

## SIMULATION NUMERIQUE DE L'ÉCOULEMENT DANS UN HYDROCYCLONE ET L'EFFET DE LA TEMPERATURE SUR L'EFFICACITE DE SEPARATION

I. Mokni<sup>(a)</sup>, H. Dhaouadi<sup>(b)</sup>, H. Mhiri<sup>(a)</sup>, G. Lepalec George<sup>(c)</sup>, Ph. Bournot<sup>(c)</sup>

<sup>(a)</sup> Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine 5000 MONASTIR (TUNISIE)

<sup>(b)</sup> Faculté des Sciences de Monastir, Bvd de l'Environnement, 5000 Monastir (TUNISIE)

<sup>(c)</sup> Institut de Mécanique de Marseille, 60 rue Juliot Curie Technopôle de Château-Gombert 13453  
MARSEILLE Cedex 13 (FRANCE)

[mokni\\_ines@yahoo.fr](mailto:mokni_ines@yahoo.fr)

### RESUME:

L'objectif principal du présent travail est la simulation numérique de l'écoulement tourbillonnaire et triphasique dans les hydrocyclones de la CPG (Compagnie de Phosphate de Gafsa). Cette étude permet de caractériser leur fonctionnement et d'analyser leurs performances. Les équations adéquates d'un écoulement turbulent, tridimensionnel et multiphasique sont résolues numériquement à l'aide du code de calcul Fluent, l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique (CFD) les plus importants. La validation des résultats numériques obtenus a été effectuée par leur confrontation aux résultats expérimentaux fournis par la CPG. La deuxième partie de ce travail, a porté sur l'étude de l'influence de la température sur l'efficacité de séparation dans l'hydrocyclone considéré.

### NOMENCLATURE

$\vec{u}$	Vecteur vitesse	(m/s)	<b>Indices</b>	
$\rho$	Masse volumique	(kg/m <sup>3</sup> )	<b>p</b>	particule
$\mu$	Viscosité dynamique	(kg/ms)	<b>q</b>	phase
$d_p$	Diamètre de la particule	( $\mu$ m)	<b>f</b>	fluide
$Re_p$	Nombre de Reynolds particulaire			
$C_D$	Coefficient de traînée			

### 1. INTRODUCTION

Les cyclones sont les dispositifs les plus utilisés parmi les séparateurs centrifuges ou à inertie. Divers cyclones ont été développés pour différents besoins industriels. Avec l'utilisation des matériaux et des méthodes appropriés de construction, les cyclones peuvent être actionnés dans des conditions de fonctionnement extrêmes, particulièrement sous des températures pouvant atteindre 900°C. Les cyclones peuvent être classés suivant le fluide porteur de la phase dispersée; on peut citer les cyclones gaz-solide et les hydrocyclones (liquides-solides). Le comportement de l'écoulement dans un hydrocyclone est beaucoup plus compliqué que celui dans un cyclone gaz-solide, bien que les mécanismes globaux de séparation soient semblables. Les cyclones ont été étudiés essentiellement dans le but d'améliorer leurs performances de séparation. Dans la plupart des cas, cette amélioration nécessite une structure plus complexe et un coût d'exploitation additionnelle. Cependant, une bonne compréhension de la dynamique des fluides dans un cyclone est exigée afin d'apporter d'autres améliorations de conception. La technique de la mécanique des fluides numérique (CFD) peut fournir des informations sur la structure dynamique de l'écoulement du fluide et sur la trajectoire des particules dans l'appareil de séparation. Wang *et al* [1] ont étudié numériquement à l'aide de la CFD l'écoulement multiphasique gas-liquide-solide dans les hydrocyclones sous différents paramètres de conception, à savoir la hauteur des différentes pièces et les diamètres des parties cylindrique et conique de l'hydrocyclone. Dans un travail plus récent [2], ils se sont intéressés à l'étude de l'effet de la géométrie de la tubulure de sortie (vortex-finder) sur l'écoulement gaz-liquide-solide dans un hydrocyclone. Yoshida *et al* [3] ont examiné aussi bien

expérimentalement que numériquement, l'effet de l'écoulement à multi-admission sur les performances de classification des particules. Un nouvel arrangement dans l'hydrocyclone a été conçu par *Sripriya et al* [4] avec l'insertion d'une tige pleine dans la partie centrale de la section conique de l'hydrocyclone. Ils ont ainsi pu étudier expérimentalement l'effet du diamètre et de la longueur de la tige sur l'efficacité de l'hydrocyclone. Alors que, des expériences ont été faites par *Gupta et al* [5] sur un hydrocyclone en considérant différents débits d'admission respectivement en présence et en l'absence du noyau d'air pour l'étude de la chute de pression dans l'hydrocyclone tout en insérant une tige soit horizontalement dans la partie conique soit verticalement par le fond. Dans ce travail, on se propose de modéliser l'écoulement multiphasique se produisant dans un hydrocyclone ayant pour fonction l'enrichissement de la pulpe de phosphate. Le modèle de turbulence RSM et les modèles multiphasiques « DPM » et « VOF » seront combinés pour étudier et décrire l'écoulement et les performances de l'hydrocyclone, y compris la formation d'un noyau d'air.

## 2. DESCRIPTION DE L'HYDROCYCLONE :

L'hydrocyclone étudié fait partie d'une batterie à 8 hydrocyclones. Le dispositif est un « cylindre sur cône » et possède une tubulure d'entrée tangentielle à section circulaire. Sur la figure 1, on présente la batterie et l'hydrocyclone considéré. Les dimensions de l'hydrocyclone sont données dans le tableau 1.

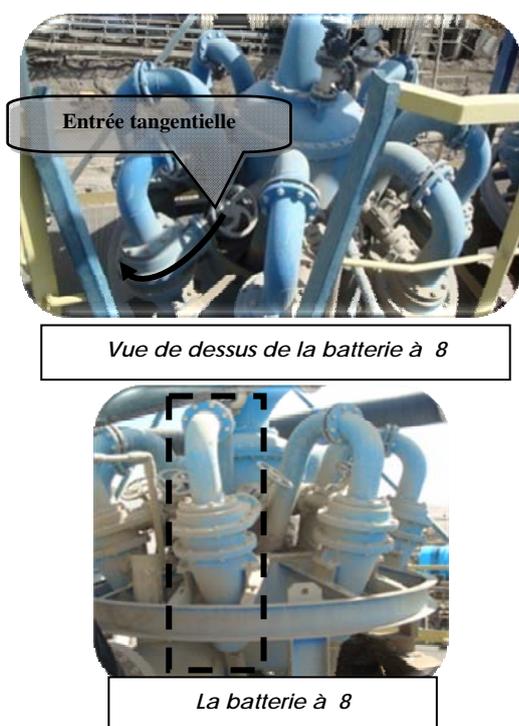


Figure 1: Vue générale de la batterie à 8 hydrocyclones de la CPG.

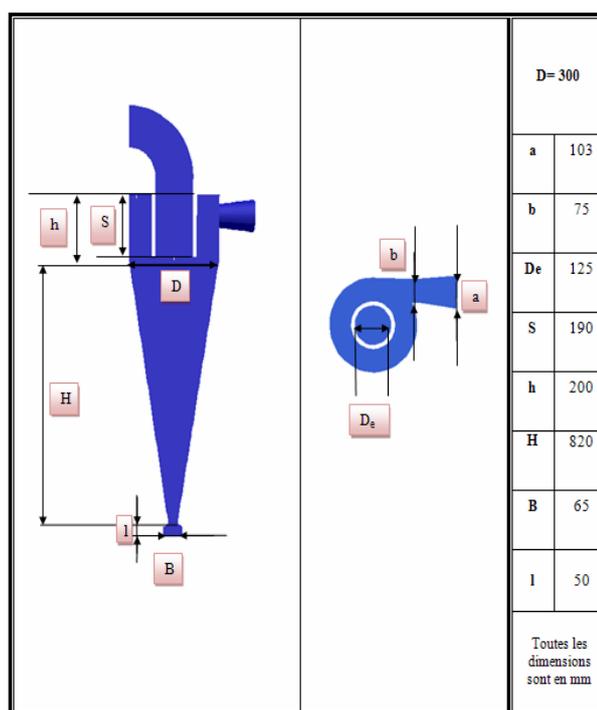


Tableau 1: Dimensions de l'hydrocyclone

## 3. MAILLAGE ET CONDITIONS AUX LIMITES :

Le maillage du domaine, constitué de 134835 volumes de contrôle, a été réalisé à l'aide du préprocesseur « Gambit ». Partout dans le domaine et là où la géométrie le permet et pour disposer d'un maillage qui s'adapte bien à la géométrie considérée, les cellules hexaédriques ont été préférées à celles tétraédriques. On donne sur la figure 2 une vue globale du maillage hexaédrique de l'hydrocyclone ainsi que des zooms au niveau des entrées-sorties des fluides et des particules. Un test de sensibilité du maillage a permis de conclure qu'un maillage serré avec une adaptation près des parois permet de décrire convenablement l'écoulement à l'intérieur du cyclone. Pour

simuler l'écoulement du fluide on a imposé une vitesse constante à l'admission du cyclone (velocity inlet,  $V_{in}=3.5$  m/s) et une pression atmosphérique à la sortie (Pressure Outlet). Les particules de phosphate sont injectées sur toute la surface d'admission. En ce qui concerne la formation du noyau d'air, on suppose que la fraction volumique de l'air au niveau des deux sorties est égale à 1.

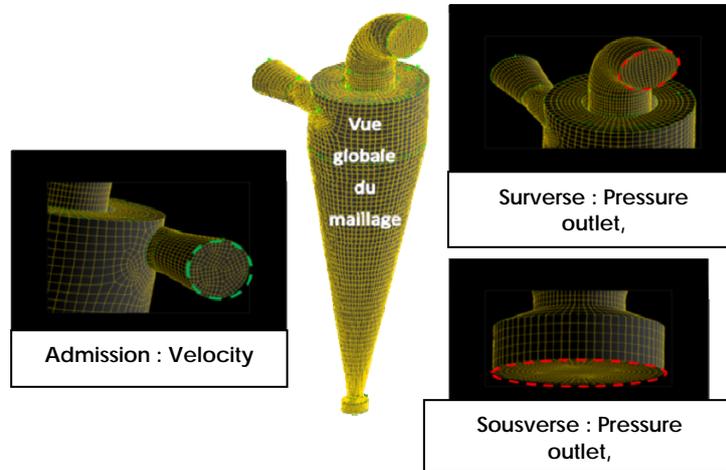


Figure 2 : Maillage de l'hydrocyclone et conditions aux limites

#### 4. DESCRIPTION DU MODELE DE TURBULENCE ET DES MODELES MULTIPHASIQUES:

##### 4.1 Modèle de turbulence RSM :

C'est un modèle de fermeture du second ordre. L'équation du tenseur des contraintes de Reynolds, ( $R_{ij} = \overline{\rho u_i' u_j'}$ ), s'écrit de la façon suivante [6]:

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + C_{ij} = P_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} + \phi_{ij} + G_{ij} \quad (1)$$

Avec  $C_{ij}, P_{ij}, D_{ij}, \varepsilon_{ij}, \phi_{ij}$  et  $G_{ij}$  : respectivement le terme de convection, le terme de production dû aux gradients moyens, le terme de diffusion, le terme de dissipation, le terme de corrélation pression-déformation et le terme de production dû à la flottabilité [6]. Le modèle RSM nécessite l'utilisation des constantes empiriques suivantes :  $C_\mu=0.09$ ,  $C_{\varepsilon 1}=1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2}=1.92$ ,  $\sigma_\varepsilon=1$ ,  $\sigma_k=0.82$

##### 4.2 Modèle multiphasique DPM :

La trajectoire de la particule est obtenue en intégrant l'équation de quantité de mouvement en utilisant la description lagrangienne. Cette équation peut s'écrire sous la forme suivante [6]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D (\vec{u}_f - \vec{u}_p) + \vec{g} \left( \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) + \vec{F} \quad (2)$$

F est un terme de source qui exprime la présence d'une force additionnelle.

Le terme  $F_D (\vec{u}_f - \vec{u}_p)$  représente la force de traînée par unité de masse de la particule.  $F_D$  étant défini par [6]:

$$F_D = \frac{18\mu_f}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \mathbf{Re}_p}{24} \quad (3)$$

Avec :

$$\mathbf{Re}_p = \rho_f (u_f - u_p) d_p / \mu_f \quad (4)$$

##### 4.3. Modèle de volume de fluide (VOF):

Le modèle VOF repose sur une méthode dite méthode de la fraction volumique. Elle permet de localiser l'interface entre deux domaines fluides différents. Elle est applicable pour des fluides non

miscibles (eau–air par exemple) c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas d'interpénétration entre fluides. La description des écoulements multiphasiques fait appel à la notion de fraction volumique notée  $\alpha_q$ ,

avec :

$$\sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \quad (5)$$

Les lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement doivent être vérifiées pour chaque phase. L'équation de conservation de la masse pour la phase q s'écrit de la façon

suivante [6]:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \text{div}(\alpha_q \rho_q \overline{u}_q) = 0 \quad (6)$$

Les équations de conservation de la quantité de mouvement s'écrivent sous la forme matricielle

suivante [6]:

$$\frac{\partial \rho \overline{U}_i}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \rho \overline{U}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \mu \frac{\partial^2 \overline{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \rho(\overline{u}_i \overline{u}_j')}{\partial x_j} \quad (7)$$

Les équations de conservation de la quantité de mouvement sont dépendantes des fractions volumiques  $\alpha_q$  de toutes les phases puisqu'elles sont exprimées en fonction de la masse volumique  $\rho$  et de la viscosité dynamique  $\mu$  qui dépendent eux mêmes de  $\alpha_q$ .

## 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS:

### 5.1. Formation du noyau d'air dans l'hydrocyclone:

La formation d'un noyau d'air est un phénomène important qui caractérise l'écoulement dans un hydrocyclone. Sur la figure 3-(a), on donne l'évolution au cours du temps du noyau d'air. On voit que l'hydrocyclone, rempli initialement par l'eau commence à aspirer l'air à partir des deux sorties. En effet, la pulpe de phosphate qui entre avec une vitesse tangentielle cause une élévation de la pression le long de la périphérie de l'hydrocyclone tandis qu'une zone de basse pression se forme dans l'axe central à cause de l'écoulement turbulent et fortement swirlé (figure 3-(b)).

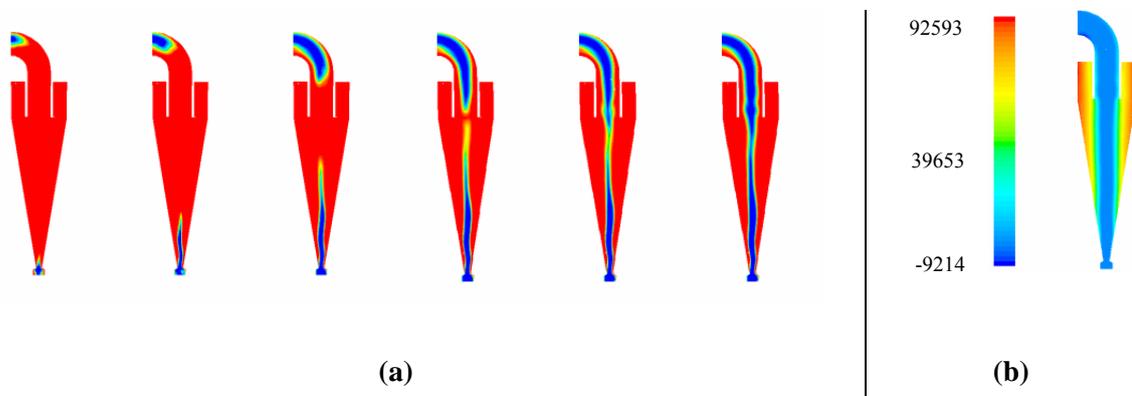


Figure 3: (a) Contours de la fraction volumique de l'eau, (b) Contour de la pression relative.

Ceci a pour effet la formation d'une surface d'eau libre tournante au centre, et puisque les sections de la surverse et de la sousverse sont ouvertes à l'atmosphère, l'air sera aspiré à l'intérieur de l'hydrocyclone dans la zone à basse pression et formera une colonne d'air hélicoïdale et continue, qui s'appelle le noyau d'air.

### 5.2. Structure dynamique de l'écoulement:

La figure 4 représente la distribution des vitesses tangentielle, axiale et radiale. La coupe B-B de la vitesse tangentielle montre que celle-ci évolue radialement tout en décrivant le vortex de Rankine qui est une combinaison des deux vortex (forcé et libre). Sur la coupe A-A de la vitesse tangentielle, on peut voir que le liquide entrant par la zone d'admission est accéléré lorsqu'il arrive à la zone 1. La zone 2 correspond à l'écoulement chaotique à proximité de la surverse. Cet écoulement est la cause principale de l'augmentation de la chute de pression dans l'hydrocyclone et aussi de la

formation des courts-circuits près des parois de la tubulure de sortie. On donne aussi sur la même figure la distribution de la vitesse axiale de l'écoulement pour deux coupes de l'hydrocyclone. On note la présence d'un flux descendant près des parois compensé par un courant ascendant dans la région centrale de l'hydrocyclone. C'est le flux descendant qui permet d'entraîner les grosses particules vers la buse de la sousverse. L'enveloppe des points où la vitesse axiale est nulle « LZVV », représentée en ligne noire sur la figure est asymétrique par rapport à l'axe géométrique de l'hydrocyclone, elle est aussi un peu plus large que le diamètre de la tubulure de sortie. On observe aussi un écoulement secondaire présent dans la partie cylindrique de l'hydrocyclone entre la paroi de la surverse et la paroi de l'hydrocyclone (la zone 3). C'est un écoulement sous forme de vortex de recirculation connu sous le nom de flux de remous [2].

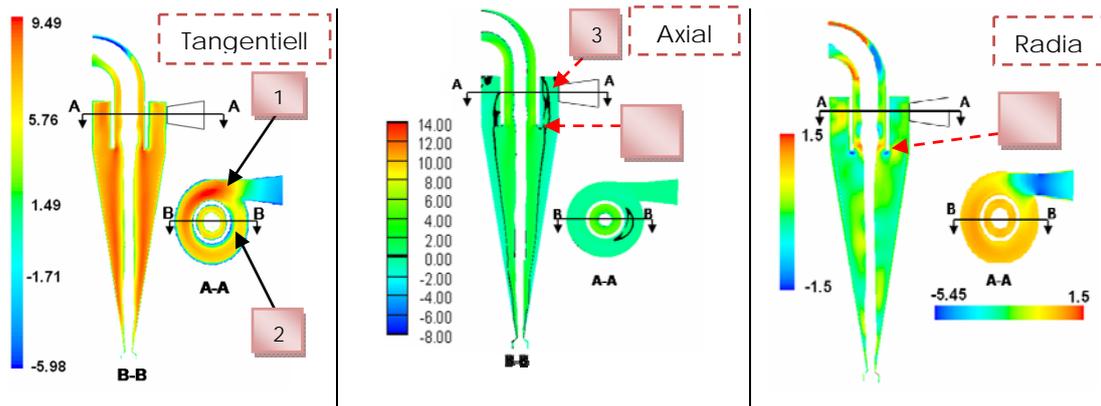


Figure 4: Contours des vitesses tangentielle, axiale et radiale.

On donne aussi les contours de la vitesse radiale à partir desquels on remarque que le vortex forcé est formé de deux cylindres hélicoïdaux où les vitesses radiales sont égales en valeurs absolues mais de signes opposés. La zone 4 correspond à l'écoulement court-circuitant. Dans cette zone, une partie de l'écoulement qui vient juste d'entrer par la zone d'admission, passe directement par la surverse et peut aussi détériorer les performances de l'hydrocyclone.

### 5.3. Performances de l'hydrocyclone :

Les principaux paramètres qui caractérisent les performances d'un hydrocyclone sont la chute de pression, le diamètre de coupure, l'imperfection et l'efficacité de séparation. L'imperfection est définie comme suit :  $(I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}})$  et elle peut être calculée numériquement à partir de la courbe

de partage (courbe qui permet de donner l'efficacité de séparation de chaque dimension  $d_i$  des particules ou chaque classe granulométrique). Sur le tableau 2, on a regroupé ces différents paramètres et on les a comparés avec ceux mesurés expérimentalement. La comparaison montre que les résultats numériques obtenus sont assez satisfaisants bien qu'il existe un écart par rapport aux résultats donnés par la CPG.

	Chute de pression [Bar]	$d_{50}$ [micron]	Imperfection
CFD	1.09	38	0,192
Expérimental (CPG)	0.9	40	0,187

Tableau 2: Performances de l'hydrocyclone (chute de pression,  $d_{50}$  et imperfection).

### 5.4. Influence de la température sur l'efficacité de séparation :

On s'intéresse dans cette partie à l'influence d'une température élevée à l'entrée de l'hydrocyclone sur l'efficacité de séparation. Sur la figure 5, on donne les courbes de partages pour deux températures différentes. La figure montre qu'une augmentation de la température permet

d'augmenter l'efficacité de séparation pour les particules à faibles diamètres (inférieurs à  $d_{50}$ ). Ceci est dû au fait qu'une augmentation de la température permet d'augmenter le nombre de Reynolds particulaire, or le coefficient de traînée  $C_D$  est inversement proportionnel à ce nombre adimensionnel [7], il en résulte alors une diminution du coefficient de traînée permettant ainsi d'améliorer l'efficacité de séparation pour les particules à faibles diamètres. Julien Saint Amand et al [8] ont trouvé aussi qu'une augmentation de la température permet d'améliorer l'efficacité de séparation dans la phase de nettoyage par hydrocyclone lors du recyclage du papier.

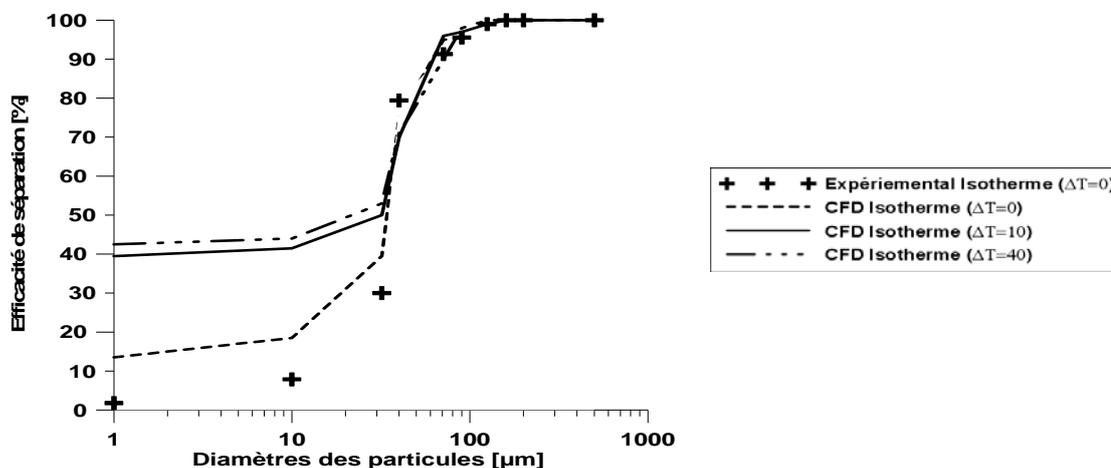


Figure 5: Courbes de partage pour différents températures de la suspension de phosphate.

## 6. CONCLUSION:

En résumé, les résultats trouvés à partir d'une simulation numérique par CFD, basée sur le modèle de turbulence RSM et les deux modèles multiphasiques VOF et DPM, permettent de bien décrire l'écoulement turbulent et fortement tourbillonnaire dans les hydrocyclones de la CPG. De Plus l'étude de l'influence d'une température élevée à l'entrée a permis de conclure que l'efficacité de séparation est améliorée par une augmentation de la température pour les particules à faibles diamètres (inférieurs à  $d_{50}$ ).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

1. B. Wang, A.B. Yu, 2006, Numerical study of particle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*, 19: 1022–1033
2. B. Wang, A.B. Yu, 2007, Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones with different configurations of vortex finder. *Chemical Engineering Journal*, 135: 33–42
3. H. Yoshida, S. Yoshikawa, K. Fukui, T. Yamamoto, 2007, Effect of multi-inlet flow on particle classification performance of hydrocyclones, *Powder Technology*
4. R. Sriprya, M.D. Kaulaskar, S. Chakraborty, B.C. Meikap, 2007, Studies on the performance of a hydrocyclone and modeling for flow characterization in presence and absence of air core. *Chemical Engineering Science*, 62: 6391-6402
5. R. Gupta, M.D. Kaulaskar, V. Kumar, R. Sriprya, B.C. Meikap, S. Chakraborty, 2008, Studies on the understanding mechanism of air core and vortex formation in a hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal*,
6. Fluent 6.2, “Documentation”, User’s Guide Fluent. Inc. (2001)
7. S.A. Morsi, A.J. Alexander, 1972, An investigation of particle trajectories in two phase flow systems. *Journal of fluid Mechanics*, 55(2):193-208
8. F. Julien Saint Amand, B. Perrin, T. Delagoutte, R. Gooding, A. Huovinen, P. Heederik, A. Pahl, W. Haar, H. Gonera, J. Dabrowski, T. Mik, L. Hamann, O. Cordier, D. Asendrych, M. Favre-Marinet, 2005, Final Technical Report. Optimisation of Screening and Cleaning Technology to Control Deinking Pulp Cleanliness – ScreenClean CTP-AFTICP-PTS-LEGI, 182p.