

SIMULATION NUMERIQUE D'UNE UNITE D'EXTRACTION AURIFERE MODERNE, CAS D'UN CYCLONE SEPARATEUR

Voarimalala M. Razafindratsimba, Julien A. Rajomalahy, Vololomihaja Andriamifidisoa, Achille O. Ravoninjatovo
et Lala Andrianaivo

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Petroleum Engineering Department,
Laboratoire Exergie et Géoingénierie, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar, voary@hotmail.fr

Résumé

Par le biais des grands opérateurs miniers, les ressources minières est l'un des facteurs porteurs pour Madagascar. D'un autre point de vue, pour les petits exploitants, l'instabilité de leur recette journalière a une influence sur leur source de revenu, éventuellement à leur niveau de vie et par rebond au développement de leur localité respective. Pour résoudre le problème, dans l'objectif d'amélioration de la production aurifère et de récupération des minerais associés, nous avons adopté une méthodologie à la fois quantitative et qualitative. Cet article consiste à modéliser et simuler la géométrie et le principe de fonctionnement d'un séparateur. Le résultat issu de ce travail a permis de mettre au point une technologie moderne d'extraction aurifère artisanale qui est le séparateur à cyclone. Le fonctionnement est évalué à travers deux indicateurs de performance principaux qui sont l'efficacité de séparation et la vitesse. La géométrie, le régime de séparation, et les propriétés des minerais sont les trois groupes de paramètres qui affectent la performance de l'appareil de séparation. La séparation à fluide variable à l'intérieur du cyclone séparateur a été étudiée par simulation numérique avec le logiciel ANSYS. Le modèle de la simulation sera utilisé pour la conception et la réalisation du prototype.

Mots clés : Exploitation artisanale, modélisation, extraction aurifère, amélioration de production

1. INTRODUCTION

La batée qui est jusqu'à présent indémodable est l'outil d'extraction d'or artisanal des orpailleurs. Dans cet article, une autre technologie est envisageable pour compléter cette vieille méthode. La séparation par batée est efficace, mais elle présente d'importants inconvénients qui pourraient nuire à leur efficacité. A savoir : moyen de production archaïque et non-hygiénique, faible capacité de production. Ces inconvénients et leurs conséquences nous incitent à pousser cette recherche. Pour ce faire, avant la construction du modèle de séparateur cyclonique il est nécessaire d'établir une modélisation numérique.

Pour mener à bien la conception de l'appareil, une étude de la force centrifuge dans le cyclone séparateur (Figure 1) est nécessaire. Cette force permet respectivement de séparer l'or et les autres constituants du minerai d'or.

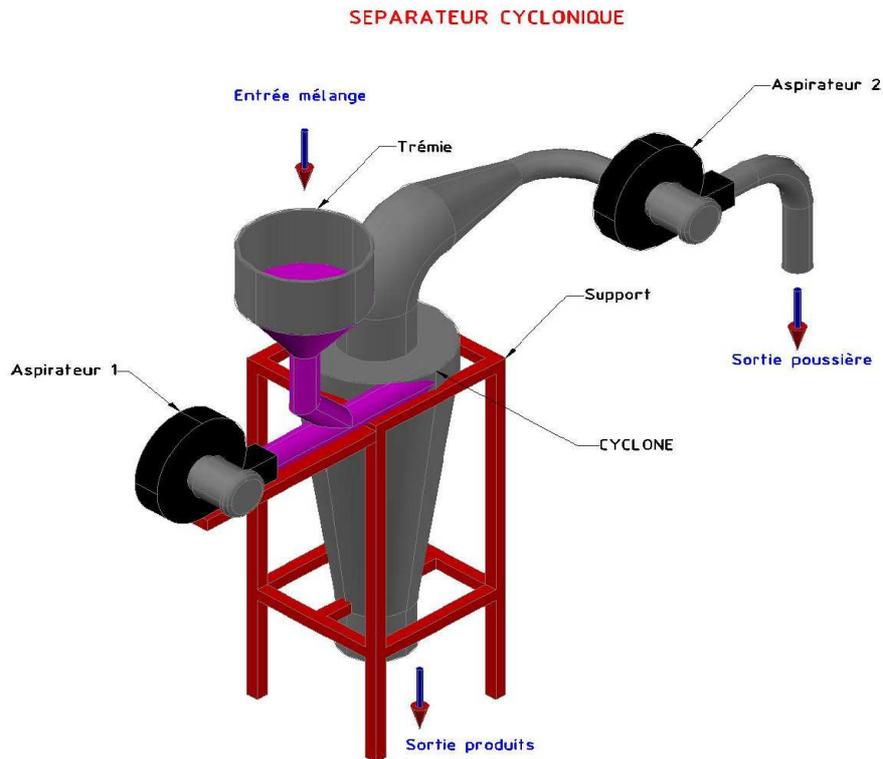


Figure 1 : Représentation du séparateur à cyclone

L'objectif du présent travail consiste à démontrer si les études de simulation numérique vont conduire à un résultat probant. Nous avons choisi la séparation par les cyclones du fait que ce dispositif séparateur, par sa géométrie et sa construction est simple.

2. PROCEDES DE SEPARATION

Le produit à séparer entre à l'entrée du mélange et sera aspiré par le premier aspirateur et pénètre dans le cyclone qui séparera par la suite les produits lourds et légers. Les produits lourds sortent en bas vers la sortie et les produits légers dont les poussières seront aspirées par le second aspirateur montent vers la sortie (Figure 1).

2.1. Fonctionnement du cyclone séparateur

Dans les séparateurs centrifuges, dit cyclone, le champ tourbillonnaire est induit par la conduite en spirale et l'injection tangentielle du mélange à séparer :

- A travers des vannes de guidage : le mélange est dirigé axialement vers des vannes de guidage, dont l'ensemble s'apparente à une turbine Francis. Ces séparateurs sont appelées cyclones axiaux ;
- A travers une conduite d'entrée tangentielle : le mouvement giratoire est obtenu en faisant entrer le fluide tangentiellement à la circonférence, au voisinage de la paroi. Ces séparateurs sont appelés cyclone. On distingue deux types de ce type de cyclone :
 - Les « reverses types » : les deux phases à séparer empruntent des sens différents. La phase légère est récupérée par le haut et la phase lourde par le bas ;

- Les « straight through » : les deux phases sont retirées de même côté, généralement par le bas : la phase légère au centre et la phase lourde près des parois [1].

Le principe de fonctionnement d'un cyclone est basé en général sur l'effet de la force centrifuge engendrée par un mouvement tangentiel d'un fluide à l'entrée du cyclone. Les particules emportées par le fluide se retrouvent éjectées vers les parois extérieures puis collectées dans la partie conique inférieure. Le fluide s'échappe dans le cylindre intérieur appelé aussi conduit de sortie en haut de l'appareil.

2.2. Géométrie et paramètres du cyclone séparateur

Le tableau 1 et la figure 2 représentent le dimensionnement de tube d'entrée et les conditions thermodynamiques de la boue utilisée.

Tableau 1 : Dimensionnement du tube d'entrée

	Paramètres	Valeurs
Boue	Diamètre des particules	6 à 10µm
	Viscosité	36 cp
	Densité	1.05 kg/m ³
Caractéristiques techniques	Puissance	650W
	Production	50 à 60kg par jour
	Vitesse d'entrée	35.4 m/s
Dimension	Longueur	1540mm
	Hauteur	962mm
	Largeur	350mm
	Diamètre d'entrée	60.96 mm
	Diamètre de sortie	80 mm

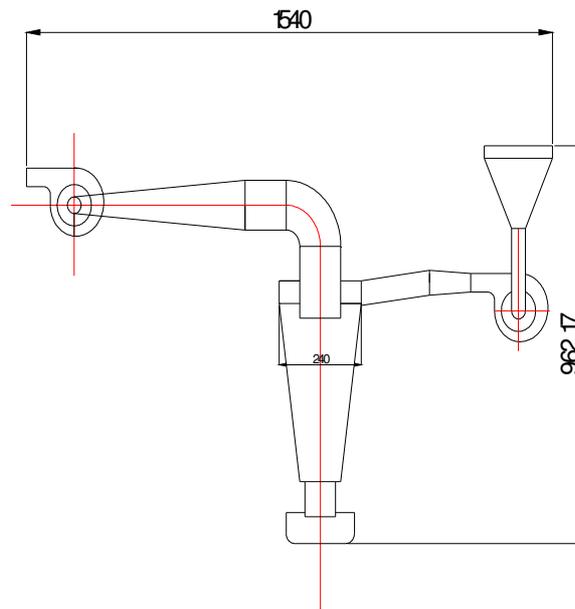


Figure 2 : Dimensionnement de la structure étudiée

3. MODELISATION

3.1. Formulation mathématique

Le nombre de points de grille requis pour la Simulation Numérique Directe (DNS) entièrement résolu est énormément grand, en particulier pour les flux de nombres de Reynolds élevés ; et donc le DNS est limité à des flux de nombre de Reynolds relativement bas [3]. Le DNS est généralement utilisé comme outil de recherche pour analyser la mécanique de la turbulence, comme la production de turbulence, la cascade d'énergie, la dissipation d'énergie, la production de bruit, la réduction de la traînée.

3.1.1. Moyenne de Reynolds Navier Stokes (RANS)

Lorsque le débit est turbulent, il est commode d'analyser le débit en deux parties, une composante moyenne (moyennée dans le temps) et une composante fluctuante.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i = \bar{U}_i + u'_i \\ P = \bar{P} + p' \\ T_{i,j} = T_{l,m} + \tau'_{i,j} \end{array} \right. \quad \text{Eq 01}$$

Over line est un raccourci pour la moyenne temporelle et dans le cas de RANS $\overline{\bar{U}_i} \equiv \bar{U}_i$ et $u'_i = 0$. La technique de décomposition ci-dessus est appelée Reynolds Décompositions. L'insertion de cette décomposition dans les équations instantanées et la moyenne temporelle aboutissent aux équations de Navier-Stokes de Reynolds (RANS).

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Eq 02}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_l}{\partial t} + \bar{U}_m \frac{\partial u_l}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \bar{u}_l}{\partial x_i \partial x_m} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u'_l u'_m}) \quad \text{Eq 03}$$

$\overline{u'_l u'_m}$ dans le dernier terme de l'équation. Eq 03 représente la corrélation entre les vitesses de fluctuation et s'appelle le tenseur des contraintes de Reynolds. Tous les effets du mouvement des fluides turbulents sur le débit moyen sont regroupés dans ce seul terme par le processus de moyen-âge. Cela permettra de réaliser de grandes économies en termes d'exigences de calcul. D'un autre côté, le processus de moyenne génère six nouvelles variables inconnues. C'est ce qu'on appelle le problème de fermeture. Basé sur la façon dont nous fermons le tenseur de Reynolds, il y a deux catégories principales, à savoir les modèles de viscosité turbulente et le modèle de contrainte de Reynolds [4].

Le tenseur des contraintes de Reynolds résultant de la moyenne temporelle des équations de Navier-Stokes est fermé en le remplaçant par une viscosité turbulente multipliée par des gradients de vitesse. C'est ce qu'on appelle l'hypothèse de Boussinesq

$$\overline{u'_l u'_m} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_m} - \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_l} \right) \quad \text{Eq 04}$$

Où ν_t est la viscosité cinématique turbulente (turbulente). Afin de mieux faire l'Eq 04 valide à la contraction à cause de l'équation. Eq 02

3.1.2. Equations gouvernant les particules

Basé en partie sur les propriétés physiques des particules de poussière et en partie sur l'effort de modélisation mathématique requis, il existe certaines hypothèses raisonnables pour décrire le transport des particules dans un milieu fluide [5]. Les principales hypothèses simplificatrices sont les suivantes:

- Les particules sont supposées sphériques.
- Le rapport entre la densité des particules et celle des fluides est très important: la densité de la particule de poussière est beaucoup plus élevée que celle du fluide qui est l'air.
- La force de traînée est la force dominante: c'est le résultat direct de l'hypothèse précédente. Comme la densité des particules est beaucoup plus élevée que la densité du fluide, plusieurs forces telles que la force de portance, la force de Basset et la force de flottabilité peuvent être facilement éliminées car elles ont un effet négligeable sur le transport des particules.

En incorporant toutes les hypothèses ci-dessus, les équations lagrangiennes gouvernant le mouvement des particules peuvent être écrites comme suit:

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad \text{Eq 05}$$

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + g_x \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) \quad \text{Eq 06}$$

x_p est la position des particules, g_x est la force gravitationnelle, ρ et ρ_p sont la densité du fluide et de la particule respectivement. Généralement, la particule se déplace avec une vitesse différente de celle du fluide à tout point donné. La différence de vitesse du fluide (u) et de vitesse de la particule (u_p), appelée vitesse de glissement ($u - u_p$), entraîne une distribution de pression déséquilibrée ainsi que des contraintes visqueuses

sur la surface de la particule. En Eq. 6, le terme $F_d(u - u_p)$ est la force de traînée par unité de masse de particules. F_d est donné par [6]:

$$F_d = \frac{1}{\tau_p} \left(\frac{C_d R_{ep}}{24} \right) \quad \text{Eq 07}$$

Où τ_p est le temps de relaxation des particules donné par :

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad \text{Eq 08}$$

3.2. Technique de résolution

Des études paramétriques de simulation numérique, en utilisant le code Fluent [7], ont été conduites pour caractériser les effets des paramètres affectant le fonctionnement de cet appareil à travers leurs indicateurs de performance. Le modèle de turbulence RANS et le modèle multiphasique du mélange ont été combinés pour illustrer (Figure 3) le comportement des composants des mélanges dans les séparateurs.

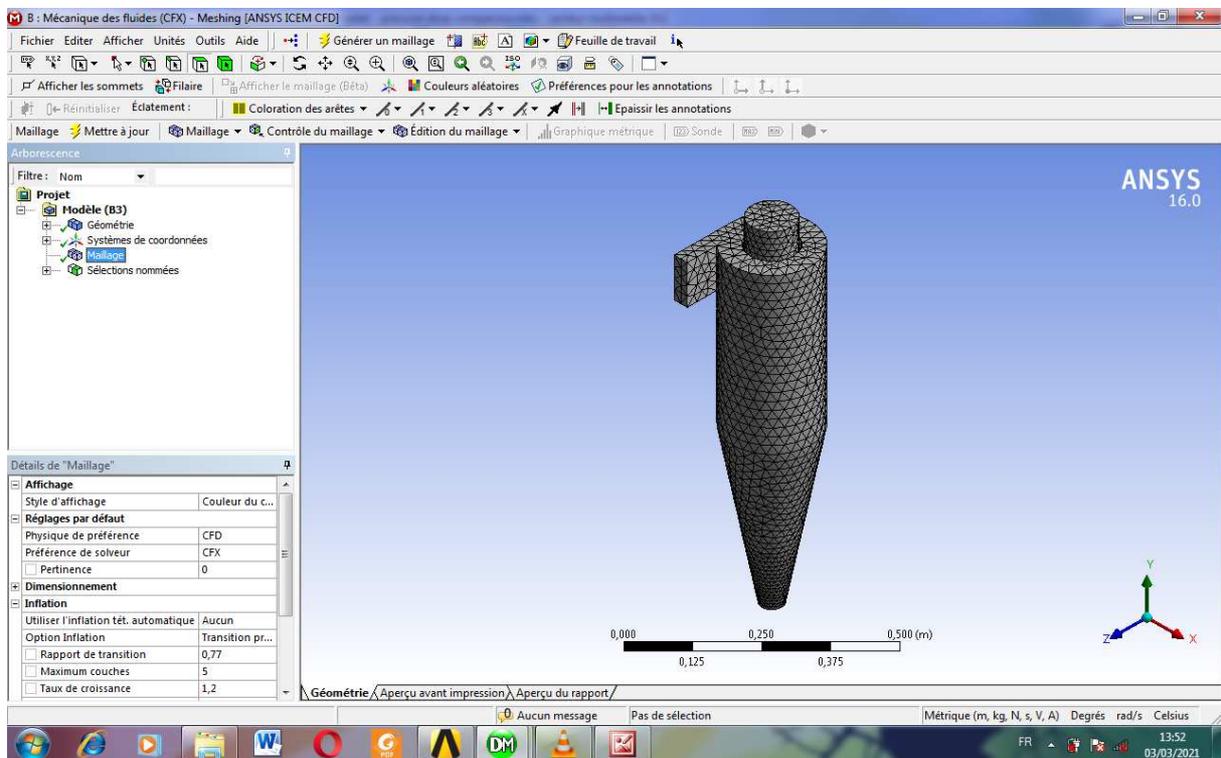


Figure 3 : Maillage de la géométrie

Le Fluent reprend un programme de modélisation qui a parmi ces capacités :

- 2D Plan, 2D Axisymétrique, 3D ;
- Maillage structuré et non structuré ;
- Ecoulement permanent ou non stationnaire ;
- Tous les régimes de vitesses (subsonique, supersonique et hypersonique) ;
- Non visqueux laminaire ou turbulent ;
- Fluide newtonien ou non newtonien ;

- Formulation RANS : K- ϵ , K- ω , RSM ;
- Formulation LES ;
- Convection naturelle, forcée et mixte ;
- Transfert de chaleur conjugué ;
- Combustion (réaction et espèces chimiques) ;
- Ecoulements multiphasiques ;
- Changement de phase (solidification/fusion).

La figure 4 montre les paramètres sous ANSYS.

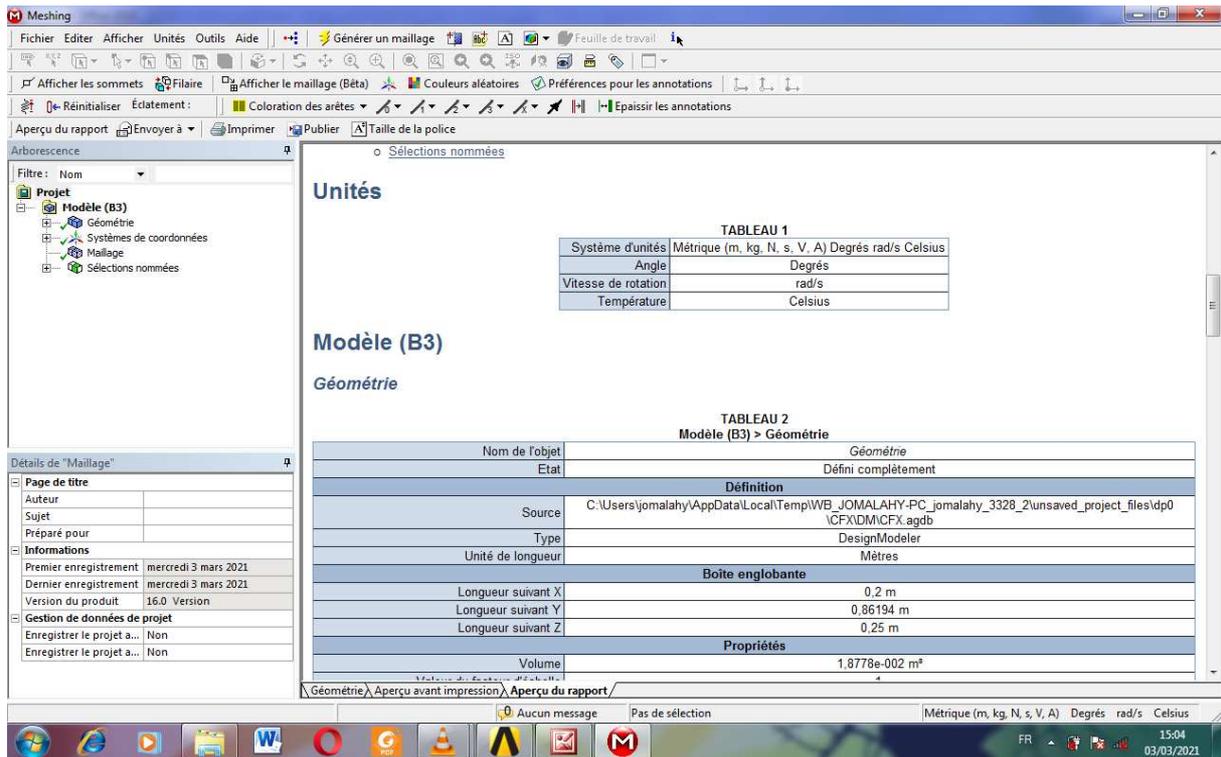


Figure 4 : Saisie des paramètres sous ANSYS

Le modèle utilisé dans ce travail et la formulation K- ϵ avec des spécifications suivantes :

- Model de K- ϵ : RANS
- Option de RANS : modèle de viscosité différentielle

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1. Vitesse résultante

La figure 5 concerne la représentation des vitesses restantes.

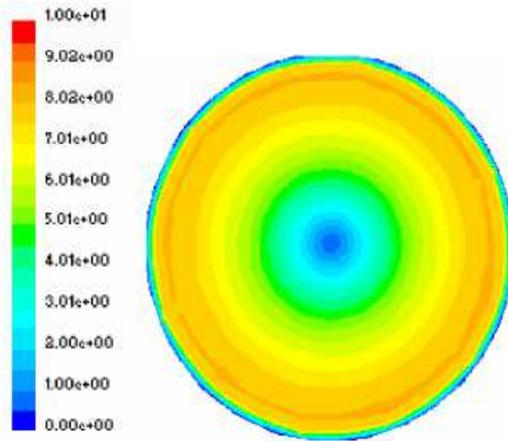


Figure 5 : Représentation des vitesses restantes

Sur la figure 5, on trouve les contours et les lignes de courant dans le plan (x, z) pour $y=0$ et ceci pour les modèles de turbulence RANS K- ϵ . Il y a un basculement du fluide autour de l'axe du cyclone. On remarque aussi dans ce séparateur qu'il y a deux flux : un flux descendant illustrer par des vitesses négatives, et un flux ascendant.

La figure 6 représente les composantes de vitesse moyenne.

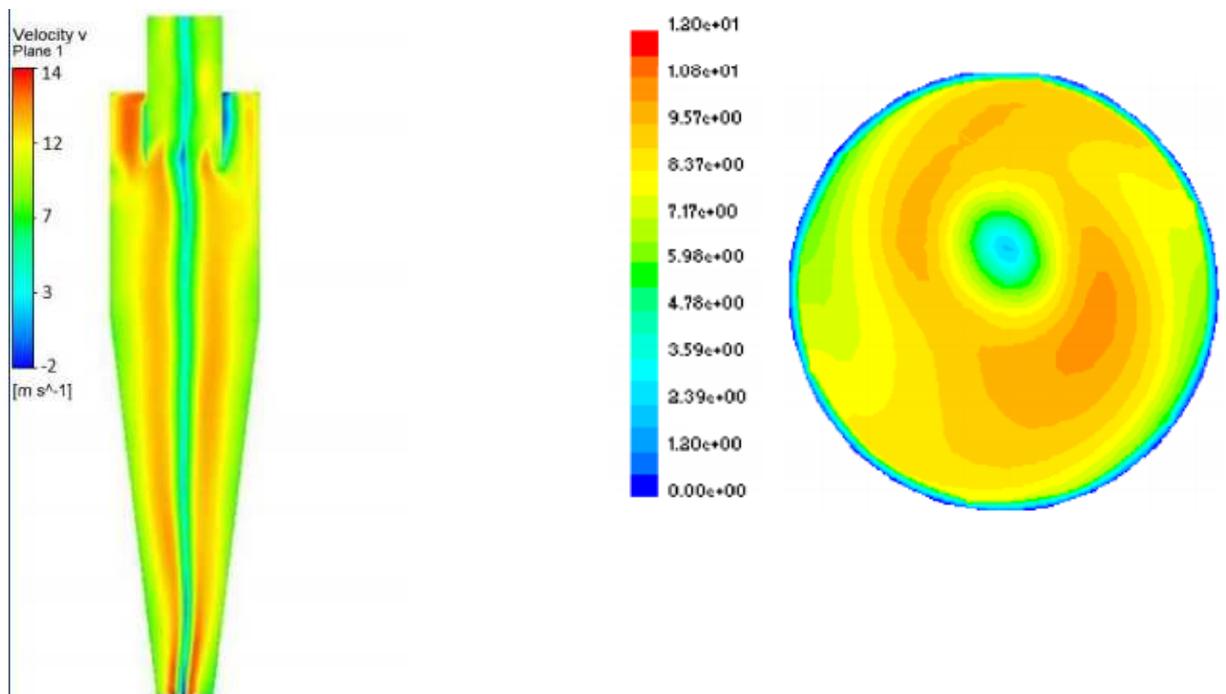


Figure 6 : Représentation des composantes de vitesse moyenne

Dans la figure 6, l'axe de l'écoulement est oscillatoire par rapport à l'axe du cyclone ; ce qui provoque en réalité une perte d'énergie ; ceci peut se remarquer par des vitesses très faibles. Par la suite, pour les particules proches de la paroi du conduit de sortie intérieurement, les vitesses sont nettement importantes.

4.2. Pression statique

Les figures (7) et (8) illustrent les différentes représentations de la pression statique pour différentes vitesses d'entrée. Ces figures montrent que le flux traversant l'entrée tangentielle de la configuration géométrique de cyclone provoque le flux à se plaquer contre les parois et engendre une forte pression loin de l'axe du cyclone, par contre au centre du cyclone, on remarque une forte dépression ressentie créant un tube d'écoulement important de faible pression oscillant autour de l'axe de cyclone.

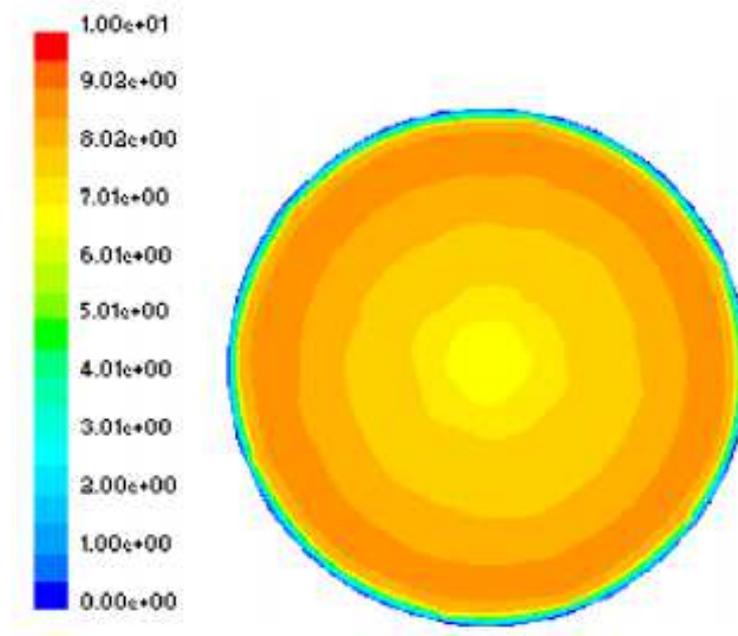


Figure 7 : Représentation de la pression statique

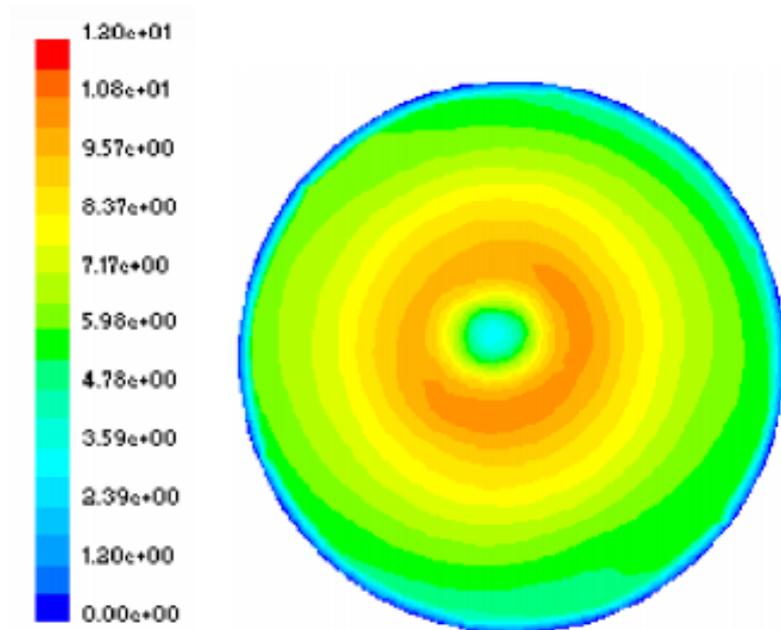


Figure 8 : Chute de pression à vitesse constante

4.3. Energie cinétique

Les figures (9) et (10) montrent des contours de l'énergie cinétique turbulente à différentes vitesses d'entrée.

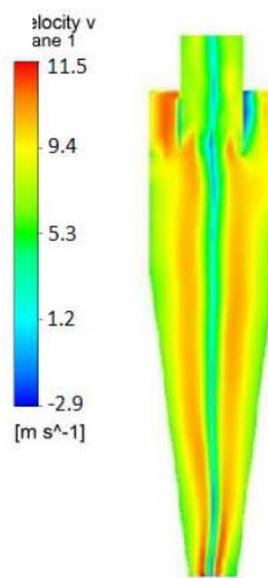


Figure 9 : Energie cinétique turbulente

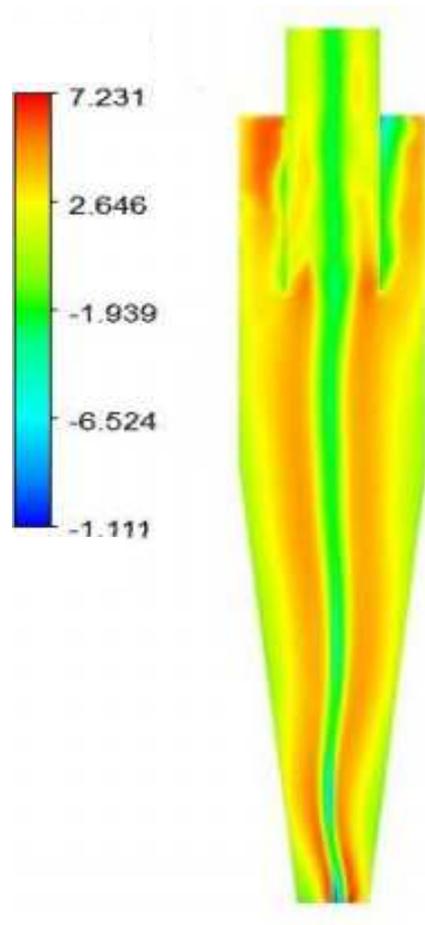


Figure 10 : Energies de l'écoulement

On constate que près du conduit de sortie, une création d'un fort gradient de vitesse qui appelle les particules à changer de direction ce qui génère en fait une augmentation de l'énergie cinétique turbulente. Où, l'énergie cinétique turbulente est maximale dans cette région fortement turbulente.

Cette configuration un peu originale est due sûrement au gradient de vitesse provoqué par l'effet du cône qui convertit autres énergies de l'écoulement en des augmentations de vitesse.

5. DISCUSSION

L'allure de la vitesse tangentielle se partage entre un vortex forcé qui a été traduit par une augmentation presque linéaire à partir du centre, ensuite elle chute, c'est le vortex libre. Les vitesses tangentielles simulées par le modèle RANS k-e sont importantes sous la conduite de sortie. Le mouvement oscillatoire autour de l'axe du cyclone donne des grandeurs radiales importantes et de signes différents de part et d'autres de l'axe. L'écoulement est tridimensionnel à cause de la composante radiale qui se manifeste fortement dans ces régions.

Le basculement de l'écoulement sur l'axe du cyclone, prouve que le modèle RANS capte bien les vitesses radiales que d'autres modèles [9]. Il se trouve que le maximum de l'énergie cinétique turbulente se situe dans une région forts gradients de vitesse, dans la zone de déviation de l'écoulement par rapport à l'axe du

cyclone. Il y a une accélération des particules dans la zone fond du cyclone, ce qui donne une échange plus important entre le fluide et la paroi due au frottement.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

L'étude des cyclones séparateurs a permis d'estimer les capacités et les limitations du modèle sous différentes conditions de fonctionnement. Le modèle de la simulation sera utilisé pour la conception et la réalisation du prototype pour l'obtention de résultats probants. La finalité de cette recherche est d'améliorer le moyen de production des orpailleurs en leur fournissant une technologie moderne d'extraction aurifère qui sera écologique, à haut rendement de production et à la portée de leur bourse. Cette technologie permettrait aussi de récupérer les autres minerais à haute valeur ajoutée qui sont perdus lors de l'extraction aurifère artisanale.

REFERENCES

- [1] J. Gimbut, T.G. Chuang, S.Y.T. Choong and A. Fakhru'l-Razi, 'A CFD Study on the Prediction of Cyclone Collection Efficiency', International Journal for Computational Method in Engineering Science and Mechanics, Vol. 6, N°3, pp. 161 – 168, 2005.
- [2] K. Talbi, A. Donnot, Z. Nemouchi et M.O. Rigo, 'Etude Expérimentale par LDA d'un Ecoulement Tridimensionnel Turbulent de l'Air dans un Cyclone', European Journal of Mechanical and Environmental Engineering, Vol. 48, N°4, pp. 268 – 276, 2003.
- [3] M. Bohnet, 'Influence of the Gas Temperature on the Separation Efficiency of Aerocyclones, Chemical Engineering and Processing, Vol. 34, N°3, pp. 151 - 156, 1995.
- [4] M. Slack, 'Cyclonic Separator', Fluent Europe Ltd., GTC1 - CT99 – 10030. [Http://www.qnet-cfd.net](http://www.qnet-cfd.net). 2002.
- [5] N. Kharoua, 'Etude de l'Aérodynamique dans un Cyclone à l'Aide du Logiciel Fluent', Mémoire de Magister, Département de Génie Mécanique, Université Mentouri de Constantine. Simulation numérique en régime turbulent de l'influence du débit et du champ... 515, 2004
- [6] P.A. Funk, S.E. Hughs and G.A. Holt, 'Entrance Velocity Optimization for Modified Dust Cyclones', The Journal of Cotton Science, Vol. 4, pp. 178 – 182, 2000.
- [7] S.V. Patankar, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Hemisphere. Washington, DC, pp. 115 - 120, 1980.
- [8] V. Potel, A. Donnot et M.O Rigo, 'Etude Expérimentale de l'Axisymétrie d'un Ecoulement Cyclonique', Actes du 13ème Congrès Français de Mécanique, Vol. 2, pp. 135 – 138, Poitiers 1-5 Sep.1997.
- [9] S.M. Fraser and M.Z. Abdullah, 'LDA Measurements on a Modified Cyclone', ASME Laser Anemometry, Vol. 229, pp. 395 - 403, 1995
- [10] J.J. Derksen and H.E.A. Van den Akker, 'Simulation of Vortex Core Precession in a Reverse-Flow Cyclone', AIChE Journal, Vol. 46, N°7, pp. 1317 – 1331, 2000