années, la forte augmentation de la demande en matières premières rend intéressante l'exploitation de nouvelles ressources, en particulier l'exploitation de champs situés au fond des océans [6]. Dans ce cas, il s'agit de transporter des solides de taille grande devant le diamètre du tuyau, dans un circuit de forme complexe, incluant des parties verticales, horizontales, et éventuellement des coudes et des formes en S. Pour le transport en conduite verticale, il existe des modèles prédictifs basés sur les travaux de Newitt et al. [5] et Richardson et al. [7]. Nous avons vérifié la validité de ce modèle sur un ensemble de données expérimentales [10, 8, 4]. En revanche, dans le cas horizontal, et a fortiori dans des géométries en S, les modèles sont peu nombreux [1, 9, 2, 3] et les effets de la densité et de la taille des particules n'ont pas toujours été explorés. L'une des difficultés majeures dans le cas du transport de grande particules et de densité élevée provient de la grande richesse des régimes d'écoulement : lorsque la vitesse de transport augmente, on passe ainsi de régimes à lit stationnaire à des régimes à lit mouvant, puis à des suspensions hétérogènes et à des suspensions pseudo-homogènes.

## 2 Dispositif expérimental

### 2.1 Description du banc d'essai

La boucle d'essai est schématisée en Fig. 1. Elle est constituée d'un premier tuyau horizontal rigide et transparent, de diamètre 100 mm et de longueur 10 m dans lequel circule le mélange liquide/solide. Le retour s'effectue dans un tuyau flexible en PVC transparent armé d'une spire acier, de diamètre

intérieur 100 mm et de longueur totale 20 m. Ce tuyau effectue une première courbe horizontale à 180° de diamètre 1,7 m, puis une montée, une descente et une remontée dans un plan vertical. Le mélange

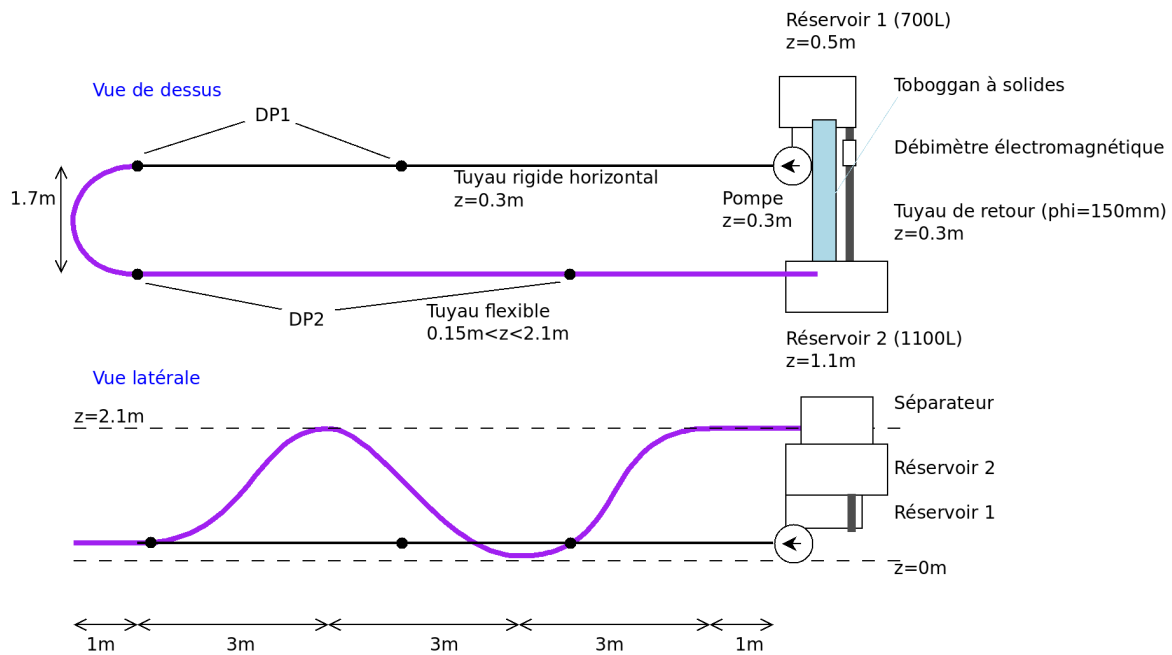








FIGURE 1 – Schéma du banc d'essai. Vue de dessus et vue latérale.

arrive alors dans un séparateur constitué d'un caisson muni d'une trappe latérale dont le fond est une grille en inox. L'eau tombe alors dans le réservoir 2, et les solides s'écoulent dans un toboggan à 45° muni à son extrémité d'une trappe réglable. L'eau rejoint par un tuyau muni d'un débitmètre le réservoir 1 qui contient un bac en grille de capacité connu, connecté à la sortie du réservoir dans lequel le mélange est aspiré par une pompe à effet vortex (Ensival-Moret MT 100-100-250) et refoulé dans le circuit.

## 2.2 Solides utilisés

Type	Billes de verre	Billes d'alumine	Mélange n°1 alumine	Mélange n°2 alumine	Mélange n°3 alumine/verre	Solides réels
Tailles	5 mm 10 mm 16 mm	6 mm 15 mm	50% 6 mm 50% 15 mm $D_{50} = 10,5$ mm	75% 6 mm 25% 15 mm $D_{50} = 8,25$ mm	50% 6 mm alumine 50% 5 mm verre $D_{50} = 5,5$ mm	8 à 18 mm $D_{50} = 10$ mm
Densité	2500 kg/m <sup>3</sup>	3650 kg/m <sup>3</sup>	3650 kg/m <sup>3</sup>	3650 kg/m <sup>3</sup>	3075 kg/m <sup>3</sup>	2700 kg/m <sup>3</sup>
						

Nous avons utilisé divers solides, billes sphériques et solides réels. Deux densités ont été testées, ainsi que trois tailles représentant 5, 10 et 15% du diamètre du tuyau (voir tableau ci-dessus).

## 2.3 Paramètres de contrôle et grandeurs mesurées

Pour un type de solides donnés, nous mesurons les pertes de charge dans la partie horizontale et dans la partie en S pour différentes concentrations et à différentes vitesses. Les paramètres de contrôle naturels sont :  $Q_l$ , le débit volumique du liquide (eau), et  $Q_s$ , le débit volumique de solides. Nous introduisons alors la vitesse de mélange  $V_{mix}$  et la concentration de transport ou concentration

délivrée  $C$ , telles que :

$$V_{mix} = \frac{Q_l + Q_s}{A} \text{ et } C = \frac{Q_s}{Q_s + Q_l}$$

avec  $A$  la section du tuyau. D'une part les solides ne s'écoulent pas à la même vitesse que l'eau, et d'autre part il est possible d'avoir des régimes où un lit stationnaire de solides se forme [2, 3]. Il est donc important de bien distinguer la concentration de transport de la concentration locale *in-situ*  $\epsilon_s$  qui, elle, représente le rapport de l'aire occupée par les solides à la section du tuyau. L'objectif est de réaliser des mesures en variant  $V_{mix}$  entre 0 et  $5\text{m.s}^{-1}$ , pour des concentrations de transport constantes de 5, 10, 15 et 20%.

Le débit d'eau est mesuré à l'aide d'un débitmètre électromagnétique (KROHNE Optiflux 2000) et ajusté grâce au variateur de la pompe. Le débit de solides est réglé par l'intermédiaire d'une trappe et est mesuré par remplissage d'une zone tampon de capacité connue située dans le réservoir 1. Nous mesurons enfin la perte de charge au moyen de deux capteurs de pression différentiel (VEGADIF65) : une première mesure en fin de ligne droite, 60 diamètres après la pompe, et une seconde au niveau du flexible en S (voir la position des prises de pressions en Fig. 1). Les données sont enregistrées pendant 30s à une fréquence de 130Hz. La mesure du taux de fluctuation du débit et des pressions est utilisée comme critère de validation des mesures. Les pertes sont exprimées en gradients hydrauliques (mètres de colonne d'eau par mètre de tuyau) :

$$I(m/m) = \frac{\Delta P}{\rho_l g L}$$

Nous effectuons également des prises de vue au moyen d'une caméra rapide (Optronis CamRecord600), avec typiquement 3200 images par séquence à une résolution de  $1280 \times 1024$  pixels et à une cadence de 200Hz.

### 3 Résultats

La Fig. 2 montre une évolution typique du gradient hydraulique en fonction de la vitesse de mélange dans les parties horizontales et en S, pour des billes de verre de 5mm, à une concentration de transport de 5%. La perte de charge est tout d'abord significativement plus élevée que dans le cas sans solides pour toutes les vitesses. Les courbes ne sont de plus pas monotones : il existe un minimum auquel on associe une vitesse critique, ici pour la partie horizontale  $V_{crit} \simeq 1.8\text{m.s}^{-1}$ . Pour  $V_{mix} < V_{crit}$ , on observe des régimes avec un lit stationnaire au dessus duquel se trouve un lit de grains en mouvement : on a donc  $\epsilon \gg C$  et une perte de charge très importante. Dans le cas du tuyau incliné on observe même un lit s'écoulant à contre-courant en partie inférieure. L'écoulement est très instable dans ce domaine, et les temps d'établissement d'un régime stationnaire sont longs, de l'ordre de la vingtaine de minutes. Il existe une vitesse minimale en deçà de laquelle le système se bouche. Cette vitesse est de l'ordre de la vitesse terminale d'une particule, soit dans les conditions de la Fig. 2,  $V_{min} > 0.6\text{m.s}^{-1}$ . Autour de la vitesse critique, on observe un lit mouvant avec  $\epsilon > C$ . Lorsque la vitesse augmente encore, les billes sont maintenues en suspension, et les courbes de pertes de charges suivent la tendance de la courbe en eau claire. Dans le cas de la Fig. 2, les courbes pour la partie en S et la partie horizontale diffèrent peu mais ceci ne sera plus vrai pour des densités ou des concentrations plus élevées (voir Fig. 3b-c). Enfin, on remarque que les pertes en horizontal et en S sont très nettement inférieures à celles en vertical (modèle développé à partir de [5, 7]) qui sont dominées par la partie hydrostatique absente en horizontal, mais que leurs vitesses critiques sont supérieures à la vitesse critique en écoulement vertical.

Les effets de  $C$ , de la taille des billes et de leur densité sont présentés en Fig. 3 (cas de référence alumine 6mm,  $C = 5\%$ ). L'accroissement de  $C$  augmente la perte de charge tandis que  $V_{crit}$  semble augmenter très faiblement, voire décroître pour  $C = 20\%$  (Fig. 3a). Les effets de taille sont différents entre partie horizontale et en S (Fig. 3b). En partie horizontale, l'augmentation de taille diminue les pertes de charge ainsi que la vitesse critique, tandis qu'aucun effet notable n'est observé en S. Enfin (Fig. 3c), la densité augmente drastiquement les pertes de charge et les vitesses critiques.

Les résultats pour des distributions de densité et de tailles de particules sont présentés en Fig. 4. Pour une même densité et deux tailles dans un rapport de 50/50 (mélange n°1), la courbe de perte

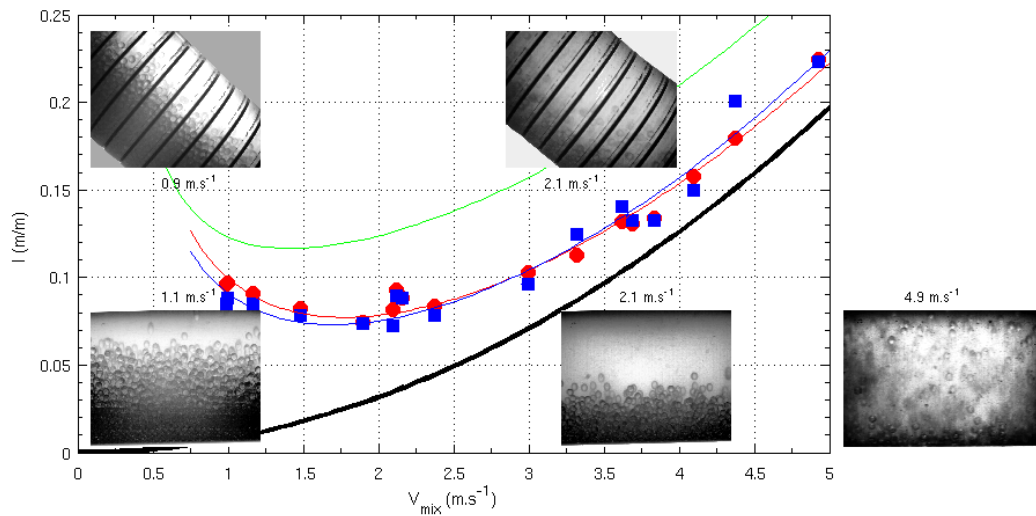


FIGURE 2 – Gradient hydraulique fonction de la vitesse de mélange et illustration des différents régimes, billes de verre de 5mm,  $C = 5\%$ . Courbe noire : mesures en eau, ronds rouges : partie horizontale, carrés bleus : partie en S, première remontée. Les lignes bleues et rouges sont des fits de confort en  $a/V_{mix} + bV_{mix}^2$ . La ligne verte correspond au modèle développé pour un écoulement vertical.

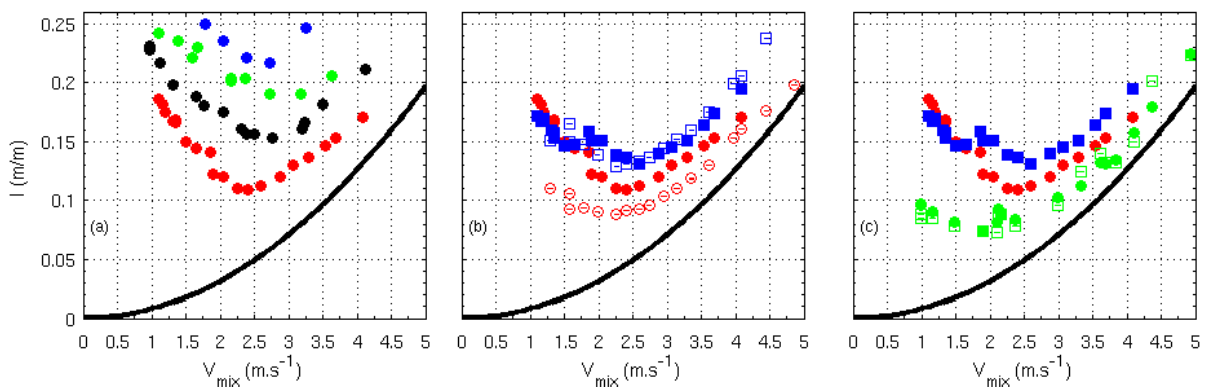


FIGURE 3 – (a) Effets de la concentration, alumine 6mm, ronds rouges :  $C = 5\%$ , noirs :  $C = 10\%$ , verts :  $C = 15\%$  et bleus :  $C = 20\%$ . (b) Effets de la taille,  $C = 5\%$ . Alumine 6mm, ronds pleins : horizontal, carrés pleins : partie en S. Alumine 15mm, ronds ouverts : horizontal, carrés ouverts : partie en S. (c) Effets de la densité,  $C = 5\%$ . Alumine 6mm, ronds rouges : horizontal et carrés bleus : partie en S. Verre 5mm, ronds verts : horizontal et carrés verts : partie en S.

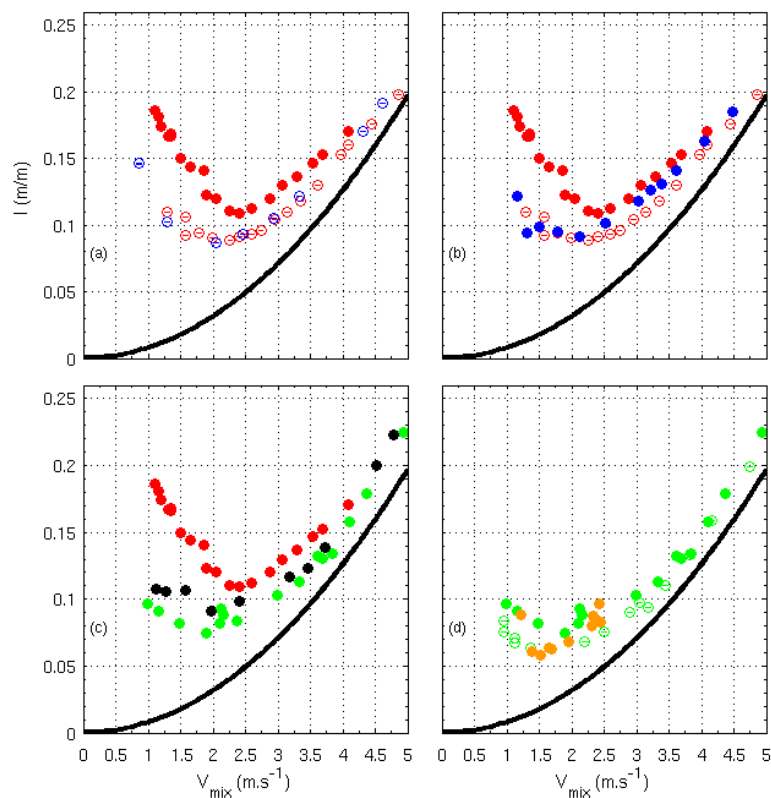


FIGURE 4 – Gradient hydraulique fonction de la vitesse de mélange, en horizontal,  $C = 5\%$ . (a) ronds rouges fermés : alumine 6mm, ronds rouges ouverts : alumine 15mm et ronds bleus ouverts : mélange n°1. (b) ronds bleus fermés : mélange n°2. (c) ronds verts fermés : verre 5mm et ronds noirs fermés : mélange n°3. (d) ronds verts ouverts : verre 10 mm et ronds oranges fermés : solides.

de charge est confondue avec celle, plus faible, des billes de plus grande taille (Fig. 4a). Cet effet se fait encore sentir pour un rapport 75/25 en petites (mélange n°2), mais uniquement dans la partie de la courbe avec lit stationnaire  $V_{mix} < V_{crit}$ , la courbe pour  $V_{mix} > V_{crit}$  étant intermédiaire entre les deux tailles (Fig. 4b). Dans le cas d'un mélange de densité (n°3), l'utilisation d'une densité moyenne fourni de bons résultats (Fig. 4c). Enfin, pour de vrais solides (Fig. 4d), on remarque que la courbe de perte est très proche de celle correspondant à la taille moyenne des solides.

Les effets observés pour les mélanges, en particulier dans la partie horizontale peuvent être liés à des phénomènes de ségrégation. Ceci est illustré en Fig. 5. Dans le cas du mélange de taille, nous observons bien une tendance à avoir au fond du tuyau un lit de petites billes avec les grosses billes au dessus, effet qui rappelle "l'effet noix du Brésil". Pour le mélange de densité, nous observons que les billes d'alumine ont tendance à se retrouver au fond.

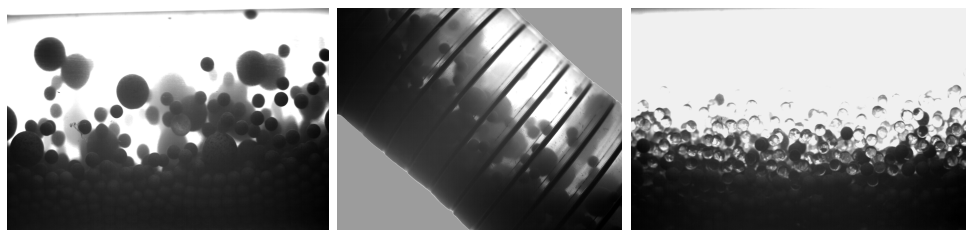


FIGURE 5 – Illustrations de la ségrégation pour les mélanges n°1 en horizontal et dans la première remontée de la partie en S, et pour le mélange n°3. Dans chaque cas,  $C = 5\%$  et  $V_{mix} \simeq 1\text{m.s}^{-1}$ .

## 4 Conclusions

Nous avons donc mesuré les pertes de charge en fonction de la vitesse de mélange pour des billes calibrées de taille et de densité différentes, ainsi que pour des mélanges, dans une conduite horizontale et dans une conduite coudée en forme de S. Plusieurs conclusions partielles peuvent être tirées :

- Les pertes de charge en écoulement horizontal et en S sont inférieures aux pertes en écoulement vertical, pour un même triptyque taille/densité/concentration. En revanche les vitesses critiques sont supérieures.
- A densité et concentration identiques, les pertes de charges en écoulement horizontal décroissent avec la taille des particules, contrairement au cas de l'écoulement vertical.
- A faible vitesse, de forts effets de ségrégation sont observés et peuvent compliquer la modélisation des mélanges de plusieurs tailles de billes.

Il nous faut maintenant nous pencher sur la modélisation de cette base de données expérimentale conséquente. Dans le cas des suspensions, on trouve tout d'abord des modèles empiriques basés sur l'analyse dimensionnelle et l'introduction d'un nombre de Froude [1, 9]. Ce type de modèle conduit à une équation en  $a/V_{mix} + bV_{mix}^2$  qui a l'air de bien décrire nos données (voir Fig. 2). Toutefois, ce type de modèle ne fait pas apparaître explicitement la taille des particules, et suppose une constante qui a été ajustée souvent pour la seule densité du sable. Il est de plus parfois difficile de comprendre si la concentration qui intervient est  $C$  ou  $\epsilon_s$ . Nous ne disposons que de deux densités différentes, et de deux tailles exploitables pour chaque densité, ce qui est trop juste pour inférer la dépendance de cette constante.

Il existe d'autres classes de modèles plus physiques, proposés en particulier par Doron et al. [2, 3], que nous allons implémenter et confronter à nos données (ces modèles ont été validés pour les mêmes rapport taille de bille sur taille du tuyau, mais uniquement pour une densité de  $1240\text{kg.m}^{-3}$ ).

L'exploitation des prises de vues nous permettra d'étudier l'évolution de la concentration *in-situ* en fonction de la concentration de transport et de la vitesse, ce qui est un paramètre clé pour une bonne modélisation. Nous poursuivons l'étude en nous focalisant sur les parties inclinées que nous allons étudier plus localement au moyen de capteurs plus nombreux et plus sensibles. Cette base de données permettra de valider des méthodes de simulation numérique par pénalisation en cours de développement au laboratoire.

Nous remercions l'entreprise Technip pour son support financier, en particulier J. Denègre, P. Espinasse et T. Parenteau. Nous remercions enfin M. Joulin du laboratoire DynFluid d'Arts et Metiers ParisTech, ainsi que les élèves J.-R. De Cèa et C. Valet pour leur contribution à la construction et mise au point du dispositif expérimental.

## Références

- [1] Baha Abulnaga P.E. 2002 Slurry Systems Handbook, McGraw-Hill.
- [2] Doron P., Granica D., Barnea D. 1987 Slurry Flow in Horizontal Pipes - Experimental and Modeling. *Int. J. Multiphase Flow.* **13** 535-547
- [3] Doron P., Simkhis M., Barnea D. 1997 Flow of Solid-Liquid Mixtures in Inclined Pipes. *Int. J. Multiphase Flow.* **23** 313-323
- [4] Engelmann H.E. 1978 Vertical hydraulic lifting of large-size particles - a contribution to marine mining. *10th Off. Tech. Conf.* 731-740
- [5] Newitt D.M., Richardson J.F., Gliddon B.J. 1961 Hydraulic Conveying of Solids in Vertical Pipes. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* **39** 93-100
- [6] Pougatch K. , Salcudean M. 2008 Numerical modelling of deep sea air-lift. *Ocean Eng.* **35** 1173-1182
- [7] Richardson J.F., Zaki W.N. 1957 Sedimentation and fluidisation. *Trans. Inst. Chem. Engrs.* **32** 35-53
- [8] Weisheng Z. China's study on the lift system in deep ocean mining. 2007 *Hydrotransport.* **17**
- [9] Wilson K.C., Addie G.R., Sellgren A., Clift R. 2006 Slurry Transport Using Centrifugal Pumps, 3rd edition, Springer.
- [10] Xia J.X., Ni J.R., Mendoza C. 2004 Hydraulic lifting of manganese nodules through a riser. *J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering.* **126** 72