



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Thème

Etude du comportement d'un fluide
dans une chambre de séparation
tribo-électrostatique

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom **SEDDIKI**

Prénom **Khaoula**

Nom **LAIDI**

Prénom **Nadjet**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr BELKACEM Belkacem	MCB...IMSI.....	Président
Mr DELLIL Ahmed	Prof.IMSI.....	Examineur
Mr BOUHAMRI Noureddine....	MCB.IMSI.....	Encadreur

Année 2019 / 2020

Remerciements

Tout d'abord louanges et remerciements à Dieu pour m'avoir donné le courage et la force de terminer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur Ms. BOUHAMRI NOUR EDDINE pour le thème du sujet intéressant qu'il nous 'a proposé, son aide et ses encouragements au cours de ce travail et également pour ses précieux conseils qu'il nous 'a prodigué durant la réalisation de cette travaille.

Nous tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du département génie électrotechnique et automatique pour leur disponibilité et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Nos reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Nous remercions enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Dédicaces

A mes parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être, pour tout le soutien et l'amour que vous me portez, merci, merci et merci.

Avec toute ma tendresse.

A mes oncles, tantes.

A mon frère et ma sœur

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Affectueuse reconnaissance

Meilleurs vœux de succès dans vos études et dans votre vie.

A mes amis.

Vous m'avez encouragée et aidée quand j'avais besoin de vous. Je n'aurais jamais

Pu le faire sans vous. Mes sincères remerciements.

Aussi ; je dédie ce travail a mes collègues de promos qui sont des personnes exceptionnelles.

Enfin ; je dédie ce travail a mon encadreur et mes professeurs qui m'ont bien entouré tout au long de mes études.

Khaoula et Nadjet

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : La Triboélectricité et les Séparateurs Tribo-aéro-électriques	
I.1.Introduction.....	2
I.2. Définition de la triboélectricité	2
II.3. L'effet triboélectrique	3
I.4. Mécanismes d'apparition de charge	3
I.4.1.Règle de Cohen.....	3
I.4.2. Série triboélectrique.....	4
I.5. Dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique	5
I.5.1. Méthode de chargement par Cyclone.....	5
I.5.2. Méthode de chargement par cylindre tournant.....	6
I.5.3. Méthode de chargement par lit fluidisé	6
I.5.4.Méthode de chargement par ventilateur.....	6
I.6. Séparateur tribo- aéro-électrostatique.....	8
I.7. Séparateur à électrodes cylindriques tournantes.....	8
I.8. Séparateur électrostatique à deux disques tournants	9
I.9. Nouveau séparateur électrostatique à deux disques tournants.....	10
I.9.1. Electrodes	12
I.9.2. Chambre de séparation.....	12
I.9.3. Compresseur d'air.....	13
I.9.4 Boite de répartition de l'air injecté.....	13
I.10.Conclusion.....	14
Chapitre II : Notion sur l'écoulement et outils de calcul	
	15
II.1.Introduction.....	15
II.3. Régime d'écoulement laminaire	15
II.3.2. Ecoulement turbulence.....	16
II.3.3. Nombres adimensionnels caractérisant le transfert de chaleur	16
II.4. Formulation mathématique du problème.....	16
II.4.1.Equations en régime laminaire	17
II.4.1.1. Hypothèse simplificatrices	17
II.4.1.2. Equation gouvernantes	17
II.4.1.3.1Equation de continuité	18
II.4.1.3.2 Équation de quantité de mouvement.....	18
II.4.1.3.3 Équation d'énergie.....	19
II.4.2. Equations en régime turbulent	19
II.4.2.1. Généralité sur les équations de Navier-Stokes.....	19
II.4.2.2 Formulation différentielle.....	19
II.4.2.2.1 Équation de continuité (ou équation de bilan de la masse)	19
II.4.2.2.2 Équation de bilan de la quantité de mouvement.....	19
II.4.2.2.3 Équation de bilan de l'énergie.....	19
II.4.3.1 Expression en coordonnées cartésiennes	19
II.4.3.2 Équation de continuité	20
II.4.3.3 Équation de bilan de la quantité de mouvement.....	20
II.4.3.4 Équation de bilan de l'énergie	21
II.4.3.5 La moyenne d'ensemble	21
II.4.3.6. La moyenne temporelle	21

II.4.3.7. Les équations de Reynolds.....	21
II.4.3.7.1. Décomposition statistique.....	21
II.4.3.7.2. Règles de Reynolds	22
II.4.3.7.3. Les tensions de Reynolds.....	22
II.4.7.5. Modèle « - epsilon » standard	23
II.4.7.5.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k	23
II.4.7.5.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ...	24
II.4.7.5.3. Coefficient du modèle	24
II.4.7.5.4. Modèle RNG	24

Chapitre III: Simulation, résultats et discussions

III.1. Introduction	29
III.2.Simulation, résultats et discussions.....	29
III.2.1. Problématique	29
III.2.1. Présentation de la géométrie.....	29
III.2.2. Conditions aux limites.....	30
III.3. Maillage.....	30
III.3.1 Informations sur le maillage	31
III.3.2. Transfert de la géométrie vers CFX PRE	31
III.3.3 : Test de convergence	32
III.4. Choix du maillage	33
III.5. Résultats et discussions	35
III.5.1 Profil de pression pour différentes valeurs de la vitesse d'injection du fluide	35
III.5.2. Profil de pression pour différentes valeurs de la vitesse de rotation des rotors	36
III.5.3 Contours de pression	38
III.5.3.1 Impact de la vitesse de rotation des rotors	38
III.5.3.2. Impact de la vitesse du fluide	41
III.6.Conclusion.....	45
conclusion général	46
Résumé.....	47
bibliographie	

Introduction générale

Depuis quelques années nous remarquons, que la qualité de l'air et de la terre se détériore en raison de certains paramètres, dont notamment la pollution et l'accroissement du nombre de déchets. C'est pour cela qu'actuellement, de nombreux pays cherchent des alternatives pour pallier à ce problème. C'est ainsi, qu'apparaît la notion de développement durable, avec par exemple sur le plan énergétique, l'apparition des éoliennes ou de la géothermie. Cependant l'aspect du développement durable que nous avons choisi est l'étude paramétrique qui permet de connaître l'aspect de la séparation à sec qui se base sur l'application des champs électriques intenses qui nécessite le chargement des particules et cela pour arriver au secteur du recyclage, la valorisation des déchets et leur réutilisation.

Dans la décennie passée, l'application des codes de simulation devient de plus en plus utile et indispensable à fin de comprendre beaucoup de phénomènes physiques et surmonter des problèmes industriels. Une de ces applications, les écoulements aérodynamiques à travers un cavités qui sont largement utilisés dans les domaines sù-cités.

Parmi ces codes largement utilisés par les chercheurs et les industriels, on trouve le code CFX ICEM issu du logiciel Ansys.

Notre modeste travail est structuré de la façon suivante :

- ✓ Dans le premier chapitre, nous allons présenter les principes de fonctionnement de quelques séparateurs électrostatique à effet aero-triboélectrique utilisant l'injection de l'air à travers un compresseur d'air qui permet de faire pénétrer de la l'air dans la chambre de séparation assurant ainsi une fluidisation qui permet le chargement des particules des particules.
- ✓ Le deuxième chapitre décrit quelques notions sur l'écoulement et les différentes équations qui le gouvernement.
- ✓ A travers le troisième chapitre, nous allons illustrer les résultats de simulation obtenus en utilisant le logiciel Ansys CFX.

En fin, nous clôturons ce mémoire, par une conclusion.

*Chapitre I : La Triboélectricité et les Séparateurs Tribo-
aéro-électriques*

I.1. Introduction

Lorsque l'on soumet deux matériaux de nature différente soit à un simple contact soit à une épreuve de frottement, ils échangent des charges électriques. Ce phénomène est connu sous le nom de triboélectricité.

La séparation électrostatique est un terme spécifique donné à une importante classe de technologie de traitement de matériaux, largement utilisé pour le triage des mélanges granulaires grâce à des forces électriques agissant sur les particules chargées ou polarisées. Les granules sont dans un premier temps chargés électriquement puis séparés entre deux électrodes de haute tension.

Plusieurs procédés d'acquisition de charge par effet triboélectrique peuvent être utilisés pour charger les particules afin de séparer les mélanges granulaires issus de matériaux différents.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord passer en revue quelques concepts théoriques sur l'effet tribo-électrique. Ensuite, nous allons présenter les principes de fonctionnement de quelques séparateurs électrostatique à effet aéro-triboélectrique utilisant l'injection de l'air à travers un compresseur d'air qui permet de faire pénétrer de la l'air dans la chambre de séparation des particules. A cet effet nous souhaitons entamer une étude dynamique du comportement du fluide à l'intérieur d'un séparateur aéro-tribo-électrostatique de particules à disques rotatifs.

I.2. Définition de la triboélectricité

La triboélectricité désigne le phénomène électrostatique par lequel lorsque l'on met en contact deux matériaux de nature différente, une partie des électrons de la surface de contact d'un des deux matériaux est transférée à l'autre, et ce transfert subsiste lors de séparation. L'effet triboélectrique peut être augmenté si l'on fournit de l'énergie mécanique en frottent les matériaux l'un contre l'autre [1].

Le phénomène de la triboélectricité est à l'origine du mot électricité, puisque ce sont les grecs de l'antiquité qui en sont les auteurs. Ces derniers, après avoir observé les étincelles et les attirances provoquées par l'ambre frotté ont donné à ces étranges phénomènes un nom: *ἤλεκτρον* électron le mot grec pour « ambre jaune ». En réalité, derrière ce mot se cache un phénomène connu par tous et depuis des millénaires ; des cheveux qui se dressent sur la

tête au passage du peigne, du papier qui se colle à la règle de l'écolier jusqu'aux orages violents, la triboélectricité est partout.

I.3. L'effet triboélectrique

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges [2].

L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent au transfert de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse.

I.4. Mécanismes d'apparition de charge

I.4.1. Règle de Cohen :

Lorsque deux matériaux sont frottés l'un contre l'autre, celui à constante diélectrique plus élevée se charge positivement. En effet, dans ce cas l'isolant se polarise plus facilement et cède des électrons à l'autre corps contre lequel il est frotté [3].

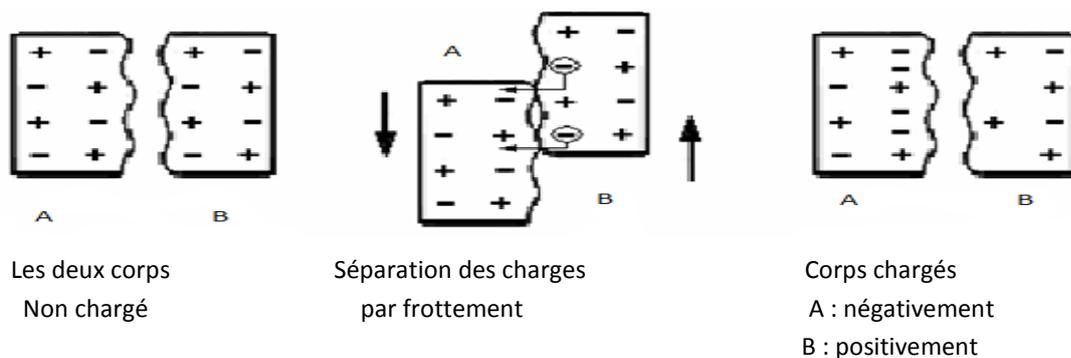


Figure I.1 : Représentation d'électrisation par frottement (triboélectricité)

o Equation de Beach

La règle de Cohen est mise en équation expérimentalement par Beach qui donne la densité de charge superficielle (C/m) :

$$\rho_s = 15 \cdot 10^{-6} (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})$$

Où ϵ_{r1} , ϵ_{r2} sont les permittivités relatives respectives des deux corps qui sont électrisés par frottement [4].

I.4.2. Série triboélectrique

Il peut arriver qu'un même corps s'électrise positivement par frottement avec un corps déterminé, et négativement avec un autre de nature différente.

Un classement des corps triboélectriques peut être fait en fonction du signe de l'électricité qu'ils acquièrent. Suivant ce classement (tableau I.1), chaque corps acquiert une charge positive par friction contre tout autre corps classé après lui [5].

(+)
(Acquisition d'une charge positive)
Plexiglas
Asbeste
Bakélite
Verre
Quartz
Mica
Nylon
Laine
Soie
Aluminium
Papier
Coton
Bois
Ambre
Nickel
Argent
Or, platine
Acétate
Polyester
Polystyrène
Acrylique
Polyuréthane
Polyéthylène
Polypropylène
PVC
Téflon
(Acquisition d'une charge négative)
(-)

Tableau I.1: Représentation de la série triboélectrique

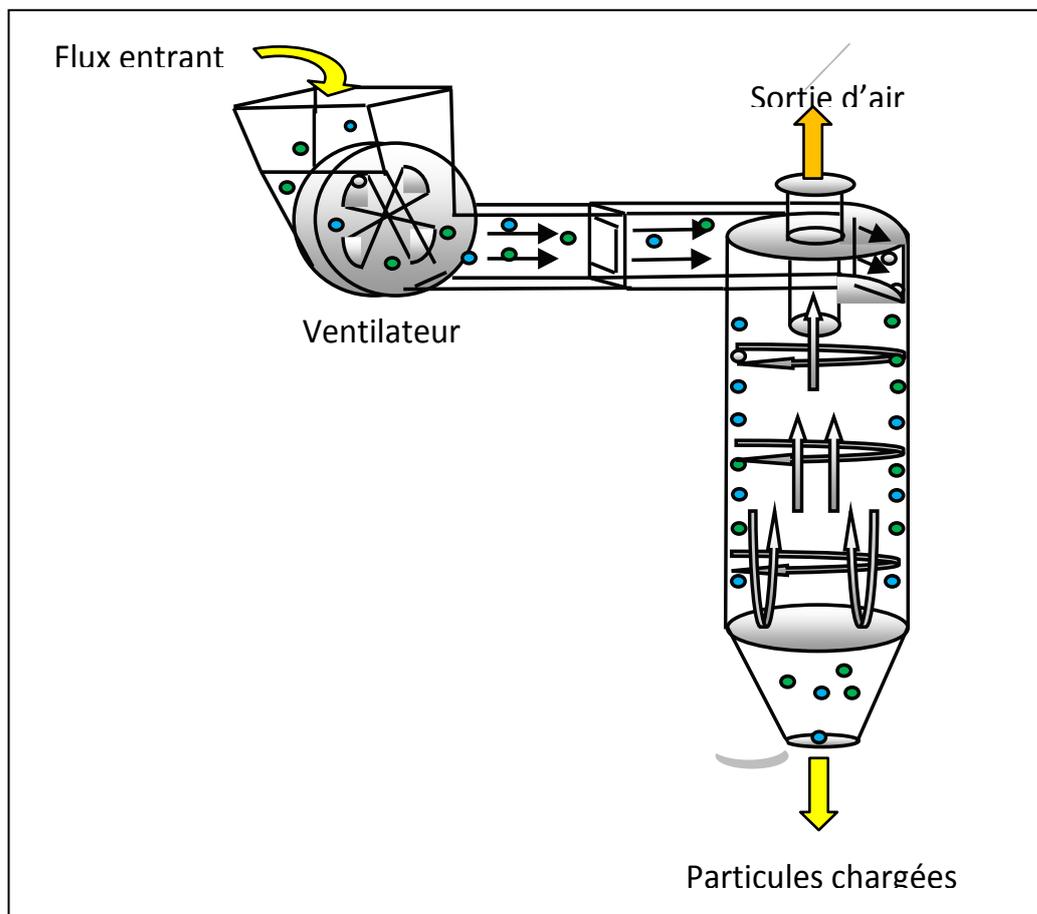
Si on frotte du verre avec du mica, le verre se charge positivement et le mica se charge négativement. Par contre, si on frotte le mica avec la laine, cette dernière se charge

négativement alors que le même mica se charge ici positivement : La charge acquise par le matériau dépend de son emplacement dans la série triboélectrique.

I.5. Dispositifs d'acquisition de charge triboélectrique

I.5.1. Méthode de chargement par Cyclone

Ce dispositif qui est généralement utilisé pour le dépeussierage dans les ateliers a été réalisé pour être employé comme moyen d'acquisition de charge triboélectrique (figure I. 2).



Les particules à charger sont « soufflées » par le ventilateur à l'intérieur du cyclone dans lequel elles subissent un frottement continu contre la paroi interne.

Dans ce cas, l'acquisition de charge s'effectue plutôt lors du contact des particules avec cette paroi [6].

I.5.2. Méthode de chargement par cylindre tournant

Les particules entrent d'un côté du tambour et sortent de l'autre côté totalement chargées, à l'intérieur les particules sont en collision quand le tambour tourne à une certaine vitesse comme c'est illustré dans la figure (I.3) [7].

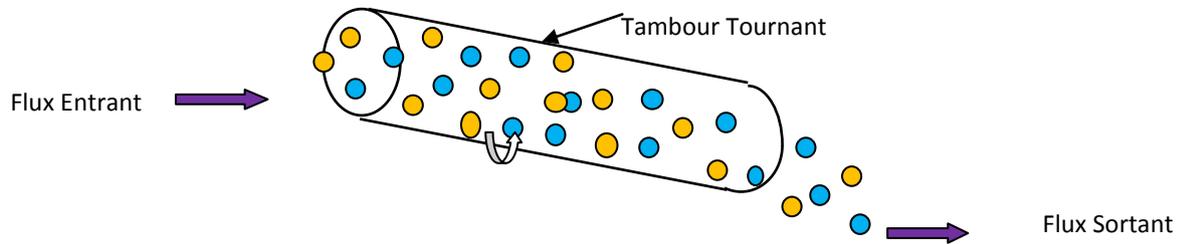


Figure I.3 : chargement par tambour tournant.

I.5.3. Méthode de chargement par lit fluidisé

Ce procédé est celui qui est le plus utilisé pour l'acquisition de charge par effet triboélectrique. Le mélange de particules déposé sur un support en tamis est ensuite mis en agitation en soufflant de l'air à l'aide d'un ventilateur (figure I.4).

Les particules qui sont ainsi en agitation dans un lit fluidisé acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles. Il y a dans ce cas peu de charge acquise par collisions avec la paroi du dispositif [8].

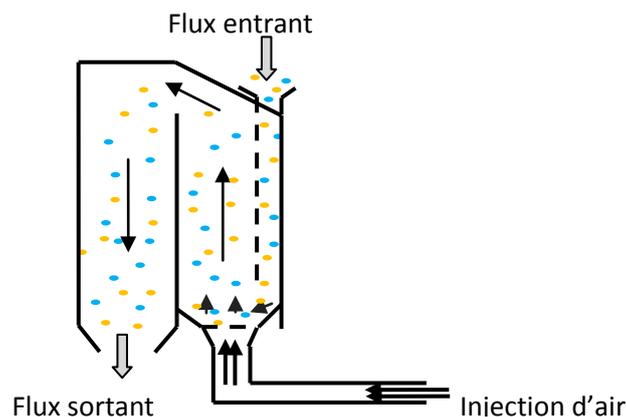


Figure I.4 : Représentation schématique du dispositif d'acquisition de charge électrique par lit fluidisé.

I.5.4. Méthode de chargement par ventilateur

Le ventilateur tourne à une vitesse adéquate, ce qui provoque la collision des particules entre elles et des collisions entre particules et parois, entraînant ainsi leur chargement triboélectrique [9].

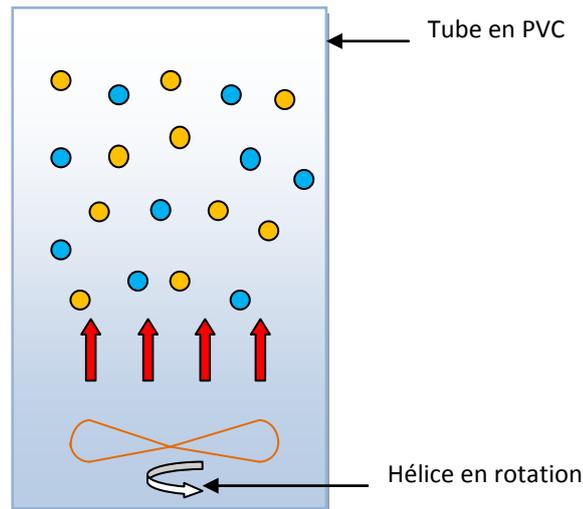


Figure I.5 : Chargement par ventilateur

I.6. Séparateur tribo- aéro-électrostatique

Afin d'assurer une pression uniforme dans chaque section horizontale de la chambre de séparation, l'installation est équipée d'une chambre d'air remplie de billes en verre connectée à un compresseur à son extrémité inférieure et limitée à son extrémité supérieure par le diffuseur d'air. Un dispositif de chauffage, situé en amont de la chambre d'air, permet d'ajuster la température de l'air de fluidisation entre 35 et 45°C afin de réduire l'humidité superficielle des granules et d'améliorer les conditions d'électrisation par effet tribo-électrique [10].

Chaque granule chargée positivement ou négativement est soumise à la force de Coulomb, dans le champ électrique horizontal créé entre deux électrodes de type tapis roulants métalliques et alimentées des générateurs de haute tension continue ajustable. Les électrodes sont situées à l'intérieur de la chambre de séparation.

Les granules chargés positivement se déplacent dans le sens du champ électrique vers l'électrode négative et les granules chargés négativement sont dirigés vers l'électrode positive.

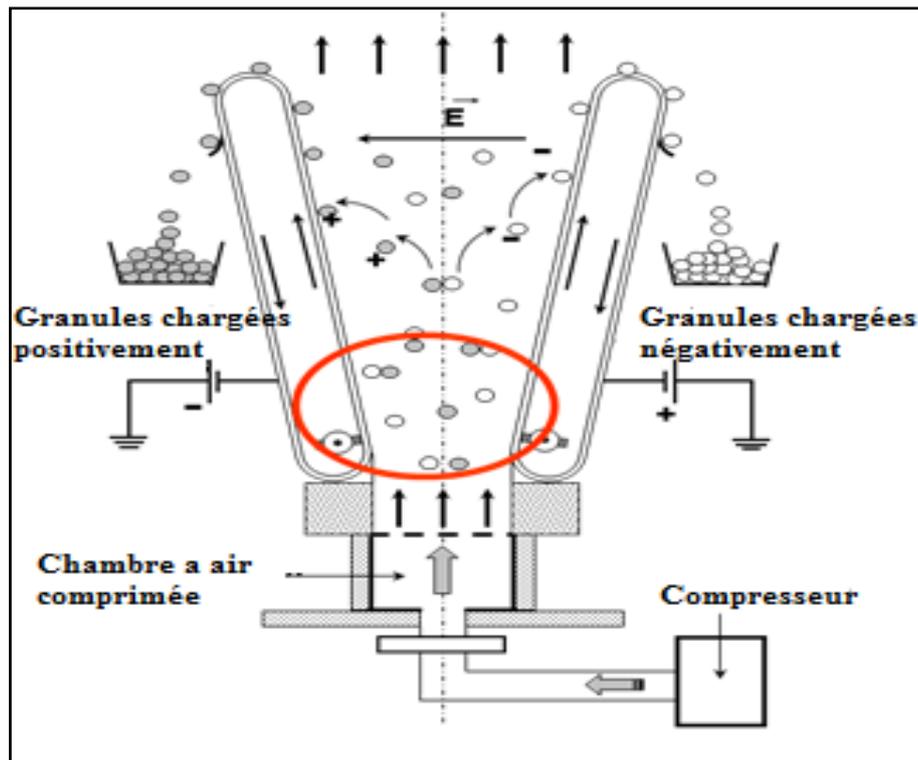


Figure I.6: Principe de fonctionnement d'un séparateur tribo-aéro électrostatique [11].

I.7. Séparateur à électrodes cylindriques tournantes

Le séparateur fonctionne selon un procédé électrique basé sur l'acquisition de charge et l'application d'un champ électrostatique intense. Il est utilisé pour séparer des particules issues de deux polymères différents. Les particules subissent à l'intérieure de la chambre plusieurs collisions entre elles et entre les parois de la chambre, ce qui provoque leur chargement par frottement (effet triboélectrique). Les granules du premier matériau acquièrent une charge positive et les granules de l'autre matériau prennent une charge négative. Ces particules sont soumises à un champ électrique horizontal intense, ce champ est produit entre deux électrodes métalliques de forme cylindriques, reliées à deux sources de tensions continues, ayant des polarités opposées. Les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive et les particules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative [12].

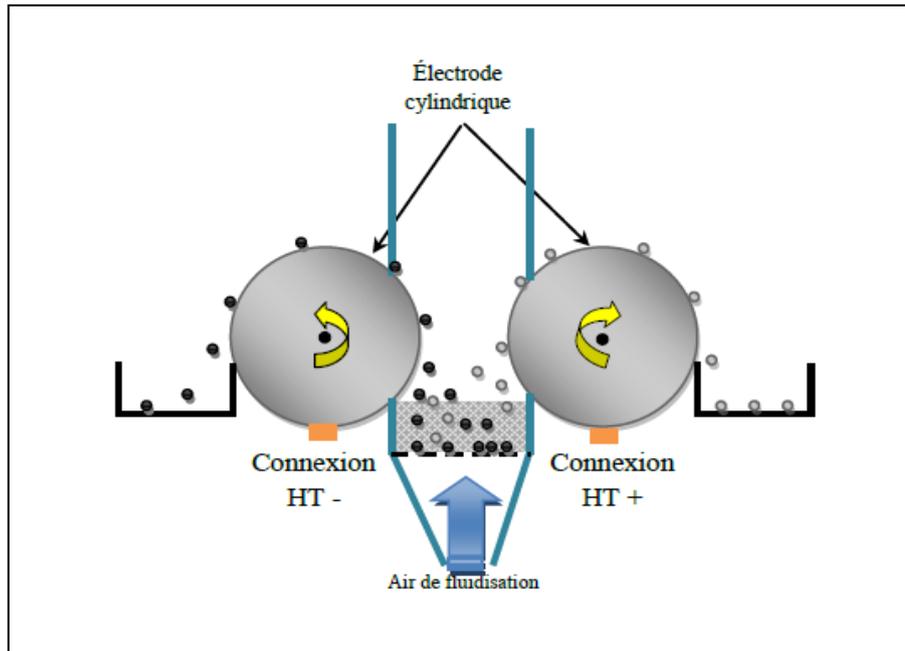


Figure I.7 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à cylindres

I.8. Séparateur électrostatique à deux disques tournants

Ce dispositif, qui fait l'objet de l'étude de cette mémoire, a été réalisé pour effectuer les premières expériences de séparation triboélectrique des particules fines, dans le laboratoire APELEC à l'université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbes [13]. Le principe de fonctionnement est comme suit :

Deux disques métalliques (1) sont montés sur un même arbre (2), celui-ci étant fixé à l'arbre d'un moteur électrique (3) tournant à une vitesse modérée de quelques dizaines de tours par minutes, l'arbre étant maintenu par deux paliers (4). Les deux disques sont plongés en partie dans un lit de mélange de particules (5) issus de matériaux différents ; le mélange de particules est déposé sur un support qui est un tamis à mailles très fines (6), ne laissant passer que l'air et empêchant le mélange de tomber.

Le produit granulaire à trier est introduit à l'intérieur du dispositif à travers une goulotte (7). Un flux d'air généré par un compresseur et entrant à travers une ouverture (8) située en dessous du lit fluidisé provoque la fluidisation, le flux d'air doit être délivré avec un débit déterminé. Les disques qui sont reliés à deux alimentations de haute tension de polarités opposées, soulèvent lors de leur rotation les particules chargées.

Des balais (9) sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques. Un collecteur (10) comprenant deux compartiments, un pour chaque type de matériau, permet de collecter les produits après leur séparation [14].

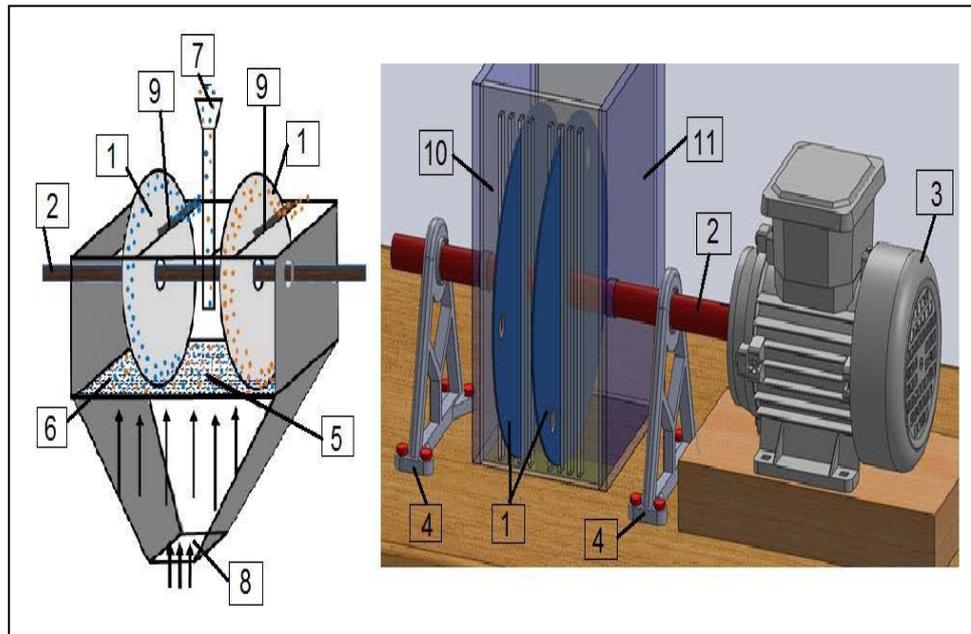


Figure I.8: Représentation schématique du Séparateur tribo-électrostatique à disques tournants.

I.9. Nouveau séparateur électrostatique à deux disques tournants

Ce dispositif a été réalisé pour effectuer les premières expériences de séparation du type triboélectrique de particules de taille fines au sein du laboratoire APELEC de l'université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.

Deux disques métalliques sont montés séparément, chacun sur son arbre en téflon, qui sont successivement fixés à leur tour sur l'arbre de deux moteurs électriques asynchrone, l'arbre étant maintenu par deux paliers. Les deux disques sont plongés en partie dans un lit de mélange de particules issues de matériaux différents. Le mélange de particules est déposé sur un support qui est un tamis à mailles très fines, ne laissant passer que l'air et empêchant le mélange de particules de tomber.

Le produit poudreux granulaire à trier est introduit à l'intérieur du dispositif à travers la partie supérieure de la chambre de séparation. Un flux d'air généré par un compresseur et entrant à travers une ouverture située en dessous du lit fluidisé provoquant la fluidisation.

Le flux d'air doit être délivré avec un débit déterminé. Les disques qui sont reliés à deux alimentations de haute tension de polarités opposées, soulèvent lors de leur rotation les particules chargées.

Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques. Un collecteur comprenant deux compartiments, un pour chaque type de produit collecté après leur séparation [15].

A travers toutes les expériences effectuées, l'équipement primordial est le séparateur triboélectrique à deux disques tournants (figure I.9).

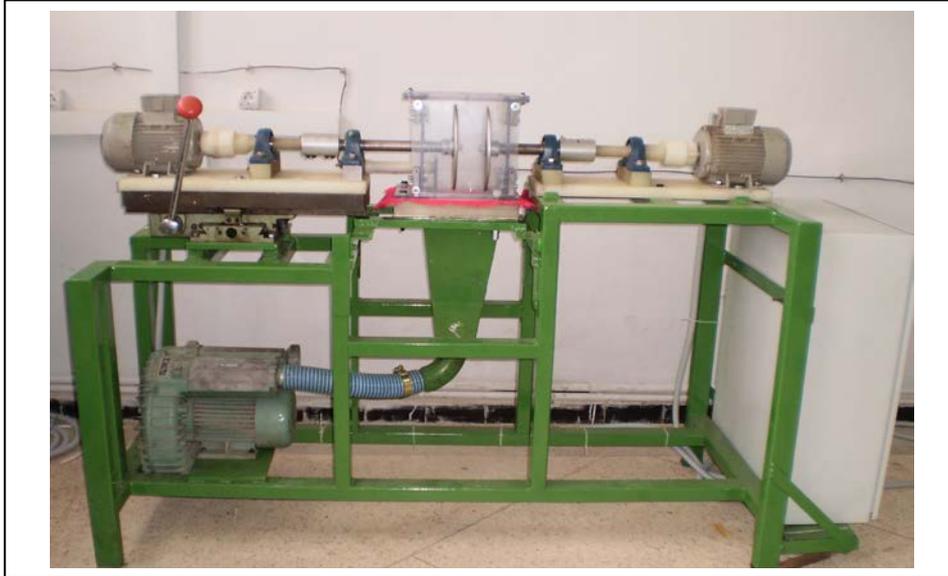


Figure I.9 : Photographie du séparateur tribo-électrostatique à deux disques tournants.

Comme le montre le schéma descriptif global de l'appareil représenté à la figure I.10 l'appareil comprend dans sa conception des éléments importants tels que les deux disques et la chambre de séparation.

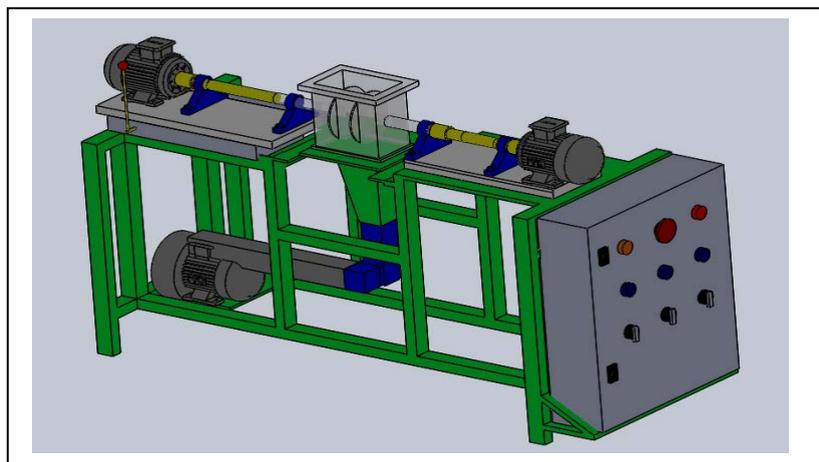


Figure I.10: Représentation schématique en 3D du séparateur tribo-électrostatique à disques tournants.

I.9.1. Electrodes

Dans la chambre de séparation se trouvent deux disques tournants en acier de diamètre de 220 mm et d'une épaisseur de 5 mm, le premier est relié à une source de haute tension de polarité positive et le deuxième relié à une source de haute tension de polarité négative.

Chaque électrode est fixée d'une manière solidaire à l'arbre (en matière isolante en Téflon) du moteur asynchrone.

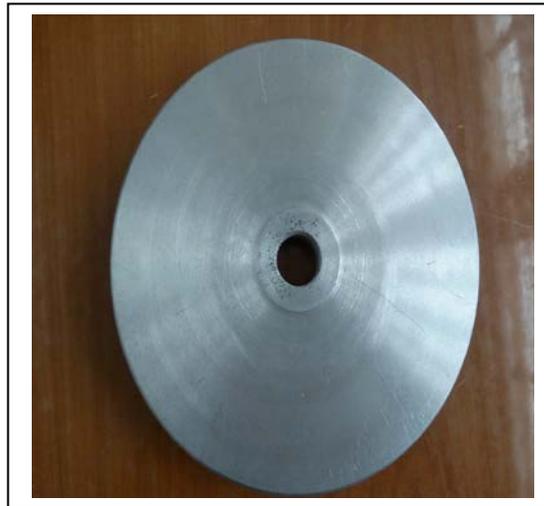


Figure I.11 : Disque tournant (électrode).

I.9.2. Chambre de séparation

La chambre de séparation est réalisée en paroi de plexiglas d'une forme parallélépipédique de dimensions 240 x 210 mm et une hauteur de 240 mm (figure I.12).

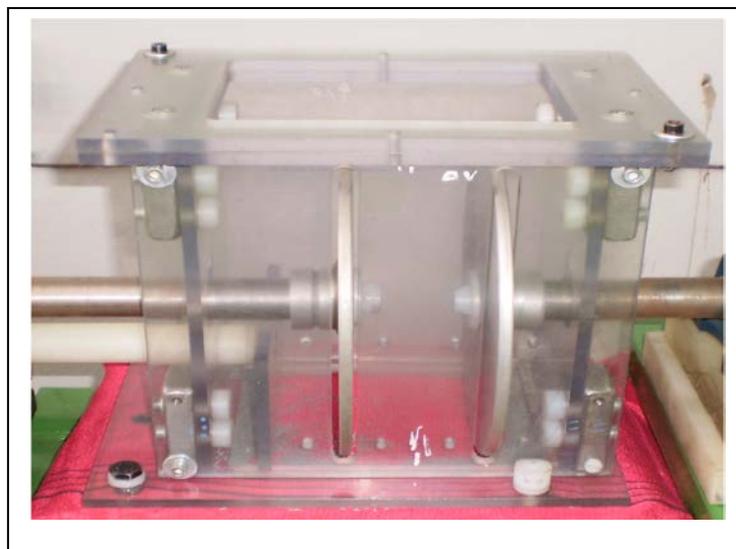


Figure I.12 : Photographie de la chambre de séparation.

La paroi plexiglas des faces de la chambre est convertible, elle contient deux fentes supportant des balais pour permettre la rotation des deux disques et récupérer le produit séparé.

Le dépôt du mélange est effectué sur un tamis à mailles très fines, les disques vont faire sortir les particules fines de l'intérieur de la chambre vers les bacs collecteurs qui se trouvent en dehors de la chambre (la partie supérieure sera fermée avant de démarrer le processus de fluidisation et de séparation).

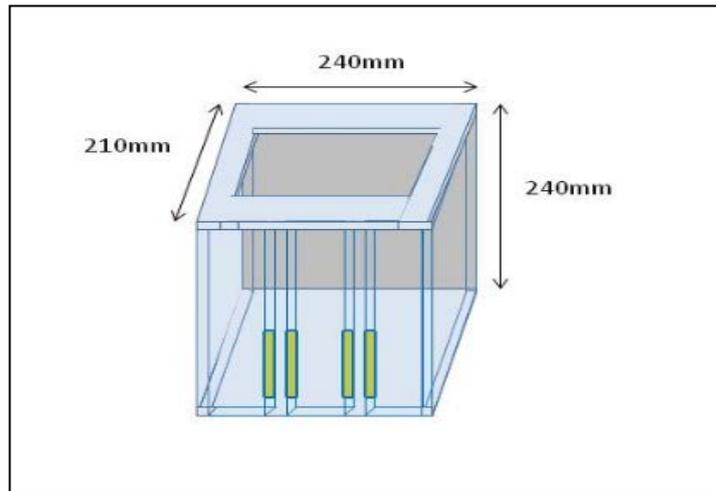


Figure I.13 : Schéma descriptif de la chambre de séparation.

I.9.3. Compresseur d'air

Le rôle du compresseur d'air est l'injection de l'air comprimé dans la chambre de fluidisation à travers le répartiteur d'air (souffleur de 2,2 kW, 220 / 380 V, 4,7A)

Un mouvement d'air aléatoire se crée à l'intérieur de la chambre, ce qui donne une tribo-électrisation du produit mis à l'intérieur de la chambre de séparation. Le chargement des particules fines se fait grâce à la collision entre elles, entre les particules et les parois, en variant le débit d'air de fluidisation du souffleur à l'aide d'un variateur de vitesse.

I.9.4 Boite de répartition de l'air injecté

La boite de répartition de l'air est réalisée avec des parois en fer d'une forme trapézoïdal. Le rôle de cette boite est de répartir l'air injecté par un compresseur sur toute la surface de la chambre de séparation, pour bien assurer la fluidisation et l'agitation des particules fines.

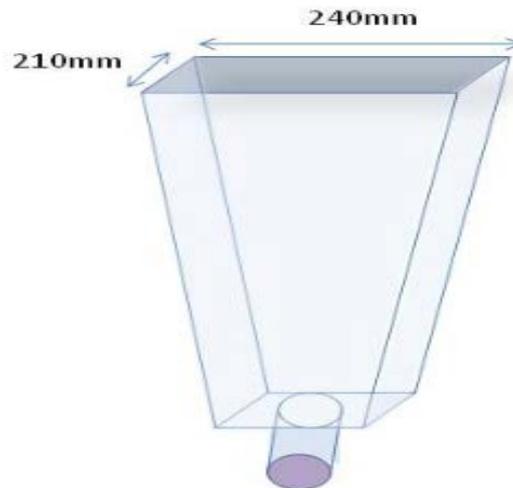


Figure I.14 : Schéma de la boîte de répartition de l'air injecté.

I.10. Conclusion

Le but de ce chapitre est de donner une idée générale sur les processus de chargement triboélectrique et expliquer les différentes techniques de séparation des particules et leurs principes de fonctionnement.

Le nouveau séparateur est constitué de plusieurs éléments, identiquement à d'autres équipements industriels, tous aussi indispensables que complémentaires les uns des autres.

Après la description du nouveau séparateur de tribo-électrostatique, nous nous intéressons dans la suite du travail à procéder à une étude dynamique du comportement de fluide dans la chambre de séparation.

Chapitre II : Notion sur l'écoulement et outils de calcul

II.1. Introduction

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec les autres molécules situées dans une région de haute température et récupèrent une partie de leur énergie. Dans ce cas un écoulement transporte le fluide et son énergie emmagasinée dans les molécules du fluide transportée sous l'effet de leur mouvement. La transmission de chaleur par convection est désignée selon l'écoulement du fluide par convection libre ou convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de température on dit que la convection est naturelle ou libre par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe telle qu'une pompe ou un ventilateur le processus est appelé convection forcée.

II.2. Convection forcée

La convection forcée est provoquée par une circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide où le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle tels que chauffage central avec accélérateur, chauffages électriques avec soufflerie, chauffe-eau solaire et four à convection de cuisinière. Le corps humain a son propre système de convection forcée, la circulation sanguine.

II.3. Régime d'écoulement

L'écoulement d'un fluide visqueux peut être de deux types ; laminaire ou turbulent, la transition entre ces deux régimes dépend de la vitesse, la densité et la viscosité du fluide. Le type d'écoulement dépend du diamètre de la canalisation et du fluide.

Si $Re < 2000$, on a un régime laminaire

$Re > 3000$, on a un régime turbulent

II.3.1. L'écoulement laminaire

On ne s'est pas résolu les équations de la dynamique des fluides dans le cas plus générale, la difficulté vient de ce qu'elles ne sont pas linéaires. Dans un petit nombre de cas, où les conditions aux limites sont pas particulièrement simples, il est possible cependant de trouver une solution : les écoulements correspondants sont appelés laminaires.

Quand un écoulement est laminaire, les lignes de courants (confondues avec les trajectoires) sont des courbes fixes dans l'espace et ne se mélangent pas au cours du mouvement ; les couches fluides glissent les sur les autres, sans qu'il y ait passage de particule d'une couche à l'autre. Au voisinage d'un solide elles épousent la forme géométrique de la paroi [16].

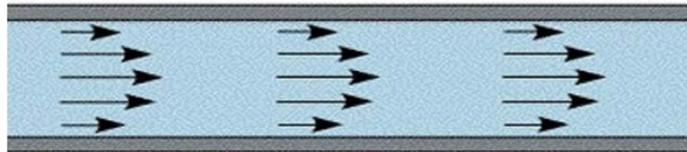


Figure II.1 : Ecoulement laminaire

II.3.2. Ecoulement turbulent

Il est simple de constater qu'il n'existe pas toujours de solution simple de l'équation de Navier Stokes pour certaine configuration d'écoulement. Dans la réalité physique, les sources d'instabilité sont liées à la viscosité et au régime d'écoulement. En réalité les perturbations croissent pour engendrer les structures tourbillonnaires qui sont connectées par l'écoulement. Pour chaque configuration d'écoulement est turbulent. Cette limite critique n'est qu'une grossière indication de la transition entre écoulement laminaire et turbulent [16].

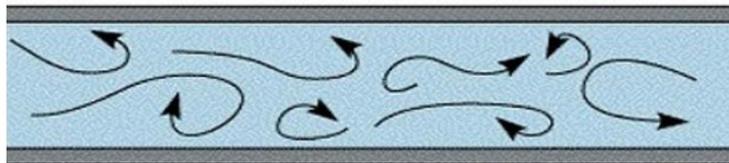


Figure II.2 : Ecoulement turbulent

II.3.3. Nombres adimensionnels caractérisant le transfert de chaleur

On définit le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\text{Forces d'inertie}}{\text{Forces de viscosité}} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (\text{II.1})$$

ρ = la densité (kg/m³)

v = vitesse moyenne d'écoulement (m/s)

D = diamètre de la canalisation (m)

μ = Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

Re : Le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

Coefficient de frottement C_f :

$$C_f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (\text{II.2})$$

Où ΔP est la chute de pression. Sa dimension est en N/m² ou Pa.

Nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{\text{Transfert par convection}}{\text{Transfert par conduction}} = \frac{h.D}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

h : Coefficient d'échange par convection [Wm⁻²K⁻¹]

λ : Conductivité thermique du fluide [Wm⁻¹k⁻¹]

Nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\text{Diffusivité de quantité de mouvement}}{\text{Diffusivité thermique}} = \frac{\mu.C_p}{\lambda} \quad (\text{II.4})$$

II.4. Formulation mathématique du problème

II.4.1. Equations en régime laminaire

Les équations en régime laminaire sont l'équation de conservation de la masse, les équations de Navier-Stokes, l'équation de conservation de l'énergie dans le fluide et dans le solide.

II.4.1.1. Hypothèses simplificatrices

De façon à obtenir un modèle mathématique simple qui décrit ce problème, on suppose :

- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels.
- L'écoulement de fluide est supposé laminaire et stationnaire.
- Les propriétés physiques du fluide (C_p , μ , λ_f , ρ) et du solide (λ_s) sont constantes.
- La température de parois (supérieure et inférieure) constante.

II.4.1.2. Equation gouvernantes [17]

Les équations de la conservation peuvent se généraliser sous une seule forme d'équations aux dérivées partielles.

Si on note toute variable générale mesurée par le symbole ϕ , L'équation différentielle générale s'écrit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho V\phi) = \text{div}(\Gamma\phi \overrightarrow{\text{grad}}\phi) + S\phi \quad (\text{II.5})$$

Où :

$\Gamma\phi$:est le coefficient diffusion.

$S\phi$:est le terme source.

V :est le vecteur vitesse.

Les quatres termes de l'équation (II.5) représentent :

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)$:Terme transitoire d'accumulation.

$\text{div}(\rho V\phi)$:Terme convectif.

$\text{div}(\Gamma\phi \overrightarrow{\text{grad}}\phi)$:Terme diffusif.

$S\phi$:Terme source.

Type d'équation	ϕ	S
Equation d'énergie	T	0
Equation de quantité de mouvement suivant X	u	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right)$
Equation de quantité de mouvement suivant Y	v	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right)$
Equation de continuité	1	0

Tableau II.1: différentes désignations de ϕ et S

On peut considérer que les équations suivantes décrivent le phénomène d'écoulement à l'intérieur d'un échangeur de chaleur :

II.4.1.3.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.6})$$

Où u et v étant les composantes du champ de vitesse (u, v) dans les directions axiale (ox) et radiale (oy) respectivement.

II.4.1.3.2 Équation de quantité de mouvement

Suivants x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

Suivants y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

II.4.1.3.3 Équation d'énergie

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.9})$$

II.4.2. Equations en régime turbulent

II.4.2.1. Généralité sur les équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles, non linéaires, qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. En régime turbulent, la résolution de ces équations nécessite un très grand nombre de points de calcul, ce qui rend la simulation particulièrement coûteuse. Un des moyens de contourner ce problème consiste à ne considérer que les grandeurs moyennées. Dans ce chapitre, les équations de Navier-Stokes pour un fluide compressible et newtonien sont d'abord présentées. Puis l'opérateur de moyenne qui sera appliqué à ces équations est introduit. Enfin, la façon d'obtenir le système moyenné est exposée.

II.4.2.2 Formulation différentielle

Il existe bien des formes des équations de Navier-Stokes. Nous n'en présenterons que certaines. Ces formes dépendent aussi des notations utilisées. Ainsi, il existe plusieurs façons équivalentes d'exprimer les opérateurs différentiels.

La formulation différentielle de ces équations est la suivante [18]:

II.4.2.2.1 Équation de continuité (ou équation de bilan de la masse)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{II.10})$$

II.4.2.2.2 Équation de bilan de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (\text{II.11})$$

II.4.2.2.3 Équation de bilan de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p) \vec{v}] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} - \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + r \quad (\text{II.12})$$

Dans ces équations :

t : représente le temps (unité SI : s)

ρ : désigne la masse volumique du fluide (unité SI : kg.m⁻³)

$\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$: désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : m.s⁻¹)

p : désigne la pression (unité SI : Pa)

$\vec{\tau} = (\tau_{ij})_{i,j}$: est le tenseur des contraintes visqueuses (unité SI: Pa)

\vec{f} : désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide (unité SI:N.kg⁻¹)

e : est l'énergie totale par unité de masse (unité SI :J.kg⁻¹)

\vec{q} : est le flux de chaleur perdu par conduction thermique (unité SI :J.m⁻².s⁻¹)

r : représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement (unité SI : J.m⁻³.s⁻¹)

Remarque :

L'énergie totale peut se décomposer en énergie interne u et en énergie cinétique selon

$$e = u + \frac{1}{2} \vec{v} \cdot \vec{v} = u + \frac{1}{2} v^2 \tag{II.13}$$

L'opérateur nabla

$$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \tag{II.14}$$

En coordonnées cartésiennes, c'est un opérateur de dérivation spatiale du 1^{er} ordre. Les opérateurs gradient, divergence et laplacien peuvent s'écrire :

$$\text{div } \vec{\alpha} = \vec{\nabla} \cdot \vec{\alpha} \tag{II.15}$$

$$\overrightarrow{\text{grad}} A = \vec{\nabla} A \tag{II.16}$$

$$\Delta A = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} A) = \nabla^2 A \tag{II.17}$$

II.4.3.1 Expression en coordonnées cartésiennes [19]

En coordonnées cartésiennes(x_1, x_2, x_3), les équations de Navier-Stokes s'écrivent :

II.4.3.2 Équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \tag{II.18}$$

II.4.3.3 Équation de bilan de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial (\rho v_j)}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \tag{II.19}$$

II.4.3.4 Équation de bilan de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} [(\rho e + p)v_i] = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij} v_j) + \sum_{i=1}^3 \rho f_i v_i - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \dot{q}_i}{\partial x_i} + r \tag{II.20}$$

II.4.3.5 La moyenne d'ensemble

- On réalise N expériences indépendantes portant sur le même écoulement.
- On enregistre à la i^{ème} expérience la valeur d'une même quantité à la même position et au bout du même temps, soit $f^{(i)}(x,t)$

La moyenne d'ensemble de la quantité f à la position x et à l'instant t est défini par :

$$\overline{f(x,t)} = \frac{1}{N} \sum_i^N f^{(i)}(x,t) \tag{II.21}$$

II.4.3.6. La moyenne temporelle

La moyenne temporelle est définie pour une seule expérience, à une seule position, l'écoulement étant stationnaire sur le temps t.

$$\bar{U}(x_j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t U_i(x_j) dt \tag{II.22}$$

$$\bar{P} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t P dt \tag{II.23}$$

II.4.3.7. Les équations de Reynolds

II.4.3.7.1. Décomposition statistique

Pour résoudre ce système une approche statistique est utilisée. Les grandeurs caractéristiques instantanées de l'écoulement turbulent seront décomposées selon les règles de Reynolds comme suit:

Le premier représente le mouvement moyen et le second c'est le mouvement fluctuant, soit:

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i, \overline{u'_i} = 0 \tag{II.24}$$

$$P_i = \bar{P} + p', \overline{p'} = 0 \tag{II.25}$$

En général, la quantité $f(x,t)$ est décomposée en deux parties distinctes

$$f = \bar{f} + f' \tag{II.26}$$

\bar{f} : Est la partie moyenne (d'ensemble)

f' : Est la partie fluctuante

II.4.3.7.2. Règles de Reynolds

En utilisant les règles dites "règles de Reynolds", Hinze (1975) [20]. Elles se présentent comme suit :

$$\overline{\phi'} = 0$$

$$\overline{\bar{\phi}} = \bar{\phi}$$

$$\overline{f\bar{\phi}} = \bar{f}\bar{\phi}$$

$$\overline{f + g} = \bar{f} + \bar{g}$$

$$\overline{f \cdot g} = \bar{f} \cdot \bar{g} + \overline{f' \phi'} , \overline{f' \phi'} \text{ (nouvelle variable du problème)}$$

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \tag{II.27}$$

II.4.3.7.3. Les tensions de Reynolds

Le formalisme des règles de Reynolds conduit en prenant la moyenne d'équation aux équations de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{U} + u') + (\bar{U}_j + u'_j) \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i + u'_i) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{P} + P') + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_i + u'_i) \right) \tag{II.28}$$

On moyenne ensuite ces équations et après réarrangement, on retrouve l'équation de continuité et celles de Navier-Stockes moyennées.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0, \text{ (Équation du champ moyen)}$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \underbrace{\overline{u'_i u'_j}}_{\text{terme de Reynolds}} \right) \tag{II.29}$$

Les termes $\overline{u'_i u'_j}$ donnent naissance aux tensions de Reynolds. Ils proviennent du non linéarité des équations de Navier Stockes et s'interprètent comme des contraintes. Le système (2.12) et (2.13) comporte plus d'inconnues que d'équation, c'est un système ouvert. Le problème qui se pose à ce stade est le problème de fermeture. On a 4 équations au total dont 3 pour la quantité de mouvement et 1 pour la continuité mais le nombre d'inconnues est maintenant égal à 10 ! $U_i, i = 1,2,3, p$ et $6 \overline{u'_i u'_j}$) d'ou la nécessité de la modélisation des équations de Reynolds. Pour cela, beaucoup de chercheurs se sont investis dans le domaine et plusieurs contributions de modèles de résolution ont été proposées. Parmi ces modèles on peut citer deux modèles les plus

utilisés qui sont le modèle $(k - \varepsilon)$ et le modèle des contraintes de Reynolds (appelé aussi RSM).

Le tenseur de Reynolds est alors défini par la matrice suivante :

$$R_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_3 u'_1} & \overline{u'_3 u'_2} & \overline{u'_3 u'_3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

II.4.7.5. Modèle « $k - \varepsilon$ » ($k - \varepsilon$) standard [30] :

Les insuffisances du modèle $(k - l)$ ont conduit à une sorte de fuite en avant qui s'est essentiellement focalisée sur l'élaboration d'une nouvelle équation de bilan couplée avec l'équation en k , et supposée apporter des éléments plus solides que les hypothèses sur le paramètre « l », ce qui a donné naissance à des modèles dits « à deux équations ». Le plus connu d'entre eux est appelé modèle $(k - \varepsilon)$

Dans le modèle $(k - \varepsilon)$, le point de départ est le même que dans le modèle $(k - l)$: pour résoudre le problème dynamique, on admet l'existence d'une viscosité turbulente ν_t

Le modèle $(k - \varepsilon)$ standard [Launder et spalding (1972)] qui se base sur le concept bousinesq (1977) les termes des contraintes de Reynolds sont :

$$-\rho \overline{u_i u_j} = 2\mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{II.40})$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{est le tenseur de Reynolds} \quad (\text{II.41})$$

$$\mu_t = \rho \nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{La Viscosité turbulente} \quad (\text{II.42})$$

Avec $C_\mu = 0,09$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} (\overline{u_1^2} + \overline{u_2^2} + \overline{u_3^2}) \quad (\text{II.43})$$

Le taux de dissipation ε de l'énergie cinétique k est donné par :

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u_i \partial u_i}{\partial x_j \partial x_j}} \quad (\text{II.44})$$

II.4.7.5.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k \overline{U_i})}_1 = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}_2 + \underbrace{G_k}_3 - \underbrace{\rho \varepsilon}_4 \quad (\text{II.45})$$

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation

II.4.7.5.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon \bar{U}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.46})$$

Le terme de production G_k est donnée par :

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} = \rho v_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (\text{II.47})$$

II.4.7.5.3. Coefficient du modèle $k - \varepsilon$

L'adaptation des constants standards du modèle donné par Launder et Spalding (1974) rend le système d'équation opérationnel. Elles sont réunies dans le tableau II.1 :

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1	1.3

Tableau II.2 : valeurs des constants du modèle $k - \varepsilon$

Il est indispensable de savoir que le modèle $k - \varepsilon$ est applicable aux écoulements à nombre de Reynolds élevé.

II.4.7.5.4. Modèle RNG $k - \varepsilon$

Le modèle RNG, développé par le groupe de normalisation [Yakhot & Smith, 1992] consiste en une estimation au cours du calcul de la constante $c_{\varepsilon 1}$, remplacée dans l'équation de dissipation par $c'_{\varepsilon 1}$ donnée par l'expression (II .48) .

Cette expression ajoute un terme fonction du taux de déformation η à l'équation du taux de dissipation le rendant ainsi moins diffusif.

$$c'_{\varepsilon 1} = c_{\varepsilon 1} - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (\text{II.48})$$

Avec

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{p}{\eta_t}} \quad (\text{II.49})$$

Les constantes du modèle RNG [36] ont pour valeur :

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_ϵ	η_0	β
0.085	1.42	1.68	0.7179	4.38	0.015

Tableau II.3 : constantes du modèle RNG $k - \epsilon$

La différence principale entre la version standard et RNG $k - \epsilon$ est dans l'équation du taux de la dissipation turbulente d'énergie. Dans les écoulements à taux de contraintes élevés, le modèle RNG prévoit une faible viscosité turbulente (c'est à dire un taux de dissipation ϵ élevé et une production de turbulence k faible) que le modèle standard. Bien que le modèle RNG $k - \epsilon$ à été découvert pour faire mieux que le modèle standard pour les écoulements avec une grande courbure des lignes de courant, et aussi non encore validé intensivement par les chercheurs que le modèle $k - \epsilon$. La version standard de $k - \epsilon$ et RNG $k - \epsilon$ est valide pour les écoulements turbulents loin des parois.

II.4.7.5.5. Modèle des contraintes différentielles de Reynolds (RSM)

Dans ce modèle les contraintes de Reynolds sont calculés selon leur propres équations de transport et concept (isotrope) de la viscosité turbulente n'est plus exigé, donc ce modèle implique le calcul individuel de chaque contrainte $\overline{u_i u_j}$

L'utilisation de ces équations est utilisée pour obtenir une fermeture du système d'équations de Reynolds moyennées pour le transport de la quantité de mouvement [21].

Des hypothèses simplificatrices pour la modélisation des termes inconnues sont nécessaires et les propositions choisies sont présenté brièvement:

II.4.7.5.6. Equation de transport des contraintes de Reynolds

Les équations de transport des contraintes de Reynolds dans (Comsol) sont écrites :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \overline{u_i u_j})}_1 = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u_i u_j u_k} + p(\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)]}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} [\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j})]}_3 - \underbrace{\rho [\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}]}_4 + \underbrace{p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}_5 - \underbrace{2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}}_6 \tag{II.50}$$

- 1: $C_{ij} \equiv$ convection
- 2: $D_{T,ij} \equiv$ diffusion turbulente
- 3: $D_{L,ij} \equiv$ diffusion moléculaire
- 4: $P_{ij} \equiv$ terme de production de contrainte

5: ϕ_{ij} ≡ pression taux de déformation

6: ε_{ij} ≡ dissipation

On a supposé que l'effet Buoyancy et l'effet de compressibilité sont nuls puisque notre problème stationnaire et sans transfert thermique.

$$D_{T,ij} = C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho k \frac{\overline{u_k u_1}}{\varepsilon} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_1} \right) \quad \text{Transport diffusif turbulent} \quad (\text{II.51})$$

A cause de l'instabilité du calcul avec ce modèle, une simplification a été utilisée par (Comsol), et ce terme diffusif isotrope donne de bons résultats pour des cas anisotropies.

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_1}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \quad (\text{II.52})$$

L'équation de pression-taux de déformation s'écrit par:

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} + \phi_{ij,\omega} \quad (\text{II.53})$$

$$\phi_{ij,1} \equiv -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left[\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (P - C) \right] \quad \text{Terme lent} \quad (\text{II.54})$$

$$\phi_{ij,2} \equiv -C_2 \left[(P_{ij} + C_{ij}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (P - C) \right] \quad \text{Terme rapide} \quad (\text{II.55})$$

$$\phi_{ij}^{\omega} \equiv C_1' \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_k u_m} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u_i u_k} n_j n_k - \frac{3}{2} \overline{u_j u_k} n_i n_k \right) \frac{k^{\frac{3}{2}}}{C_1 \varepsilon d} + C_2' \left(\phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{k^{\frac{3}{2}}}{C_1 \varepsilon d} \quad (\text{II.56})$$

$$C_1 = \frac{C_{\mu}^{\frac{3}{4}}}{k} \quad (\text{II.57})$$

(II.38) C' est le terme d'amortir la fluctuation, il a été inclus par défaut dans le modèle RSM :

Les constantes:

C_1	C_2	p	C	C_1'	C_2'	C_{μ}	k
1.8	0.6	1.68	0.7179	0.5	0.3	0.09	0.4187

Tableau II.4: constantes du modèle RSM [22]

k : est la constante de Von Karman.

La relation en générale de l'énergie cinétique turbulence est donné par :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (\text{II.58})$$

Les valeurs de k obtenues ont été utilisées pour les conditions aux limites près des parois.

L'équation turbulente de dissipation est calculée à partir d'une équation de transport similaire à celle du modèle $k - \varepsilon$:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} [P_{ii}] \frac{\varepsilon}{K} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.59})$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.0, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

Quand le modèle RSM est utilisé les valeurs des contraintes de Reynolds à l'entrée ne sont pas implémentées, elles sont déterminées approximativement des valeurs spécifiques de la turbulence étant assurée isotrope. Nous pouvons décrire:

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \quad \text{pour } i = j \quad (\text{II.60})$$

$$\overline{u_i u_j} = 0.0 \quad \text{pour } i \neq j \quad (\text{II.61})$$

Près des parois (Comsol), on applique de conditions de frontière explicites pour les contraintes de Reynolds en utilisant la loi logarithmique, en assumant l'état d'équilibre et en négligeant la convection et la diffusion dans l'équation de transport de contraintes.

En utilisant un système local de coordonnées et sur la base de résultats expérimentaux, près des parois on a:

$$\frac{\overline{u_\tau^2}}{k} = 1.098, \frac{\overline{u_\eta^2}}{k} = 0.247, \frac{\overline{u_\lambda^2}}{k} = 0.655, -\frac{\overline{u_\tau u_\eta}}{k} = 0.255 \quad (\text{II.62})$$

τ : est la coordonnée tangentielle

η : est la coordonnée normale

λ : est la coordonnée binormale

II.5.Présentation de la méthode de résolution mathématique

La résolution des équations différentielles ou plus généralement des équations aux dérivées partielles occupe une place importante en ingénierie et en mathématiques appliquées. Chacune de ces disciplines apporte une contribution différente mais complémentaire à la compréhension et à la résolution de tels problèmes [23].

Il existe plusieurs techniques permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles.

Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes D'écoulements et de transferts thermiques on peut citer :

- La méthode des différences finies ;

- La méthode des volumes finis ;
- La méthode des éléments finis.

Malheureusement, il est pratiquement impossible de trouver une solution analytique et exacte à de tels systèmes du fait que les équations citées précédemment soient très complexes, c'est-à-dire non linéaires d'une part et couplées d'autre part. Dans ce cas, le recours à la résolution numérique s'impose et nous incite à choisir la méthode numérique adéquate pour obtenir les meilleures approximations [24].

II.5.1.Méthode des différences finis

La méthode des différences Finies consiste en une discrétisation des operateurs différentiels sur une grille de pas d'espace fixe à l'aide de développements de Taylor tronques [25].

II.5.2.Méthode des volumes finie

Cette méthode a été utilisée depuis de nombreuses années (1970) par les ingénieurs (tel que SPALDING, SMITH et PATANKAR) [26], pour résoudre numériquement avec des maillages structurés, les problèmes de la mécanique des fluides formalisés pour les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

❖ les avantages de la méthode du volume finis

- Approche très « physique » : bilan des flux ;
- S'adapte à une géométrie quelconque ;
- Plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires hyperboliques ;
- Conservative (par sa formulation) ;

La base de tous les codes généraliste en Mécanique des Fluides : Fluent, Star-CD, CFX.

II.6. Conclusion

Dans chapitre, nous avons exposé des notions sur les écoulements, tout en précisant les différentes équations qui y régissent.

Dans le suivant chapitre nous allons illustrer les résultats de simulation obtenus de la géométrie de la chambre de séparation tribo-aéro-électrostatique citée dans le premier chapitre.

Chapitre III: Simulation, résultats et discussion

III.1. Introduction

Vu l'importance, l'impact et l'influence du débit d'air injecté dans la chambre de séparation aéro-triboélectrique utilisé pour créer la fluidisation qui permet aux particules de se charger positivement ou négativement afin de les séparer et les récupérer par la suite [15], nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement du fluide à l'intérieur de la cavité fermée qui représente la chambre de séparation.

Dans ce chapitre, nous allons voir le profil de pression à l'intérieur de la cavité, entre les deux électrodes qui sont représentés par des disques rotatifs et qu'on les a indiqué par l'appellation « rotors ».

III.2.Simulation, résultats et discussions

III.2.1. Problématique

L'étude du comportement de fluide est d'une importance capitale dans la fluidisation dans le domaine de la séparation des particules, vu son impact sur le chargement des particules, afin de les chargées positivement ou négativement pour une éventuelle séparation après application d'un champ électrique.

III.2.2. Présentation de la géométrie :

La représentation schématique de la géométrie étudiée est dessinée en 2D sur la figure III.1.

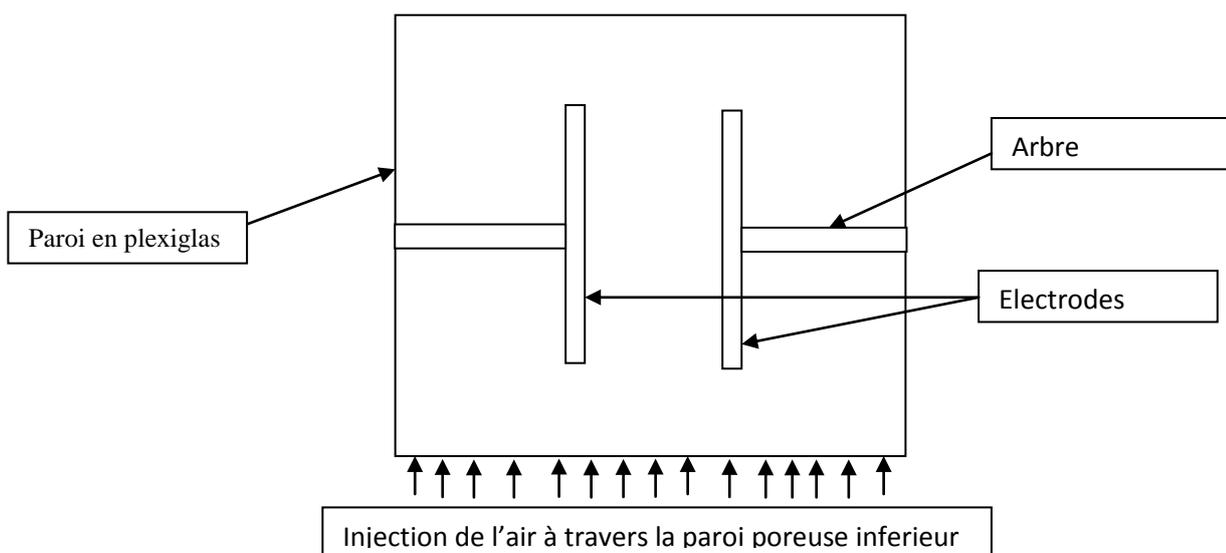


Figure III.1: Schéma descriptif en 2D de la chambre de séparation.

La figure III.2 montre les différentes parties du dispositif expérimental.

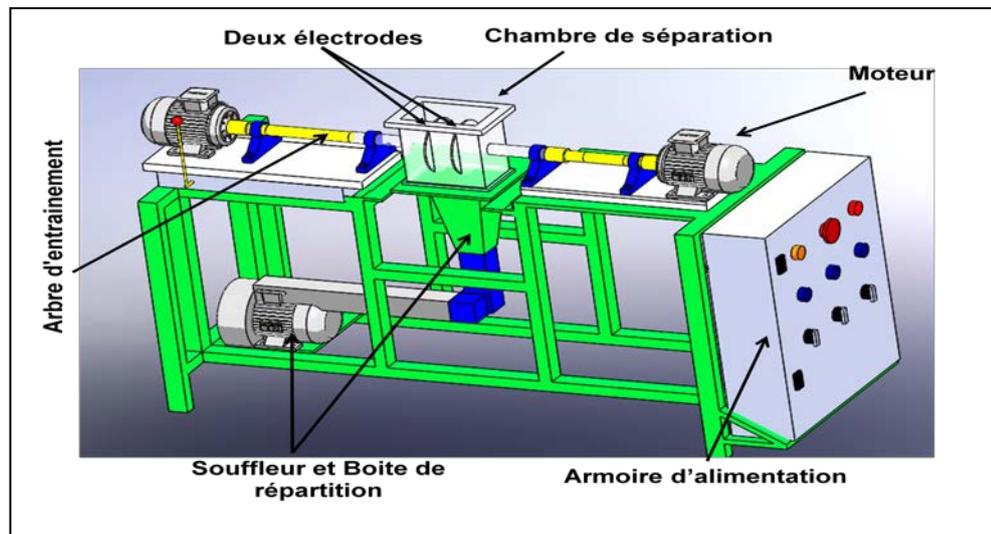


Figure III.2: Représentation descriptive du dispositif de séparation.

Les dimensions réelles de la géométrie sont décrites précédemment sur le chapitre I.

III.2.3. Conditions aux limites

Comme toute étude de simulation, l'importance et l'utilité de connaître les conditions aux limites facilite la tâche de la procédure de traitement numérique. Il s'agit de :

Le fluide pris dans notre étude est composé d'un pourcentage d'air égal à 60 % tandis que le pourcentage de solide (particules PVC de taille micrométrique) est de 40%.

- ✓ La vitesse d'injection du fluide est de 2 m/s
- ✓ La vitesse des deux électrodes nommées « rotors » est de 80 tr/min
- ✓ Les parois sont adiabatiques

III.3. Maillage

Le maillage est une étape très importante dans le domaine de simulation qui vient après le tracé de la géométrie.

Il est crucial de faire une optimisation du maillage, c'est-à-dire, essayer plusieurs tentatives qui servira par la suite de choisir le maillage adéquat en ce qui concerne les nombre d'éléments repérés et un temps de calcul réduit convenable.

Le maillage dépend surtout de la géométrie du problème exposé.

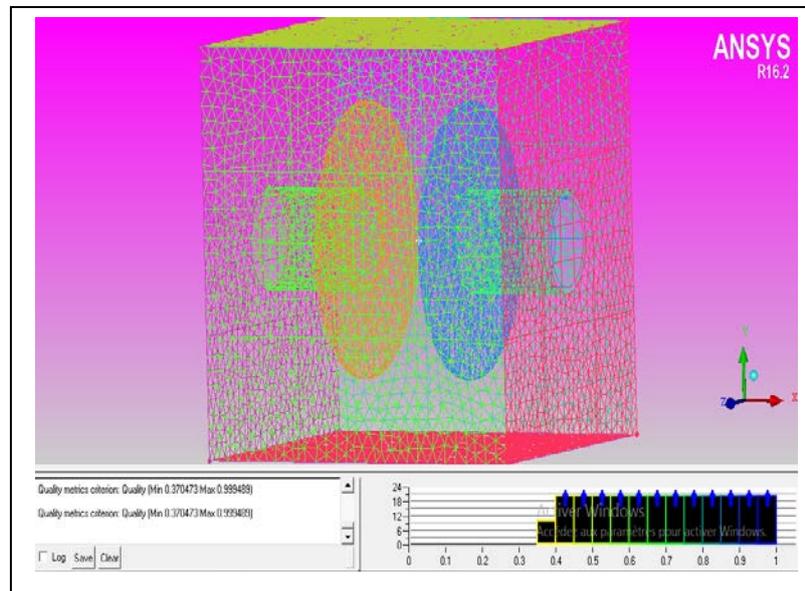


Figure III.3 : Présentation d'un maillage de la géométrie étudiée.

III.3.1 Informations sur le maillage

Le tableau suivant présente quelques informations sur le maillage.

Type de maillage	Nombres d'éléments
Tetra / mixed 1	235098
Tetra / mixed 2	301519
Tetra / mixed 3	435869
Tetra / mixed 4	603990

Tableau III.1 : Informations sur le maillage.

III.3.2. Transfert de la géométrie vers CFX PRE

Cette partie vient après l'étape du maillage, elle nous a permet d'introduire les conditions aux limites spécifiés à l'étude de simulation.

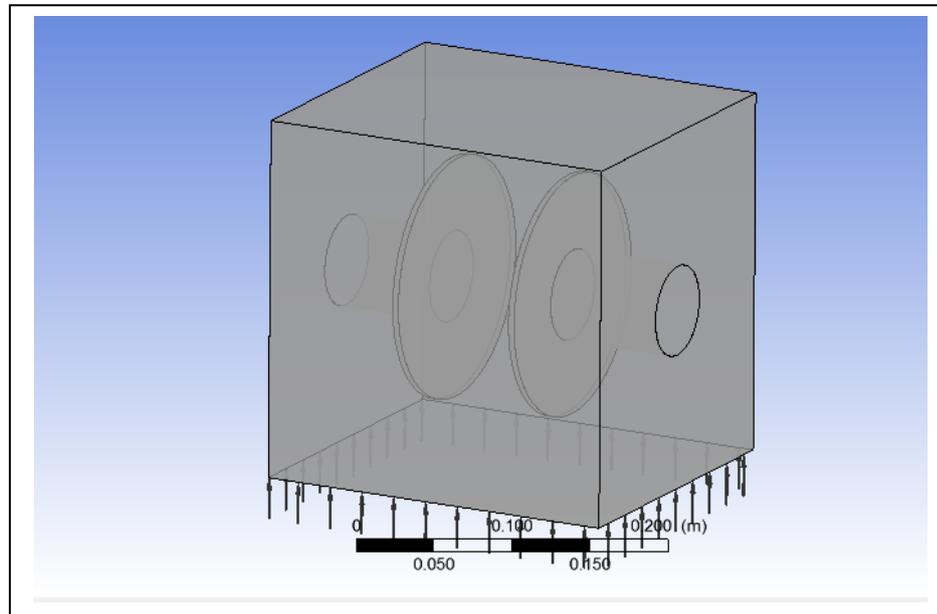


Figure III.4 : Présentation de la chambre de séparation tribo-électrostatique dans le CFX PRE.

III.3.3 : Test de convergence :

Des simulations numériques ont été testées en variant le nombre d'éléments de calcul, Une stabilité et une convergence du modèle été atteinte pour différents maillages.

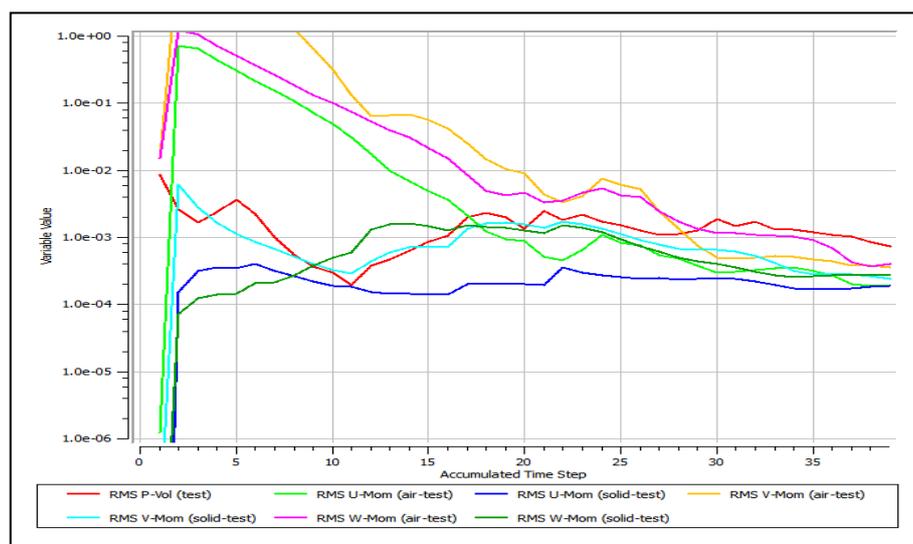


Figure III.5 : Présentation de la convergence.

III.4. Choix du maillage

L'influence de la taille et du nombre des nœuds sur la solution exprimée est très important, le profil de pression et de la vitesse doit être sensible.

Pour voir l'influence du choix de maillage, nous avons pris l'initiative de tester notre maillage avec différents nombres d'éléments, il s'agit de :

- 200000 éléments
- 300000 éléments
- 400000 éléments
- 600000 éléments

Le tracé des figures a été pris suivant la ligne d'une droite de l'axe des y indiqué sur la figure III.6, entre les deux rotors.

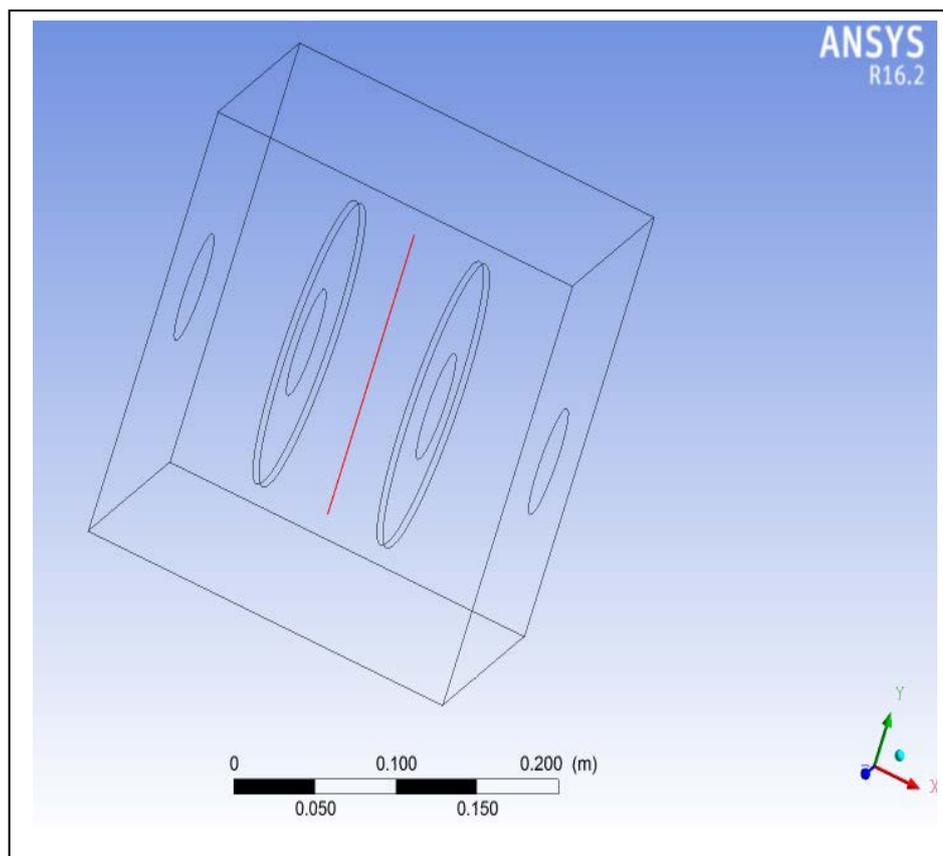


Figure III.6 : Représentation de la position suivant l'axe y prise pour les différents tracés des figures.

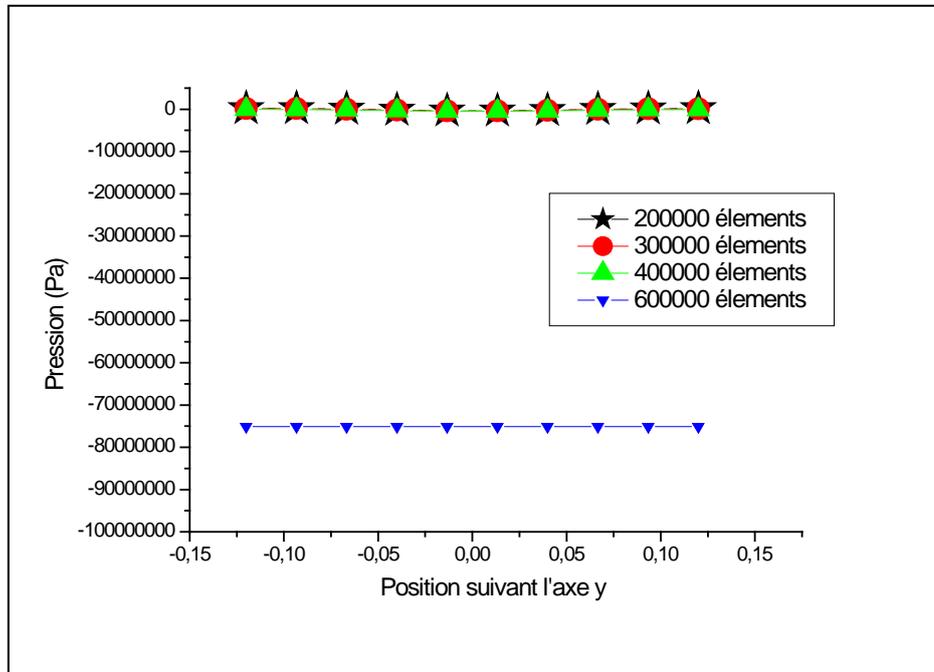


Figure III.7 : Présentation de profil de pression P en fonction de position suivant l'axe des y , du maillage avec 200000, 300000, 400000, 600000 éléments.

Nous pouvons constater à travers cette combine (figure III.7), que les trois premiers choix (200000, 300000 et 400000) sont presque confondus, tandis que le cas de 600000 est très éloigné. A cet effet, nous avons choisi de présenter (200000, 300000 et 400000).

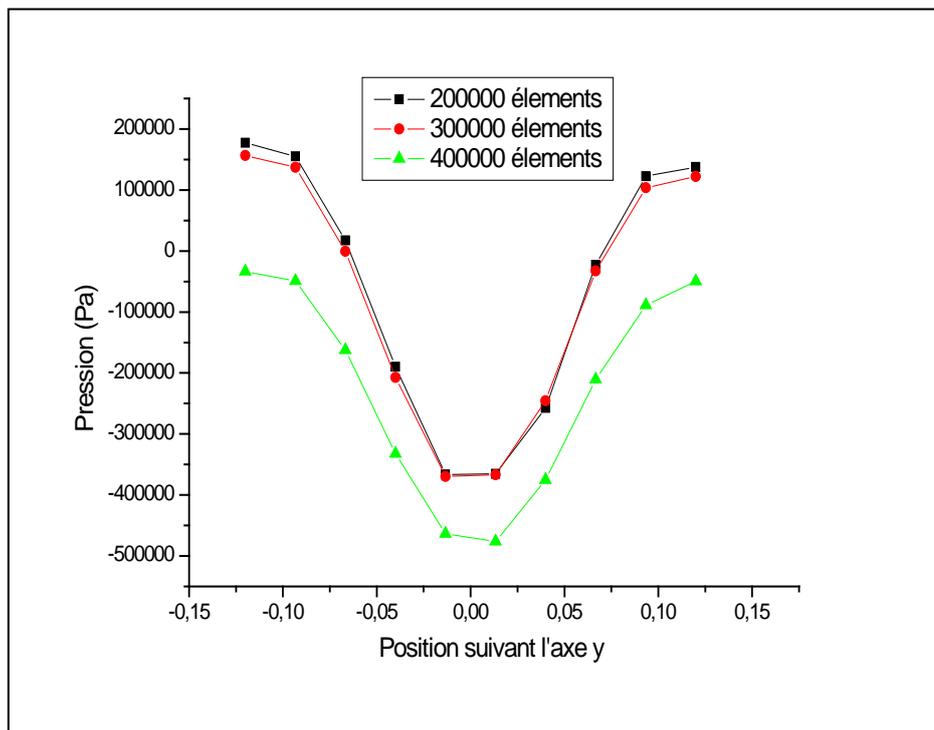


Figure III.8 : Présentation de profile de pression P en fonction de position l'axe des y du maillage avec 200000, 300000, 400000 éléments.

La figure III.8 nous montre qu'on peut travailler par la suite avec un nombre d'éléments réduit de 200000, et de cette façon, on gagnera dans le temps de calcul.

III.5. Résultats et discussions

III.5.1 Profil de pression pour différentes valeurs de la vitesse d'injection du fluide

Dans cette partie de simulation, nous allons fixer la vitesse de rotation des deux électrodes « rotor », en faisant varier l'injection de l'air avec les particules (fluide).

Pour présenter les différents profils, nous avons choisi la position du milieu entre les deux rotors figure III.6.

Au départ, nous avons commencé la simulation avec une vitesse de rotation des deux disques nulle notée U .

Les valeurs prises de vitesse d'injection de fluide notée V , varie de 2 m/s à 8 m/s avec un intervalle de 2 m/s c'est-à-dire (2m/s, 4m/s, 6m/s et 8m/s), en prenant pour chaque rotation des rotors de droite comme de gauche les valeurs suivantes :

- 0 tr/min
- 40 tr/min
- 60 tr/min
- 80 tr/min

La figure III.9 représente le profil de pression en fonction de position suivant l'axe y , en prenant le milieu entre les deux rotors.

- ✓ En faisant augmenté la vitesse de rotation des électrodes U de 20 tr/min jusqu'à 80 tr/min, on remarque que cela n'affecte pas sur le profil de la pression.
- ✓ Pour la vitesse du fluide $V=2\text{m/s}$, à la position $y = -0.08$ mm, on observe une légère baisse à peu près de 25000 Pa jusqu'à la pression nulle.
- ✓ Aux valeurs de la vitesse variant de : $V=4\text{m/s}$, $V=6\text{m/s}$, $V=8\text{m/s}$, on remarque une chute considérable c'est-à-dire une dépression jusqu'à peu près 380000 Pa à la position $y = 0$.
- ✓ Une remontée de la pression jusqu'à peu près :
 - Pour $V= 4$ m/s : une chute de 90000 Pa jusqu'à -380000 Pa puis elle remonte jusqu'à 25000 Pa.
 - Pour $V= 6$ m/s : une chute de 140000 Pa jusqu'à -250000 Pa puis elle remonte jusqu'à 25000 Pa.
 - Pour $V= 8$ m/s : une chute de 155000 Pa jusqu'à -330000 Pa puis elle remonte jusqu'à 25000 Pa.

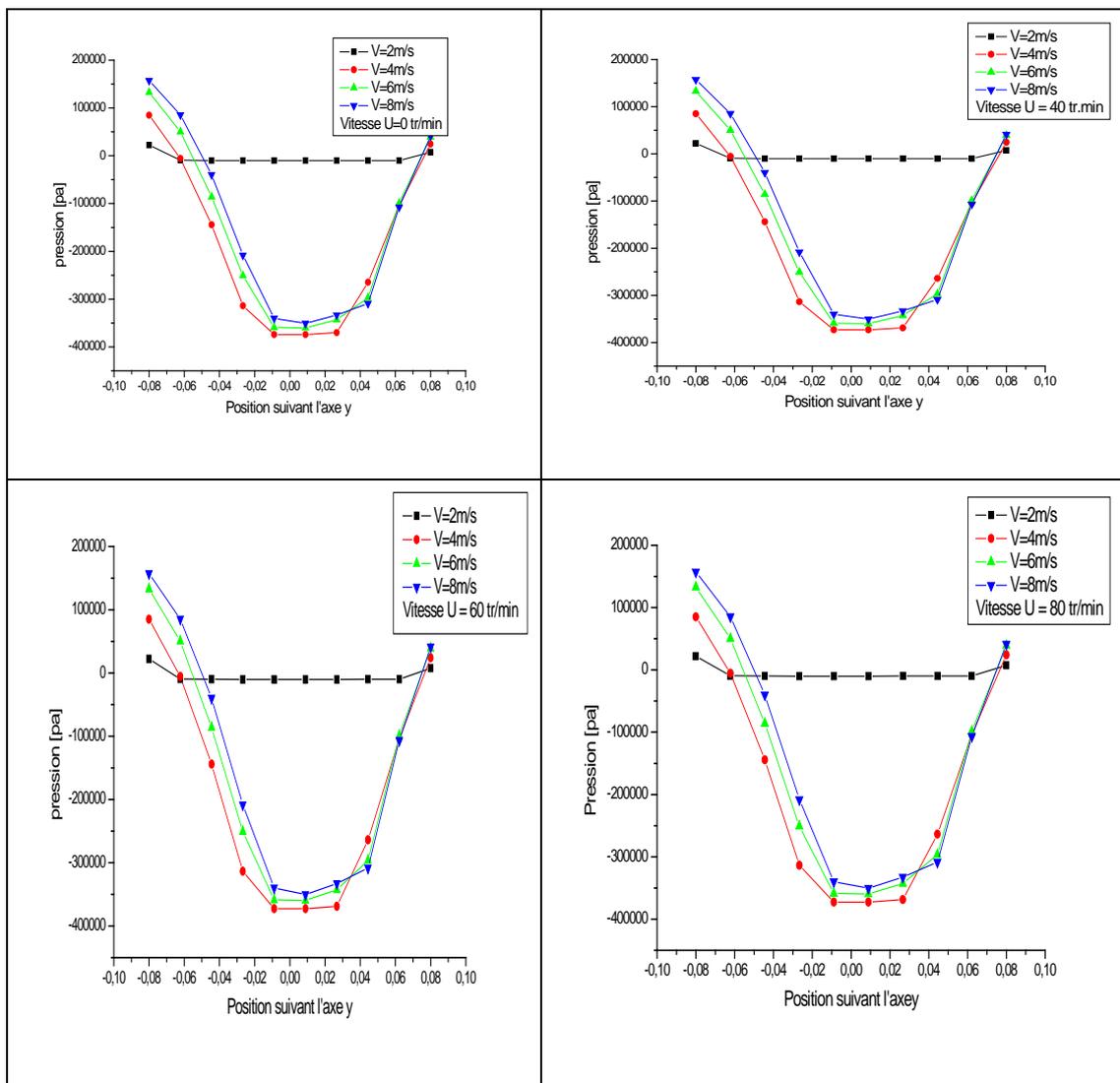


Figure III.9 : Profil de pression en fonction de position avec $v= 2m/s$, $v=4m/s$, $v=6m/s$, $v=8m/s$
 Pour différentes valeurs de $U=0\ tr/min$, $U=40\ tr/min$, $U=60\ tr/min$, $U=80\ tr/min$.

III.5.2. Profil de pression pour différentes valeurs de la vitesse de rotation des rotors

Pour cette partie de la simulation, nous allons procéder à l'inverse de la précédente étape, c'est-à-dire : fixer la vitesse d'injection du fluide tout en variant la vitesse de rotation des rotors.

Nous allons prendre les valeurs de la vitesse des rotors U suivantes :

0 tr/min , 40 tr/min, 60 tr/min et 80 tr/min

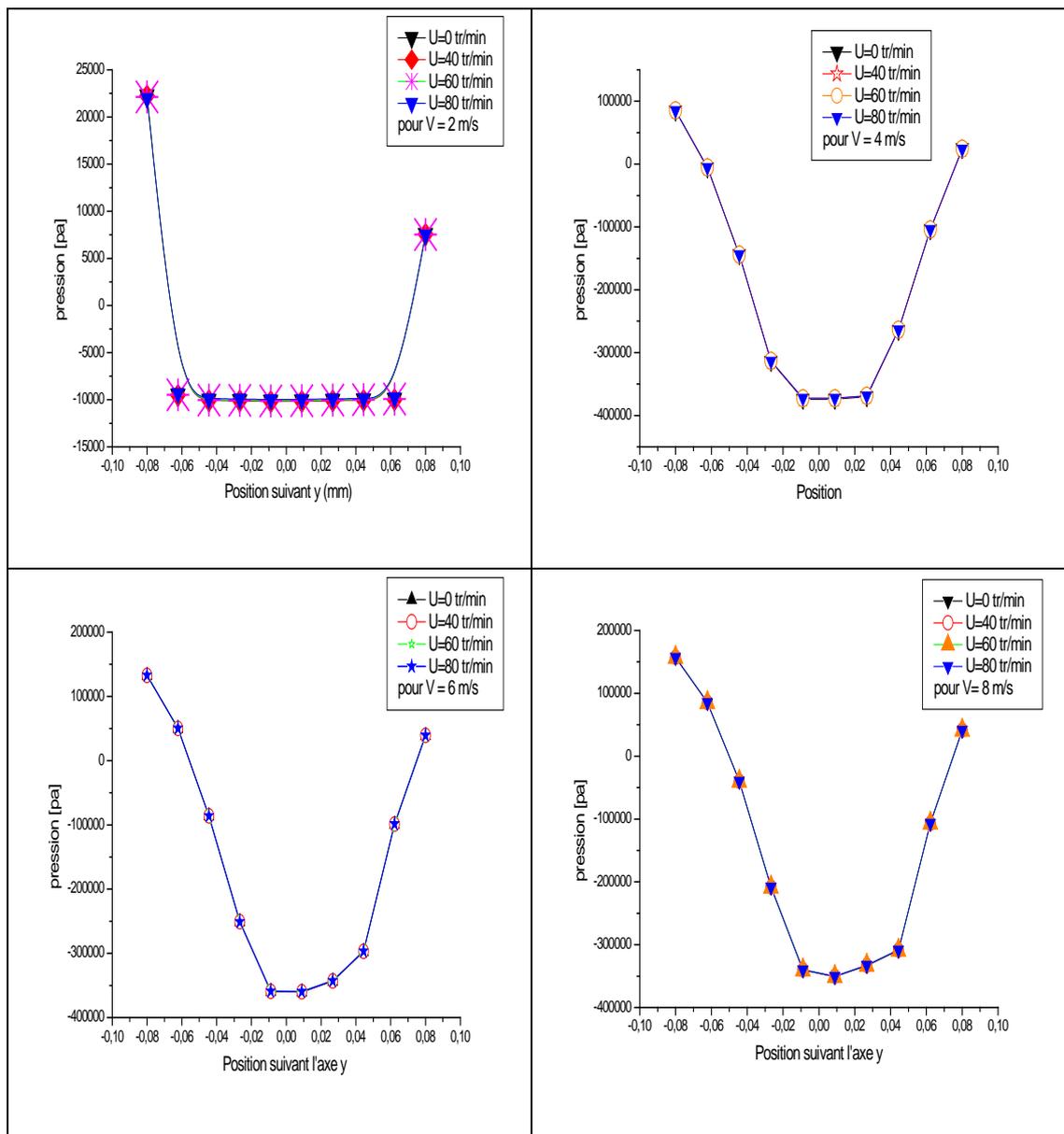


Figure III.10 : Profil de pression en fonction de position suivant y avec $U=0\text{tr/min}$, $U=40\text{tr/min}$, $U=60\text{tr/min}$ et $U=80 \text{tr/min}$ pour $V=2\text{m/s}$, $V=4\text{m/s}$, $V=6\text{m/s}$, $V=8\text{m/s}$.

La Figure III.9 représente le profil de pression en fonction de position suivant y. (il faut rappeler que la position de y est prise au milieu des deux rotors).

La première remarque qu'on peut afficher est que les courbes associées à la rotation des rotors pour différentes valeurs de la vitesse V sont confondues les unes par rapport aux autres.

Comme pour la première étude, la dépression est apparue :

Pour la vitesse $V = 2 \text{ m/s}$, la pression chute de 22500 Pa jusqu'à -10000 Pa, elle reste constante sur cette valeur entre $y = -0,06 \text{ mm}$ et $0,06 \text{ mm}$.

Pour les autres valeurs de la vitesse, on peut dire que la dépression arrive jusqu'à -360000 Pa, mais cette fois-ci elle reste dans un intervalle court de y : de -0.03 à 0.03 .

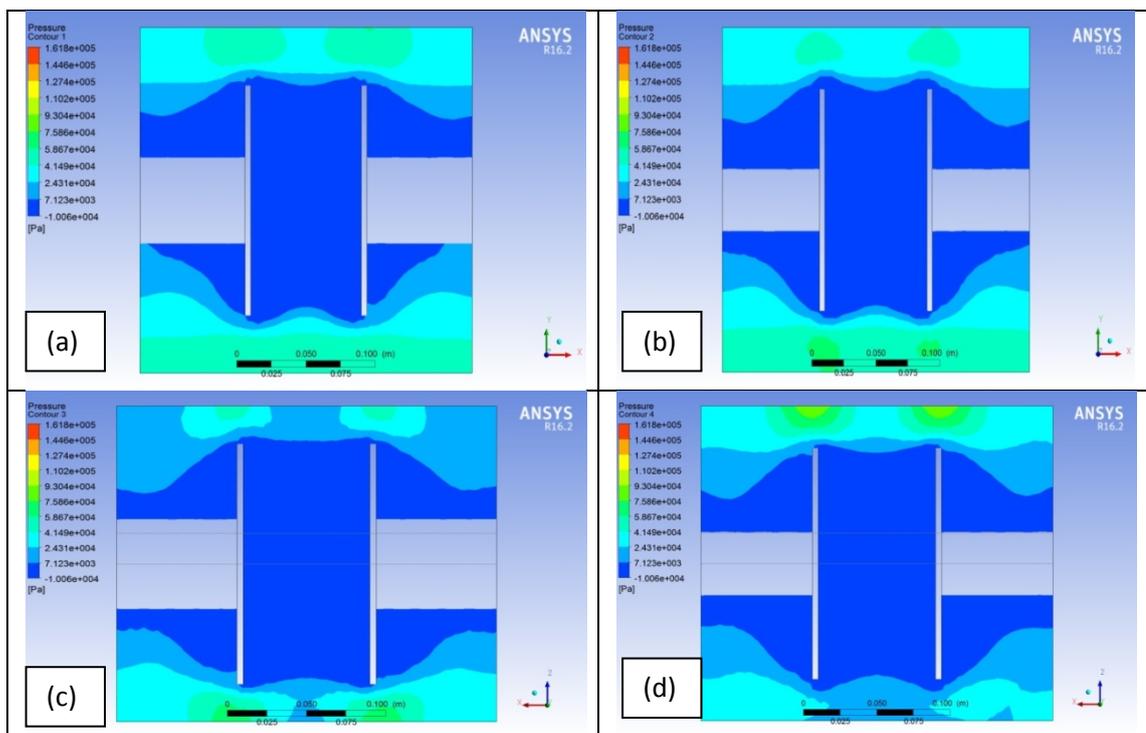
Nous pouvons conclure que cette dépression est peut être due à la rotation des rotors causant ainsi un vent inverse au jet du fluide injecter avec une vitesse beaucoup plus importante.

III.5.3 Contours de pression

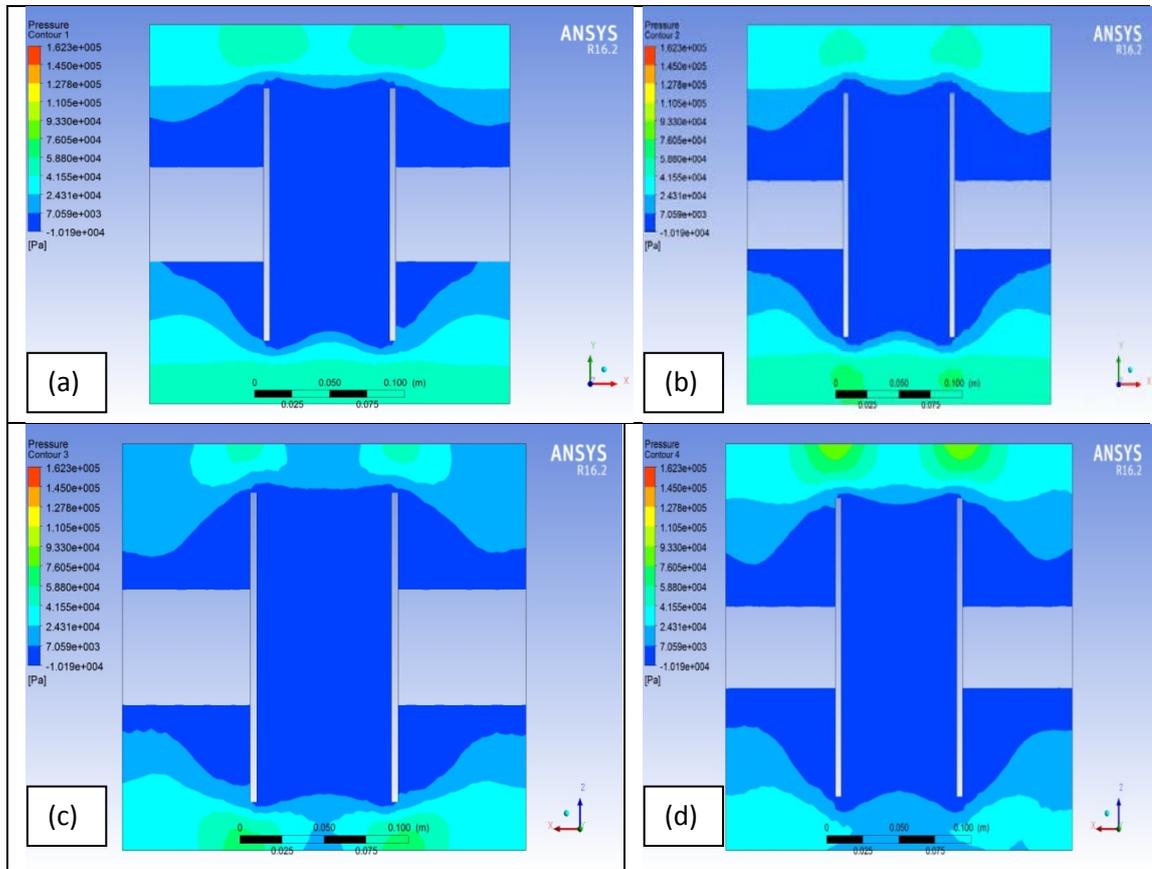
III.5.3.1 Impact de la vitesse de rotation des rotors

Cette partie est consacrée au tracé des contours de pression, avec la même procédure que précédemment, c'est-à-dire fixer un paramètre puis varier l'autre, il s'agit de la vitesse d'injection du fluide et de la vitesse des rotors

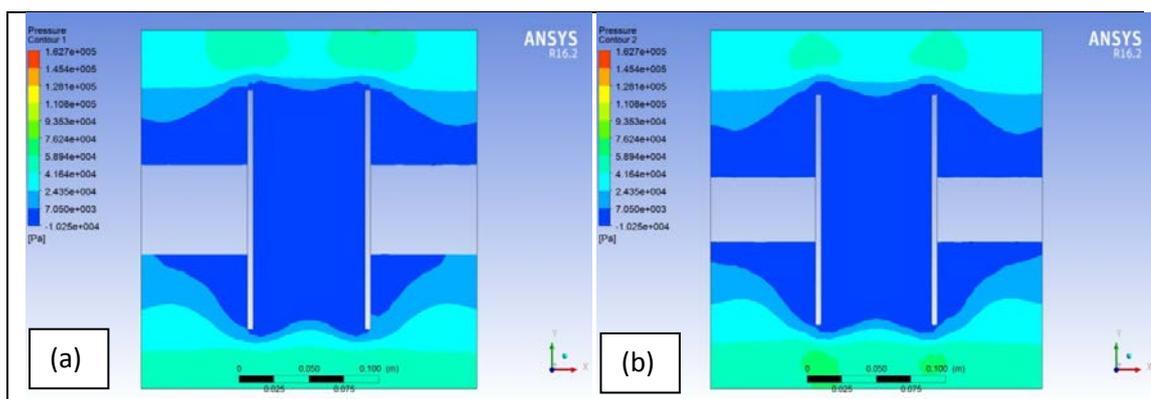
- 1) Pour $V=2$ m/s et $U=80$ tr/min

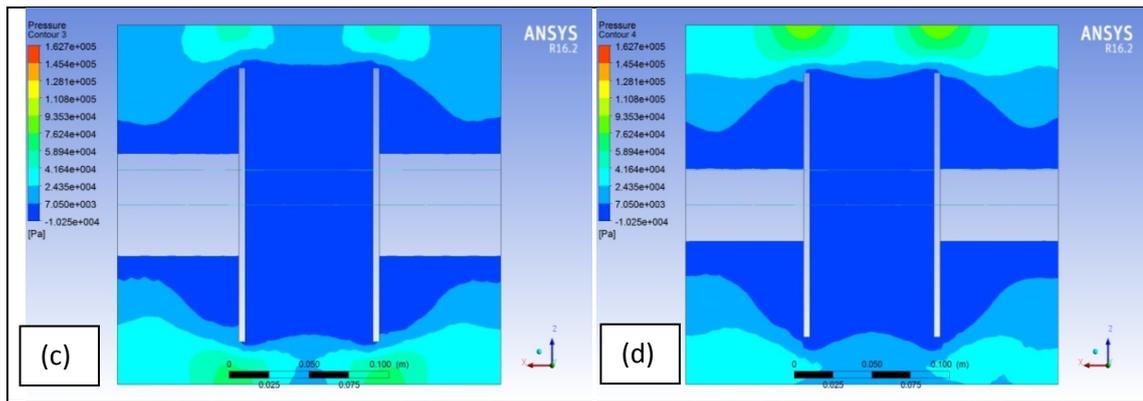


2) Pour $V=2$ m/s et $U=60$ tr/min :



3) Pour $V=2$ m/s et $U=40$ tr/min





4) Pour $V=2$ m/s et $U=0$ tr/min

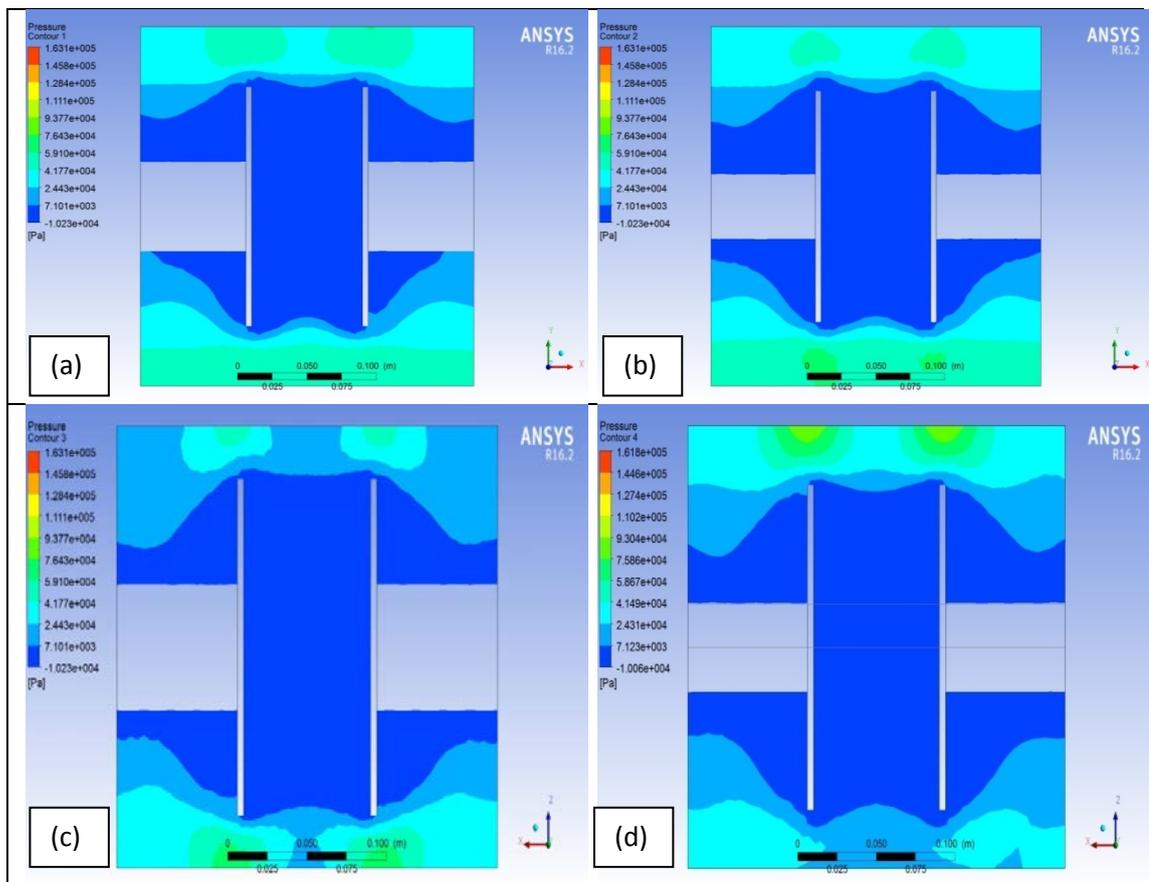


Figure III. 11 : Contours de pression vue sur :
 (a) un plan vertical pris au milieu des rotors, (b) un plan vertical pris à l'arrière des rotors
 (c) un plan horizontal pris au centre des rotors, (d) plan horizontal pris à l'arrière des rotors

La figure III.11 rassemble le tracé de contours pour différentes valeurs de rotation U , à la vitesse d'injection du fluide donnée. Les représentations sont identiques, elles montrent respectivement les contours de pression sur une face frontale au milieu de notre domaine en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Pour les deux cas étudiés (centre et une position à coté), les figures montrent que dans le cas d'un rotor rotatif, la valeur maximale de la pression se trouve près des parois fixe, mais la valeur minimale est proche des (rotors). De plus, chaque fois que nous éloignons du centre la pression augmente.

II.5.3.2. Impact de la vitesse du fluide

Dans ce qui suit, nous allons fixer la vitesse des rotors U , tout en faisant varier la vitesse d'injection du fluide.

1) Pour $U=80$ tr/min et $V=2$ m /s

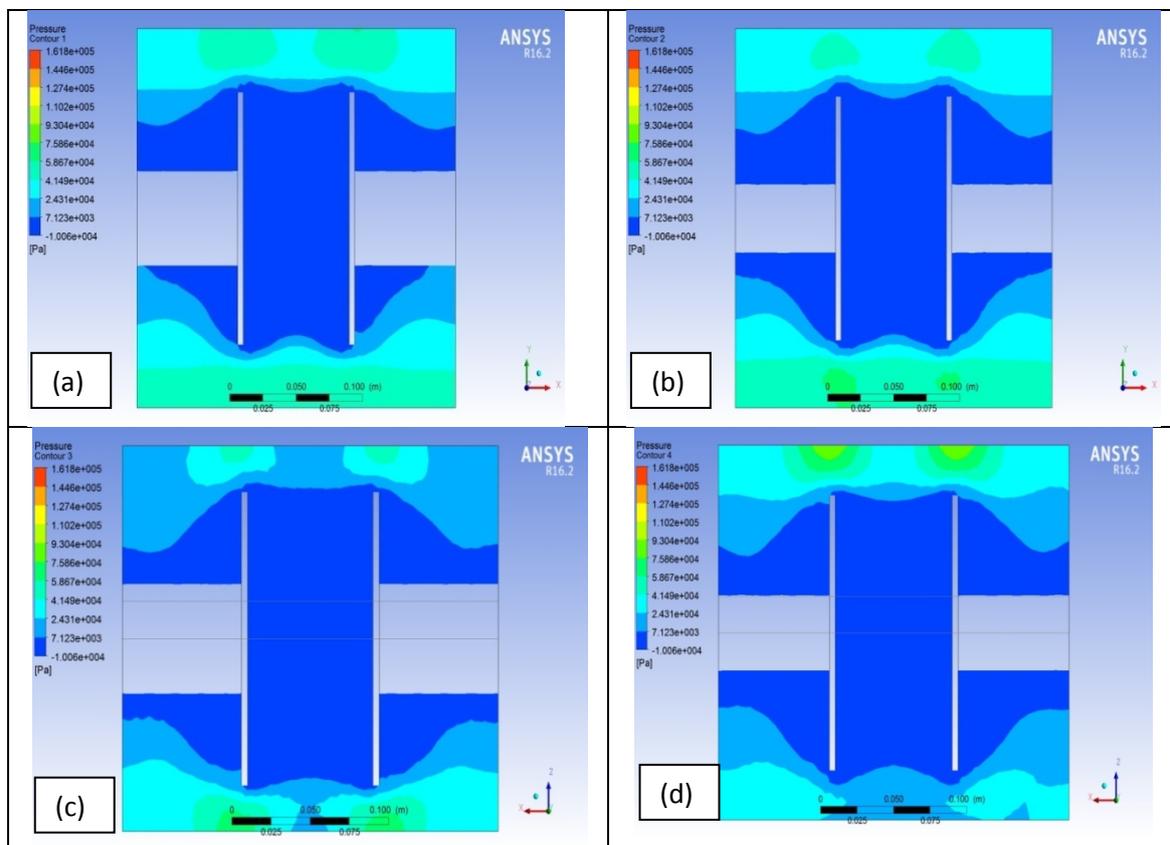


Figure III. 12 : Contours de pression vue sur le plan XY et XZ :
 (a) pris au milieu des rotors, (b) pris à l'arrière des rotors
 (c) pris au centre des rotors, (d) pris à l'arrière des rotors

2) Pour $U=80$ tr/min et $V=4$ m/s

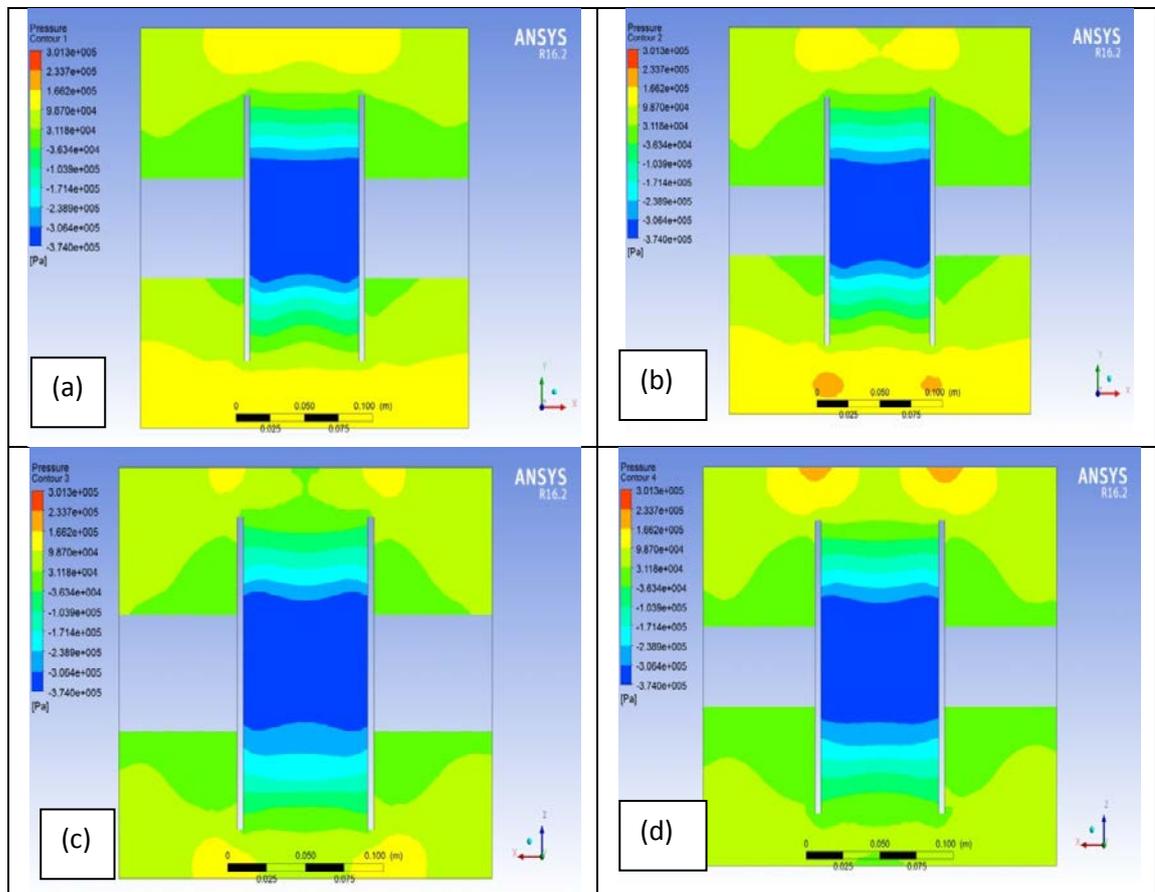
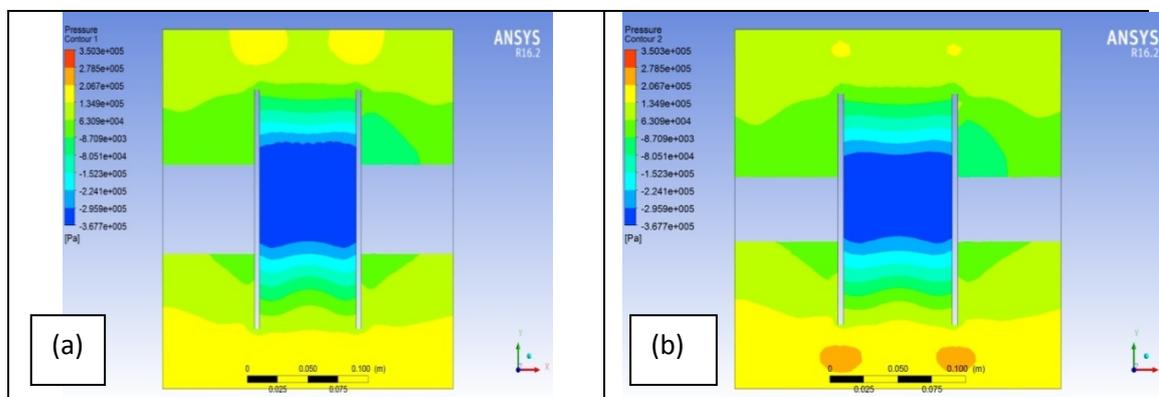


Figure III. 13 : Contours de pression vue sur le plan XY et XZ :
 (a) pris au milieu des rotors, (b) pris à l'arrière des rotors
 (c) pris au centre des rotors, (d) pris à l'arrière des rotors

3) Pour $U=80$ tr/min et $V=6$ m/s



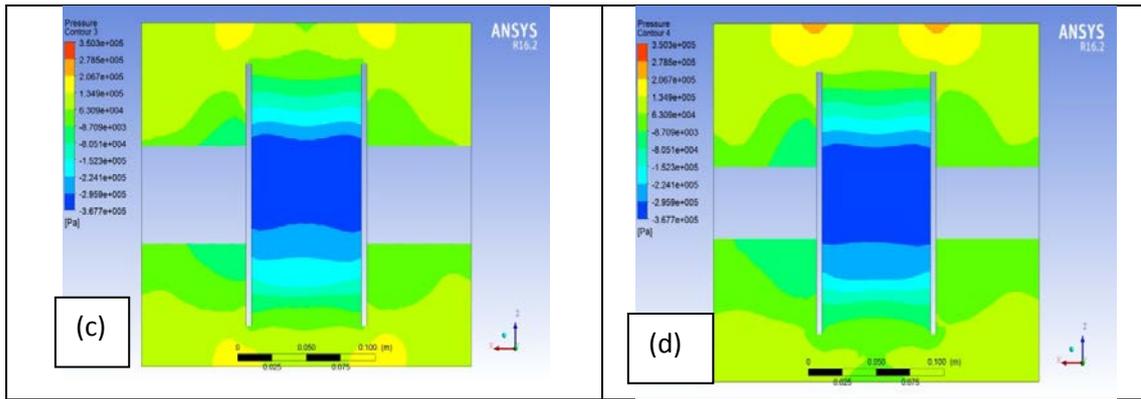


Figure III. 14 : Contours de pression vue sur le plan XY et XZ :
 (a) pris au milieu des rotors, (b) pris à l'arrière des rotors
 (c) pris au centre des rotors, (d) pris à l'arrière des rotors

2) Pour $U=80$ tr/min et $V=8$ m /s

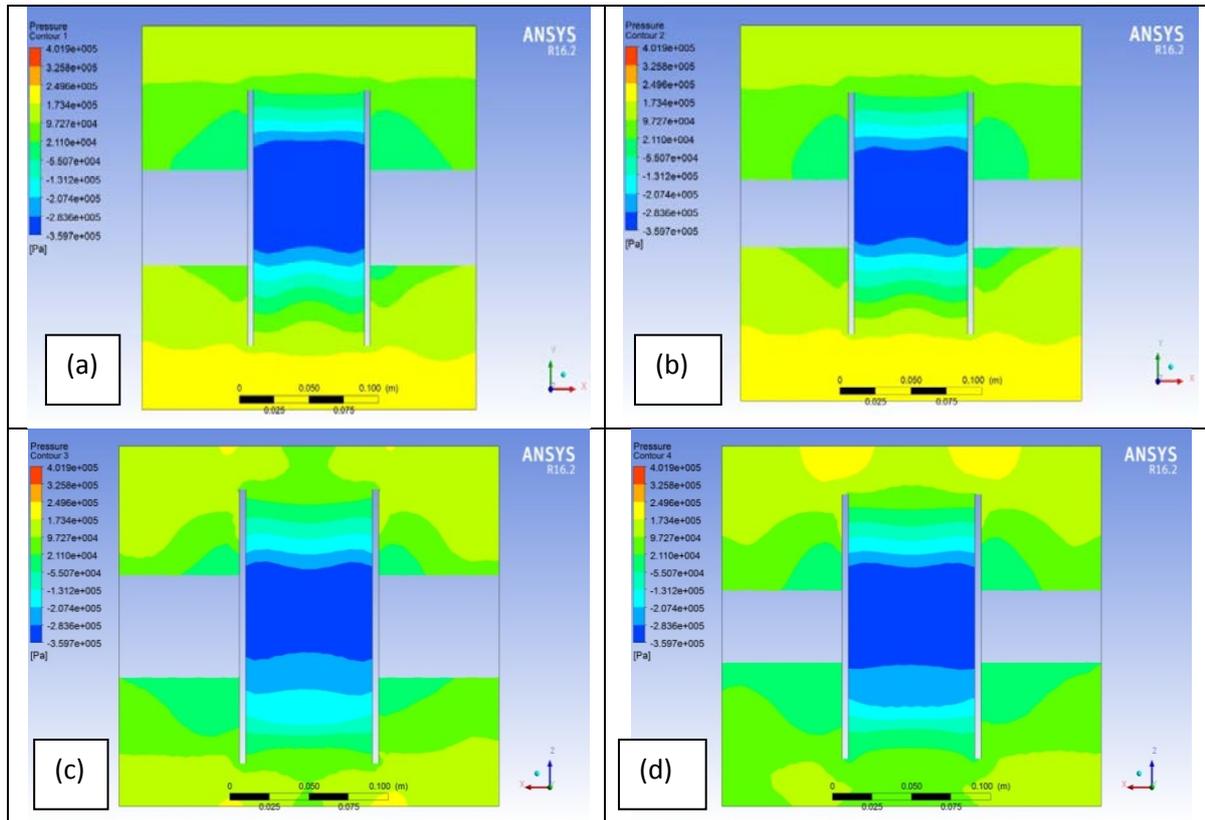


Figure III. 15 : Contours de pression vue sur le plan XY et XZ :
 (a) pris au milieu des rotors, (b) pris à l'arrière des rotors
 (c) pris au centre des rotors, (d) pris à l'arrière des rotors

Les figures III.12, III.13, III.14 et III.15, montrent respectivement les contours de pression sur une face frontale au milieu du notre domaine en fonction de la vitesse d'entraînement du fluide.

Pour les deux cas étudiés (le milieu entre les rotors et l'autre position qui est proche du rotor), les figures montrent que dans le cas d'un rotor rotatif, la valeur maximale de la pression se trouve près des parois fixes, mais la valeur minimale est à coté du rotor mobile. De plus, chaque fois que nous éloignons du centre la pression augmente. Sur le plan XY on observe une grande dépression, par contre sur le plan XZ, quand on augmente la vitesse d'entraînement la dépression augmente et les contours changent.

La figure III.16 présente quelques streamlines entre les deux rotors.

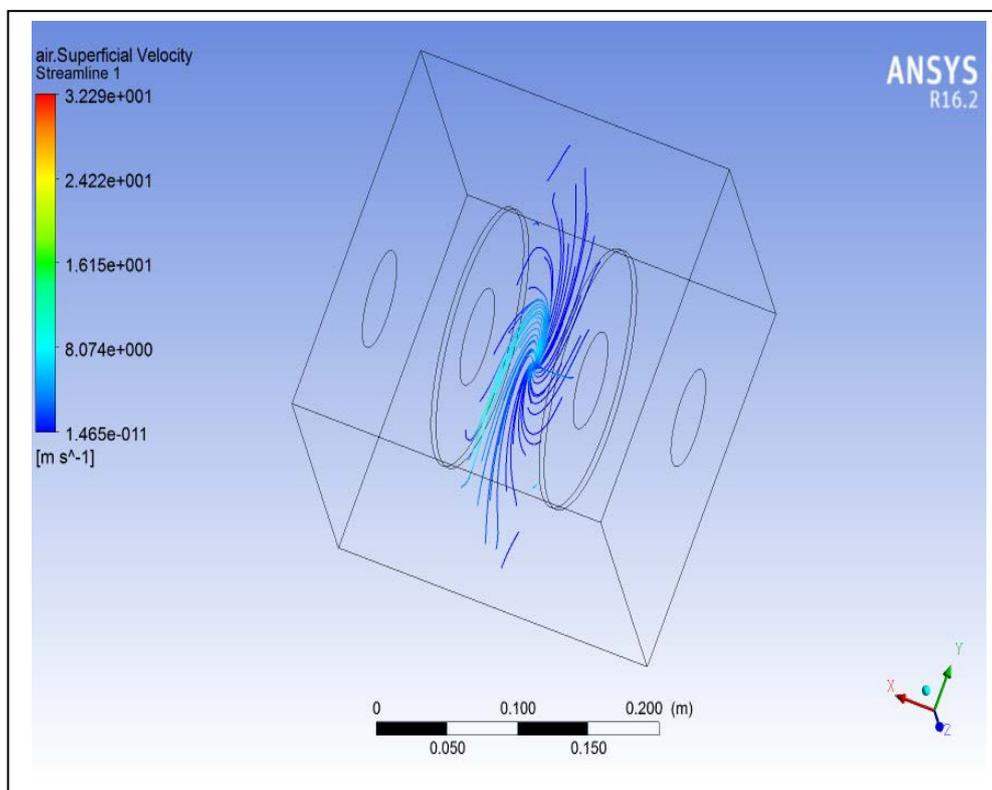


Figure III.16 : Présentation des streamlines sur le plan YZ, au milieu des rotors

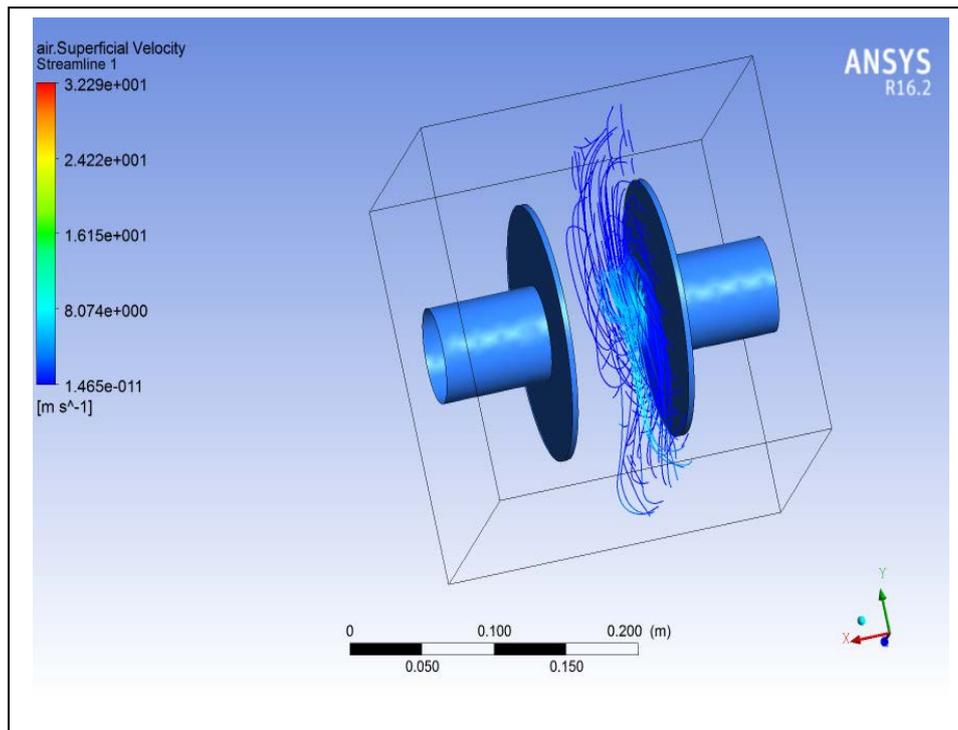


Figure III.17 : Présentation des streamlines sur le plan YZ, près du rotor droit

III.6.Conclusion :

Ce chapitre, nous a permis de connaître le domaine de simulation à travers le logiciel Ansys ICEM, qui nous a offert des connaissances sur l'application de notre étude.

Nous nous sommes focalisé sur l'impact des deux paramètres, il s'agit de la vitesse d'entraînement du fluide et la vitesse de rotation des rotors. Ce pendant, nous pouvons dire que la pression dans la chambre de séparation du séparateur aéro-tribo-électrique n'est pas affectée par la rotation des rotors « U » mais est plutôt par la vitesse de l'air injecté V.

Conclusion générale

Conclusion générale

La grande diversité des constituants des déchets d'équipements électriques et électroniques traités dans les usines de recyclage, ou des biomasses végétales utilisées comme matières premières dans l'industrie agro-alimentaire, impose aux chercheurs et aux ingénieurs de développer de nouvelles technologies, aptes à assurer la séparation physique de ceux-ci, en vue de leur récupération et de leur valorisation. Grâce à la maîtrise des trois mécanismes physiques qui assurent la charge électrique des mélanges pulvérulents, la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace pour la purification des matières premières dans l'industrie agro-alimentaire et pour la récupération des matériaux contenus dans les déchets d'équipements électriques et électroniques.

L'étude du comportement du fluide dans une cavité, qui est représentée par une chambre de séparation d'un séparateur aéro-tribo-électrostatique à disques rotatifs, nous a permis, en faisant une étude numérique traitée par le logiciel Ansys CFX, de voir le phénomène de la pression en analysant l'impact et l'influence des paramètres de l'injection de fluide à travers la paroi inférieure de la chambre (cavité) et la vitesse des deux électrodes qui ont été nommées dans notre étude par « rotors ».

Ce pendant, nous pouvons conclure que la pression dans la chambre de séparation du séparateur aéro-tribo-électrique n'est pas affectée par la rotation des électrodes « rotors » notée U mais est plutôt par la vitesse de d'entraînement V du fluide (air plus particules).

Comme perspective, nous souhaitons qu'à l'avenir, une étude de simulation sur la trajectoire des particules détaillée soit entamée.

Résumé

Résumé

Plusieurs séparateurs tribo-électrostatique utilisent l'injection de l'air, afin d'assurer une tribo-électricité qui permet à son tour le chargement des particules pour une éventuelle séparation à sec, qui compte sur l'application d'un champ électrique intense.

Ce travail de mémoire porte sur une étude numérique du comportement d'un fluide composé d'air et de particules dans une cavité qui représente une chambre de séparation d'un séparateur aéro-tribo-électrostatique.

Il s'agit d'étudier l'influence et l'impact des paramètres de la vitesse d'injection de l'air et de la vitesse de rotation des deux électrodes appelés « rotors » sur la pression à l'intérieur de la cavité.

La simulation numérique a été traité avec le logiciel ANSYS CFX, en utilisant le model $k\varepsilon$.

Mots clés : Séparateurs aéro-tribo-électrostatique, simulation numérique, Ecoulements, CFD.

- [1] Nicoara, Simona, Calin, L., Iuga, A., Serban, N. "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose". In: Environment and Progress. 6, 341-346, (2006). [Ber-05] J. Beretta. "*Le génie électrique automobile, la traction électrique*". H. Science, éd. Lavoisier. 2005.
- [2] Ralston, O.C. Electrostatic Separation of Mixt Granular Solids. Amsterdam, Elsevier, pp.162-172, (1961).
- [3] Schmoutziguer, W.S., MCGovern, J.J. "Tribocharging in separating apparatus". Outokumpu, Patent No: GB 2 351 928, 2001.
- [4-5] Association of Plastics Manufactures in Europe. (2000) Insight into consumption and recovery. Western Europe 2000"
- [6] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progresses in electrostatic separation technology." Part. Sci. & Technol, Vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [7] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 1564–1569, 2010.
- [8] L. Calin, and L. Dascalescu, "Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en oeuvre.", Brevet FR2943561, 2010.
- [9] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, and L. Dascalescu., "Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes." IEE Proc. -Sci. Meas. Technol., Vol. 148, pp. 47-54, 2001.
- [10] L. Dascalescu, A Iuga, R. Morar, "Electrostatic Technologies for the Recycling of Non-ferrous Metals and Plastics from Wastes. " Inculet, I.I., Tanasescu, F.T., Cramariuc, R. (Eds.) The Modern Problems of Electrostatics with Applications in Environmental Protection, Dordrecht/Boston/London: Kluwer, pp. 77-89, 1999.
- [11] Directive 2002/95/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Journal officiel de l'Union européenne, Vol. L 37, N° 1 3.2.2003, 2003, pp. 19-23.
- [12] DIRECTIVE 2002/96/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Journal officiel de l'Union européenne, Vol. L 37, N° 1 3.2.2003, 2003,

pp. 24-38.

- [13] Décret no 2005-829 du 20 juillet 2005 relatif à la composition des équipements électriques et électroniques et à l'élimination des déchets issus de ces équipements. Journal officiel de la république française, N° 39, 2005.H. Chaikhy, "*Contribution au développement et à l'implantation des Stratégies de Commandes Evoluées des Machines Asynchrones*" Thèse de Doctorat, Université Hassen II, Royaume du Maroc, 2013

- [14] Y.Brahami, A.Benabboune, A.Tilatine, "Facteurs influençant l'efficacité d'un séparateur à disques rotatifs destiné aux particules fines." 5th international conference on electrotechnics ICEL 2013, Décembre 03-04

- [15] N.Bouhamri, M.M. Zelmat, A.Tilmatine, "Micronized plastic waste recycling using two-disc tribo-electrostatic separation process." 0921-8831/_ 2019 The Society of Powder Technology Japan. Published by Elsevier B.V. and The Society of Powder Technology Japan.

- [16] B.B.Gupta, J.A.Howell, D.Wu, R.W.Field, « A helical baffle for cross-flow microfiltration », Journal of Membrane Science 99, p (31-42), 1995.

- [17] Kang-Hoon Ko, N.K.Anand, « Use of porous baffles to enhance heat transfer in a rectangular channel », International Journal of Heat and Mass Transfer 46, p (4191- 4199),2003.

- [18] Rajendra Karwa, B.K.Maheshwari, «Heat transfer and friction in an asymmetrically heated rectangular duct with half and fully perforated baffles at different pitches», International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 32, p (264-268),2009.

- [19] Ahmet Tandiroglu, « Effect of flow geometry parameters on transient heat transfer for turbulent flow in a circular tube with baffle inserts », International Journal of Heat and Mass Transfer 49, p (1559-1567), 2006.

- [20] Yong-Gang Lei, YA-Ling HE, Pan Chu, Rui Li, « Design and optimization of heat exchangers with helical baffles », Chemical Engineering Science 63, p (4386-4395),2008.

- [21] Rajendra Karwa, B.K.Maheshwari, Nitin Karwa, « Experimental study of heat transfer enhancement in an asymmetrically heated rectangular duct with perforated baffles», International Communications in Heat and Mass Transfer 32, p (275-284), 2005.

- [22] Azil Ftima Zohra, (2004), “Etude des paramètres climatiques, sous serres chauffées en présence de la plante“, Thèse de Magistère, université de Batna.
- [23] Menni Youness « étude numérique comparative entre deux types de chicane et ailettes (Trapézoïdale et Triangulaire) utilisées Pour Améliorer les Performances des Capteurs Solaires Plans à Air, Université Tlemcen 14 juin 2012.
- [24] B-D’espris « Méthode numérique pour les EDP instationnaire différences finis et volume finis » 15 juillet 2014.
- [25] Abdellouahab Benseddik « Dimensionnements et simulation d’un prototype de cuiseur solaire pour les régions sahariennes » Mémoire de l’ingéniorat université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen. Soutenance en 01 juillet 2008.
- [26] Alexei Stoukov « introduction à la mécanique des fluides numérique : méthode ‘volumes finis’ », Octobre 2006.