

# Caractérisation hydrodynamique d'une interface liquide-liquide sous agitation gazeuse dans les procédés sidérurgiques

N. JOUBERT<sup>a, b</sup>, P. GARDIN<sup>a</sup>, S. ZALESKI<sup>b</sup>, S. POPINET<sup>b</sup>

a. ArcelorMittal Maizières Research, BP 30320, Voie Romaine, 57283  
Maizières-lès-Metz Cedex, France

b. Sorbonne Université, CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert,  
BP 162, 4, Place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

## Résumé :

*Le transfert de masse entre l'acier et le laitier est un paramètre important lors du traitement secondaire de l'acier liquide pour prévoir la vitesse des réactions chimiques, ainsi que la composition des phases en présence. Nous souhaitons étudier ce phénomène dans le cas où la mise en mouvement des fluides présents dans la cuve résulte de l'injection d'argon dans la partie inférieure du réacteur. Pour caractériser l'hydrodynamique de l'écoulement multiphasique dans cette étude, nous utilisons les résultats provenant d'images obtenues sur une maquette hydraulique à température ambiante avec de l'eau, de l'huile et de l'air. Nous avons aussi réalisé une simulation numérique de la maquette hydraulique avec le code Basilisk pour pouvoir étudier le comportement global de l'écoulement.*

## Abstract :

*Mass transfer between liquid steel and slag is an important point during secondary metallurgy for prediction of the chemical reaction rate and for adjustment of liquid steel composition. We want to study this phenomenon in the case of an argon gas bottom blown reactor. In this study we used image acquisition from a hydraulic model with water, oil and air at ambient temperature in order to characterize the hydrodynamics of the multiphase flow. We have also made a numerical simulation of the hydraulic model with the Basilisk code to be able to study the global behavior of the flow.*

**Mots clefs : Ecoulement multiphasique, hydrodynamique, simulation numérique**

## 1 Introduction

Pendant la phase de métallurgie secondaire, l'ajustement de la composition de l'acier liquide dans une cuve met en jeu diverses réactions chimiques entre l'acier liquide et le laitier qui, est un coproduit de l'acier permettant la mise en place de ces réactions [1].

Le procédé qui nous intéresse ici est la désulfuration de l'acier liquide au contact du laitier sous agitation gazeuse d'argon. Compte tenu des propriétés physiques des fluides, on peut déterminer le nombre de Schmidt mesurant le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement et la diffusivité massique donné par :

$$Sc_{a,S} = \nu_a / D_{a,S}$$

où  $\nu_a$  est la viscosité cinématique de l'acier et  $D_{a,S}$  le coefficient de diffusion du soufre dans l'acier. Le nombre de Schmidt est de l'ordre de  $10^4$  dans le procédé d'intérêt, or plus le Sc est grand, plus l'épaisseur de la couche limite de diffusion devient faible.

Dans le but d'évaluer le transfert de masse dans cette configuration, nous devons faire face aux difficultés suivantes :

- Il est difficile d'effectuer des mesures sur la configuration industrielle du fait des conditions expérimentales contraignantes ;
- La résolution numérique directe de ce transfert de masse n'est pas réalisable à cause de la trop faible épaisseur de la couche limite de diffusion pour la concentration de l'espèce chimique transportée qui est de l'ordre de  $10 \mu\text{m}$  pour une goutte d'huile de 1cm de diamètre ;
- Il n'existe pas de modèles analytiques pour prédire le transfert de masse dans cette configuration.

Diverses expériences réalisées dans des maquettes à basse [1, 2] et haute température [3] ont permis de mettre en évidence des inflexions dans la courbe du transfert de masse entre les deux phases en fonction du débit de gaz injecté. La principale explication donnée à ces inflexions est la déformation de la couche de laitier en ligaments qui se fragmentent ensuite en gouttes dans l'acier liquide, augmentant ainsi la surface d'échange entre les deux phases.

De manière à vérifier cette hypothèse dans la configuration de la maquette hydraulique, nous allons présenter les résultats de certaines caractéristiques hydrodynamiques obtenues de manière expérimentale et numérique.

## 2 Modèle

### 2.1 Description du phénomène physique

Dans le centre de la cuve au niveau de l'interface on trouve une zone fortement agitée où les bulles contenues dans le panache rejoignent le gaz ambiant, provoquant une surélévation du niveau de l'eau. Cette zone s'appelle zone d'échappement ou « spout » en anglais. Selon les valeurs du débit de gaz injecté et l'épaisseur de couche de laitier, le « spout » peut être entièrement couvert de laitier ou entièrement découvert. Lorsque le « spout » n'est plus recouvert de laitier, on parle alors de formation d'œil ou « eye » en anglais. La totalité de la zone non recouverte de laitier est appelée « open eye » (Figure 1, vue du dessus Figure 2). C'est sur les bords de l'« open eye » que l'on trouve un écoulement avec une vitesse radiale générant un cisaillement de la couche d'huile. C'est dans cette zone où l'on s'attend à trouver la formation de ligaments d'huile se fragmentant en gouttes d'huile à partir d'un certain débit de gaz injecté.

### 2.2 Dispositif expérimental

Dans cette étude nous faisons le choix d'utiliser une maquette hydraulique à température ambiante pour représenter le procédé industriel où l'eau représente l'acier liquide, l'huile le laitier et l'air l'argon. Cette maquette est basée sur les travaux de [1] à une échelle 1/2, elle possède une forme cubique avec un injecteur circulaire, dont le diamètre peut être changé, situé au centre de la face du bas de la cuve (Figure 1). L'huile utilisée est un mélange d'huile de paraffine et d'huile de graine de

coton en proportion égale dont les propriétés physiques peuvent être trouvées dans le Tableau 1. On place une caméra rapide face à la cuve pour capturer l'évolution du panache de bulles et observer la déformation de la couche d'huile et, un appareil photo numérique sur le dessus de la cuve pour observer l'évolution de l'« open eye » (Figure 1).

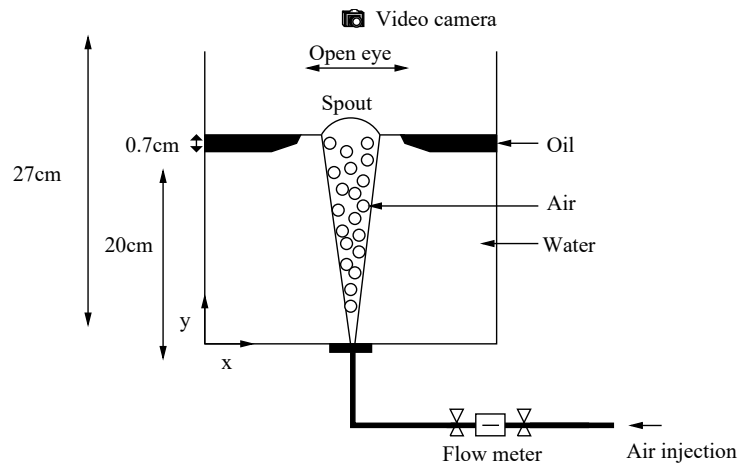


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental de la maquette hydraulique

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (Pa.s)	Surface tension Water/oil (N/m)	Surface tension Oil/air (N/m)
Cottonseed oil + paraffin oil	920	0.0791	0.0255	0.0317
paraffin oil [11]	870	0.065		

Tableau 1 : Propriétés physiques du mélange d'huile et de l'huile utilisée dans [11] à 20°C

## 2.3 Modèle numérique

Le modèle numérique reprend toutes les dimensions ainsi que toutes les propriétés physiques des fluides de la maquette hydraulique (Figure 5). Il résout les équations de Navier-Stokes avec interfaces minces et tension de surface. La résolution est faite avec le code Basilisk [5, 6, 7, 8] utilisant un maillage structuré adaptatif selon les variations du champ de vitesse et de la fraction de fluide et, n'utilise pas de modèle de turbulence. Pour représenter cet écoulement triphasique avec une méthode Volume Of Fluid nous nous basons sur les travaux de [9,10] en ajoutant une étape de normalisation de chaque fraction de fluide par la somme des fractions de fluide à chaque itération.

## 3 Résultats

### 3.1 Résultats Expérimentaux

On réalise les mesures en faisant varier le débit d'air injecté de 0.5 L/min à 4L/min et ce pour deux injecteurs de respectivement 2,35mm et 7,9mm de diamètre.

D'après la vue de face de la Figure 2, on peut voir les bulles interagir et former un panache de bulles jusqu'à la surface libre. Si l'on regarde la vue du dessus de la Figure 2, on identifie clairement le

« spout » situé au centre de l'« open eye ». D'après les résultats des images obtenues en vue de face, on observe un détachement de goutte d'huile à partir d'un débit d'air de 2.9L/min. Sur la Figure 3, on peut identifier sur la partie gauche différentes tailles de gouttes d'huile au centre, on peut voir des fragments de bulles et, sur la droite un ligament d'huile en train de se fragmenter au niveau du bord de l'« open eye ».

Après avoir obtenu les images en vue de dessus, on effectue un post traitement avec ImageJ sur 4 images espacées du même intervalle de temps pour chaque valeur de débit de gaz injecté, pour mesurer la variation de la surface de l'« open eye ». D'après les résultats de la Figure 4 on peut voir que pour un débit d'air injecté inférieur à 2L/min la surface moyenne de l'« open eye » ne varie pratiquement pas entre les deux diamètres d'injection. Pour un débit d'air injecté supérieur à 2L/min on observe des valeurs de la surface moyenne de l'« open eye » pour un diamètre de 2.35mm supérieures à celles de la surface moyenne de l'« open eye » pour un diamètre de 7.9mm.

Les résultats des travaux de [11] ont été obtenus avec une maquette hydraulique de forme cylindrique et une huile différente de celle utilisée dans notre étude (Tableau 1). De plus le diamètre de l'injecteur est de 3 mm et, le rapport de hauteur du bain sur la dimension transversale de la cuve est de 0,5 alors qu'il est de 0,77 dans notre cas. On peut voir d'après la Figure 4 que les valeurs de la surface moyenne de l'« open eye » présentent un écart relatif de l'ordre de 15% avec les résultats de [11].

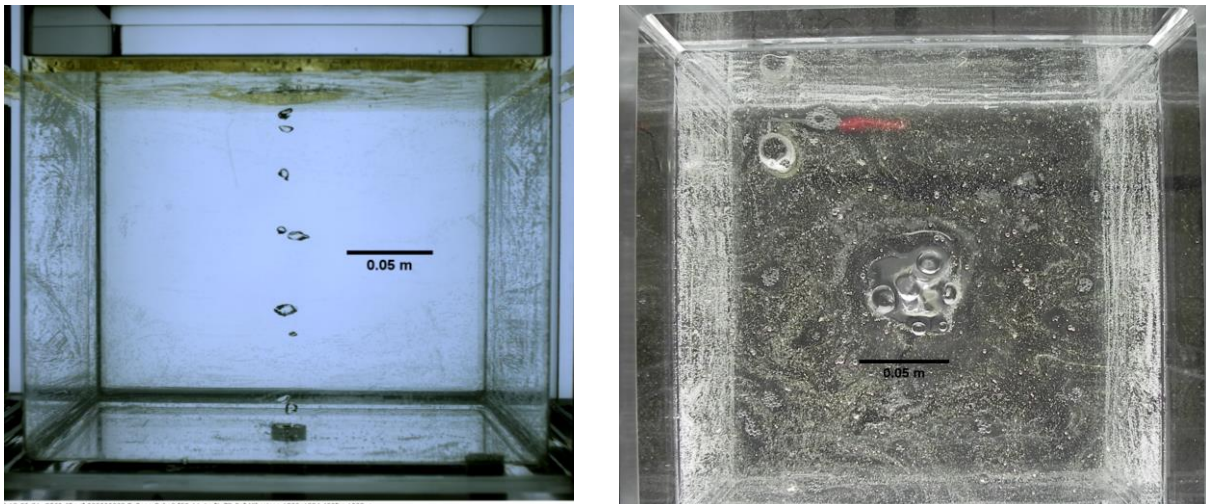


Figure 2 : Vue de face et de dessus de la maquette hydraulique pour un débit d'air de 0,6L/min et un diamètre d'injection de 7,9mm

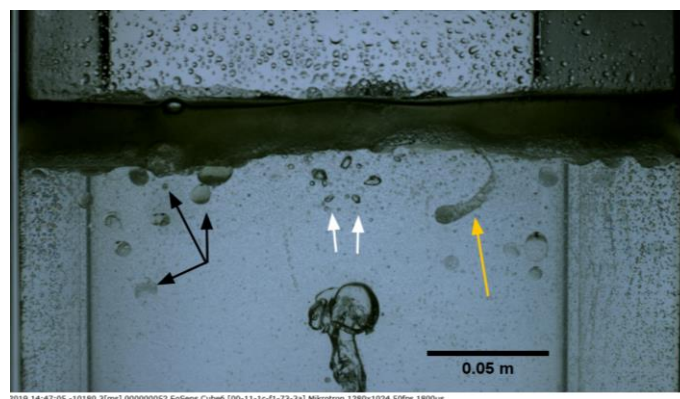


Figure 3: Vue de face centrée au niveau de la surface libre de la maquette hydraulique pour un débit d'air de 5,0L/min et un diamètre d'injection de 2,35mm, code couleur : noir : gouttes d'huile ; blanc : bulles d'air ; orange : ligament d'huile.

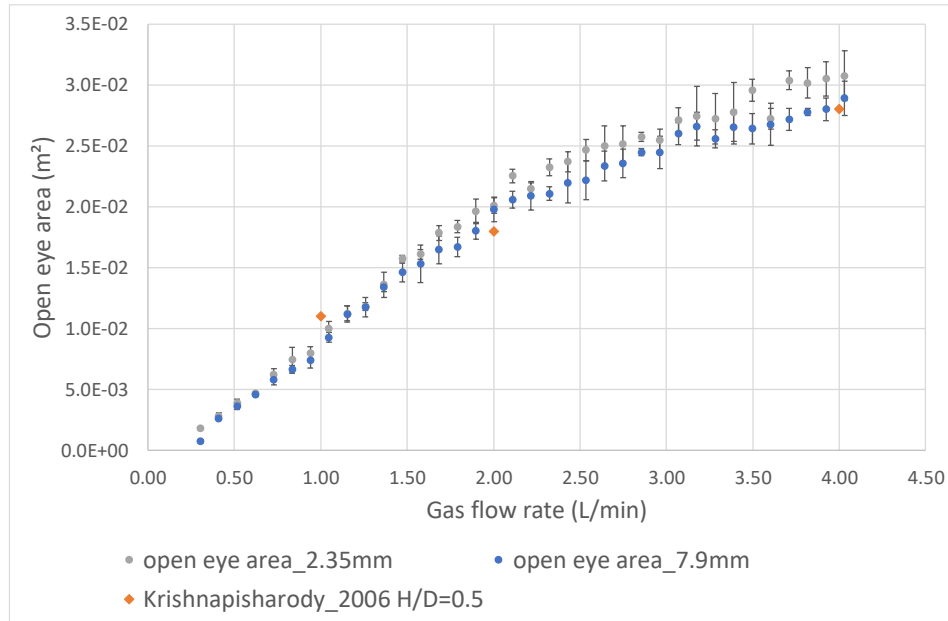


Figure 4: Comparaison des mesures avec écart type de l'évolution de la surface de l'« open eye » en fonction du débit d'air pour deux diamètres d'injection différents avec les travaux de [11].

## 3.2 Résultats Numériques

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus avec un diamètre d'injection  $D=7,9\text{mm}$ , un débit d'air injecté  $Q_g=0.6\text{L/min}$  et une taille de maille minimum de  $132\ \mu\text{m}$ .

On peut voir d'après la Figure 5 que l'on obtient une bonne représentation du panache de bulles et de la formation de l'« open eye » au niveau de la couche d'huile, qui semble être qualitativement similaire à celle de la vue de face de la Figure 2. On peut tout de même observer un plus grand nombre de petits fragments de bulle sur la Figure 5 que sur la Figure 2. Ces fragments sont dus à une résolution du maillage ne permettant pas de capturer entièrement l'hydrodynamique ainsi que les effets de déformations successives des bulles. Les bulles dans le procédé étudié ne sont pas le sujet principal de l'étude, elles sont nécessaires pour apporter une quantité de mouvement dans l'eau et ainsi former un « open-eye » dans la couche d'huile. C'est pourquoi l'on doit trouver un compromis entre la capture de l'hydrodynamique des bulles de manière suffisante et la résolution du maillage. Avec la résolution du maillage utilisée, on peut avoir au maximum 75 mailles par diamètre pour une bulle de  $1\text{cm}$  et 53 mailles dans l'épaisseur de la couche d'huile.

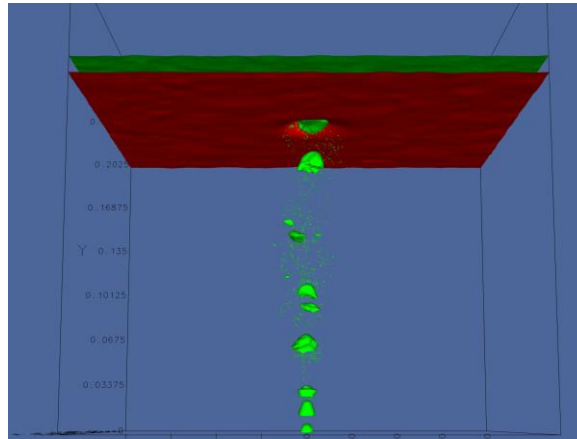


Figure 5: Vue de face du domaine de simulation et de l'écoulement multiphasique (l'air est coloré en vert et l'huile en rouge) avec un diamètre d'injection de 7,9mm et un débit d'air de 0,6L/min à  $t=0.9s$

De manière à valider le modèle numérique, on souhaite comparer les calculs Basilisk aux résultats expérimentaux : taille et vitesse des bulles, diamètre de « l'open-eye », débit critique auquel apparaît le détachement de gouttes d'huile. D'après les premiers résultats numériques, on peut observer une taille de bulle de l'ordre de 1cm de diamètre et une vitesse de montée moyenne des bulles de 0.35m/s. Le temps physique de simulation obtenu pour l'instant est encore trop court pour atteindre un état quasi-stationnaire et pouvoir ainsi comparer les résultats numériques par rapport aux résultats expérimentaux.

## 4 Conclusion

Au cours de cette étude on a pu voir l'utilité des captures d'images sur la maquette hydraulique pour permettre de mieux comprendre l'hydrodynamique de cet écoulement complexe. Les images prises de face permettent d'évaluer l'augmentation de l'agitation de la couche d'huile en fonction du débit d'air injecté jusqu'à observer un détachement d'huile. On peut aussi identifier le mécanisme de formation des gouttes d'huile par fragmentation de ligament et une certaine variété dans la distribution de taille de gouttes d'huile. Les images prises en vue du dessus permettent de mesurer l'augmentation de la surface de l'« open eye » en fonction du débit d'air injecté et ce pour deux diamètres d'injection différents. On observe peu de différence sur la surface de l'« open eye » entre les deux diamètres d'injection pour des débits d'air inférieur à 2.2L/min. Cette caractéristique hydrodynamique de l'écoulement est facilement mesurable et constitue donc une donnée importante pour les futures validations de la simulation numérique.

Un temps de simulation numérique plus long est nécessaire pour confirmer quantitativement les premiers résultats établis et permettre de réaliser une comparaison entre la simulation numérique et l'expérimental. D'autre part, la réalisation de mesures de l'évolution de la concentration d'un traceur passif dissout dans l'eau permettra de caractériser expérimentalement le transfert de masse entre l'eau et l'huile.

## Remerciements

Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul du CINES au travers de l'allocation de ressources 2018- A0052B07760 attribuée par GENCI.

## Références

- [1] P. Riboud R. Vasse, Steel desulfurization In secondary refining, IRSID, 1984.
- [2] S.H. Kim and R. Fruehan, Physical Modeling of Liquid/Liquid Mass Transfer in Gas Stirred Ladle, Metallurgical Transactions, vol 18B, pp.381-390, 1987
- [3] J. Ishida, K. Yamaguchi, S. Sugiura, K. Yamano, S. Hayakawa and N. Demukai, Denki-Seiko, Electric Furnace Steel, vol. 52, pp. 2-8, 1981
- [4] M. Hirasawa, K. Mori, M. Sano, A. Hatanaka, Y. Shimatani, & Y. Okazaki, Rate of mass transfer between molten slag and metal under gas injection stirring, Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, vol. 27, pp. 277-282, 1987
- [5] S. Popinet, Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries, Journal of Computational Physics, vol. 190, pp. 572–600, 2003
- [6] S. Popinet, An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows, Journal of Computational Physics, vol. 228, pp. 5838–5866, 2009
- [7] S. Popinet, Quadtree-adaptive tsunami modelling, Ocean Dynamics, vol. 61, pp. 1261–1285, 2011
- [8] <http://basilisk.fr>
- [9] K. A. Smith, A projection method for motion of triple junctions by level sets, Interfaces and Free Boundaries vol. 4, pp. 263-276, 2002
- [10] X. Chen, Y. Sun, C. Xue, Y. Yu, G. Hu, Tunable structures of compound droplets formed by collision of immiscible microdroplets, Microfluidics and Nanofluidics, vol. 21, pp. 109, 2017
- [11] K. Krishnapisharody, G. A Irons, Modeling of slag eye formation over a metal bath due to gas bubbling. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 37, p. 763-772, 2006