

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la**  
**Recherche Scientifique**



**École Nationale Polytechnique**

**Département de Génie mécanique**

**Mémoire de master**

**Pour l'obtention du diplôme de master en énergétique**

**Thème**

**Etude des écoulements diphasiques dans les machines de  
sablage, et application à la machine MEC PB212126**

**Réalisé par :** M<sup>r</sup>. Ramzi GHELBI

Présenté et soutenue le : 28/06/2016

**Sous la direction de :**

M<sup>r</sup>. Mohamed LATRACHE                      Enseignant                      ENP Alger

**Composition du jury :**

**Président :** M<sup>r</sup>. Brahim GUERGUEB                      Enseignant                      ENP Alger

**Examineur :** M<sup>r</sup>. Yacine BELKACEMI                      Enseignant                      ENP Alger

**Promotion : juin 2016**



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la**  
**Recherche Scientifique**



**École Nationale Polytechnique**

**Département de Génie mécanique**

**Mémoire de master**

**Pour l'obtention du diplôme de master en énergétique**

**Thème**

Etude des écoulements diphasiques dans les machines de  
sablage, et application à la machine MEC PB212126

**Réalisé par :** M<sup>r</sup>. Ramzi GHELBI

Présenté et soutenue le : 28/06/2016

**Sous la direction de :**

M<sup>r</sup>. Mohamed LATRACHE                      Enseignant                      ENP Alger

**Composition du jury :**

**Président :** M<sup>r</sup>. Brahim GUERGUEB                      Enseignant                      ENP Alger

**Examineur :** M<sup>r</sup>. Yacine BELKACEMI                      Enseignant                      ENP Alger

**Promotion : juin 2016**

# Dédicace

*A mon père adoré qui a rejoint les cieux trop tôt, beaucoup trop tôt...*

*A votre âme qui m'a quitté sans voir le fruit de son éducation  
L'âmenoble qui m'a toujours entourée comme une lumière qui m'éclaire  
le chemin.*

*Repose mon père en paix*

*A ma très chère Mère*

*Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez  
fait pour moi.*

*Que dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé  
et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.*

*A mon très cher Frère*

*Notre "SOUSSA", Je te dédie ce travail en vous souhaitant un  
avenir radieux, plein de bonheur et de succès.*

*A mes très chers Amis*

*Raouf, Sari, Tarek, Anis, Anis Joujou, Nani, Mouad, Mounaim, Sifou  
Avec qui j'ai partagé les plus beaux moments de ma vie au fil du  
temps.*

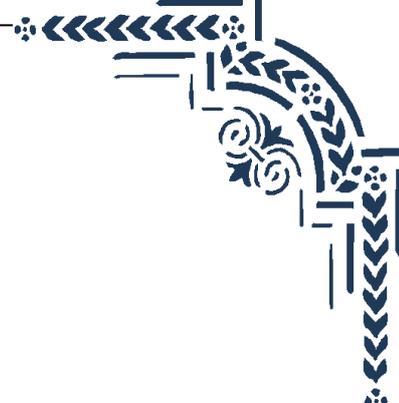
*A tous Mes enseignants pour lesquels je porte beaucoup de respect et de  
gratitude.*

*A toi mon amis, mon joueur préféré, mon binôme, Monder...*

*A toute ma famille... Une spéciale dédicace à Khadouja... Le  
nouveau membre de la famille.*

*A tous mes amis ...Oussama, Anouar, MLS, Raïd, Sifou, Anes,  
Hamza, Bayod, Amine, Mehdi, MouhDegla, Abd Allah, Nassim...*

*Une spéciale dédicace à la promotion 2014-2016 Génie Mécanique*



# Remerciement

*Je tient tout d'abord à remercier 'Dieu'le tout puissant pour nous avoirdonné le courage, la volonté et la patience pour aboutir à la réalisation de ce travail.*

*Je remercie, vivement et profondément, mon encadreur M. LATRECH MOHAMED, enseignant à l'ENP ALGER pour sa disponibilité, sa patience, sa gentillesse qui n'a cessé de nous aider, de nous soutenir et de nous prodiguer les précieux conseils. On Lui est fortement reconnaissants.*

*Je remercie vivement M.B.GUERGUEB pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le juré de notre soutenance.*

*Je suis aussi très reconnaissants à M .Y.BELKACEM, pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire.*

*Mes profondes gratitudes s'adressent à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail, particulièrement les ingénieurs d'ALGESCOpour leur soutien et toute l'aide qui nous ont apportée, mes collègues de la promotion 2013-2016,Génie mécanique de l'ENP Alger .*

*RAMZI*

الهدف من هذه الوثيقة هو الدراسة النظرية للسلوك الهيدروديناميكي لحبيبات الرمل المدفوعة بالتيار الهوائي في آلات الكشط . تمت النمذجة باستعمال نهج لاغرونج و من خلال وضع بعض الفرضيات التبسيطية على مجال سرعة تدفق الغاز. من جهة أخرى , تم تقديم تحليل نظري عن سرعة الجسيمات في تدفق الهواء كما تم تطوير نماذج الجسيمات سرعة المرتبطة بها.

كلمات مفتاحية: الجسيمات, الكشط, النمذجة , السرعة , المسار.

---

## Abstarct

The purpose of the present document is the theoretical study of the behavior of particles conveyed by air jet in sand grit blasting machines. The calculations of the trajectories of the particle are made by a Lagrangian approach by means of a simplified hypothesis on the velocity field of the gas. On the other hand, a theoretical analysis of the speed of the abrasive particles in the air stream is presented and the associated particle velocity models are developed.

**Key words:** Particles, sandblasting, modeling, jets, velocity, trajectory.

---

## Résumé

Le présent article a pour objet l'étude théorique du comportement hydrodynamique de particules abrasives entraînées par un jet dans les machines de sablages. La modélisation a été effectuée par une approche lagrangienne de la description de la trajectoire des particules moyennant des hypothèses simplifiées sur le champ de vitesse de l'écoulement gazeux. D'autre part, une analyse théorique des vitesses des particules abrasives dans le jet d'air est présentée et les modèles de vitesse de particules associées sont développées.

**Mot clés :** Particules, sablage, modélisation, jets, vitesse, trajectoire.

## *Table des matières*

Dédicace.....	<i>i</i>
Remerciement .....	<i>ii</i>
Résumé.....	<i>iii</i>
Table des matières.....	<i>v</i>
Liste des figures et des tableaux .....	<i>ix</i>
Nomenclature.....	<i>xii</i>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>

### **CHAPITRE I : GENERALITES**

I.1 Introduction.....	2
I.2 Notion de base sur l'opération de sablage .....	3
I.2.1 Définition .....	3
I.2.2 Méthodes d'application .....	3
I.2.2.1 Le sablage sec .....	3
I.2.2.2 Le sablage humide .....	6
I.3 Notion d'un écoulement diphasique.....	6
I.4 Classification des écoulements diphasiques .....	6
I.5 Approche théorique .....	7
I.6 Formulation pour les écoulements .....	8

### **CHAPITRE II:MODELISATION DES TRAJECTOIRE DES PARTICULES**

II.1 Introduction.....	11
II.2 Equation du mouvement d'une particule.....	12
II.2.1 Trajectoire entre deux chocs successifs .....	12
II.2.2 Condition de choc de la particules sur la paroi .....	13
II.2.2.1 Condition sans glissement.....	14
II.2.2.2 Condition avec glissement .....	15
III.3 Champ de vitesse du gaz (air).....	17

**CHAPITRE III : MODELISATION DE LA VITESSE DES PARTICULES ABRASIVES**

III.1	Introduction .....	19
III.2	Hypothèses et considérations préliminaires .....	20
III.3	Distribution spatiale des particules abrasives dans le jet d'air .....	21
III.4	La vitesse de l'écoulement d'air dans la buse de projection .....	22
III.5	La vitesse des particules abrasives dans la buse de projection .....	24
III.6	La vitesse des particules dans le jet libre .....	26

**CHAPITRE IV : SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT DANS LA MACHINE DE SABLAGE : CAS DE LA MACHINE MEC 212126**

IV.1	Introduction .....	28
IV.2	Présentation de la machine objet de notre étude .....	29
IV.3	La buse de projection utilisée .....	30
IV.4	Simulation de l'écoulement dans la buse de projection .....	31
IV.4.1	Conception de la pièce sous SOLIDWORKS .....	31
IV.4.2	Modélisation du parcours de fluide sous SOLIDWORKS .....	31
IV.4.3	Application du maillage sous GAMBIT .....	32
IV.4.4	Simulation sous FLUENT .....	32
IV.5	Résultat et discussion .....	33
IV.5.1	La pression de l'écoulement .....	33
IV.5.2	La vitesse de l'écoulement .....	34
<b>Conclusion générale</b> .....		<b>35</b>
Bibliographie .....		37

*Liste des figures*

**Figure I.1** – a) Sablage manuel, b) sablage automatique ..... 3

**Figure I.2** – Principe du sablage mécanique à sec ..... 4

**Figure I.3** – Machine de sablage par pression d'air direct ..... 5

**Figure I.4** – Machine de sablage par gravité..... 5

**Figure II.1** – Définitions des repères: (a) ( $O, i, j, k$ ) (fixe, lié au point d'arrêt du jet, porté par les axes  $Ox, Oy$  et  $Oz$ ; et (b) ( $M, r, s, t$ ) (mobile, lié au point d'impact  $M$  de la particule)..... 14

**Figure II.2** – Définition des différentes zones choisies pour représenter le champ de vitesse du gaz..... 23

**Figure III.1** – Les paramètres d'une machine de sablage. .... 17

**Figure III.2** – La trajectoire des particules, a) source ponctuelle, b) buse de taille finie..... 21

**Figure III.3** – Shématisation de l'accélération d'une particule à travers une buse..... 25

**Figure III.4** – Structure de l'écoulement de la particule dans le jet d'air libre..... 27

**Figure IV.1** – Machine de sablage automatique MEC model: PB-212126 SP..... 29

**Figure IV.2** – Une buse de projection angulaire objet de notre étude ..... 30

**Figure IV.3** – dessin de définition de la buse de projection angulaire objet de notre étude 30

**Figure IV.4** – a) La buse de projection réalisée sous SOLIDWORKS, b) vue en coupe de la buse de projection. .... 31

**Figure IV.5** – Modélisation du parcours du fluide à travers la buse de projection..... 31

**Figure IV.6** – Maillage volumique triangulaire sur le parcours du fluide ..... 32

**Figure IV.7** – Distribution de la pression du fluide sur tout le volume de l'orifice ..... 33

**Figure IV.8** – Distribution de la turbulence dans l'orifice de sablage ..... 34

**Figure IV.9** – Distribution de la vitesse de l'écoulement dans la buse de projection..... 34

**Figure IV.10** – Distribution de la vitesse de l'écoulement dans l'orifice de projection ..... 35

**Figure IV.11** – Distribution de la vitesse sur les parois de la buse de projection..... 35

## Nomenclature

<b>C</b>	Constante (=0.102)	<b>V<sub>a</sub></b>	vitesse d'avance du pistolet de projection[m/s]
<b>D</b>	diamètre de la buse [mm]	<b>t<sub>I</sub></b>	temps d'untour de la table [s]
<b>g</b>	la pesanteur [m.s <sup>-2</sup> ]	<b>y<sub>I</sub></b>	distance parcourue pendant t <sub>I</sub> [m]
<b>G</b>	facteur correctif	<b>h</b>	hauteur du tube à flamme[m]
<b>H</b>	hauteur buse - paroi [mm]	<b>n<sub>p</sub></b>	nombre de passage total du jet
<b>M</b>	moment aérodynamique [N.m]	<b>t<sub>c</sub></b>	durée totale du passage sur toute la pièce[s]
<b>N</b>	percussion [N.s]	<b>t<sub>p</sub></b>	durée totale du passage sur la zone d'étude[s]
<b>P</b>	portance [N]	<b>D<sub>imp</sub></b>	diamètre d'impact[m]
<b>R</b>	distance radiale [mm]	<b>t<sub>imp</sub></b>	durée d'impact par zone [s]
<b>Re<sub>o</sub></b>	Nombre de Reynolds à la sortie de la buse.	<b>t'</b>	temps pour atteindre la surface de la pièce[s]
<b>Rer</b>	nombre de Reynolds de particule calculé sur les vitesses limites	<b>t<sub>p</sub></b>	durée totale du passage sur la zone d'étude[s]
<b>T</b>	trainée [N]	<b>N<sub>bom</sub></b>	nombre de bombardement
<b>p</b>	pression [Pa]	<b>l'</b>	diamètre de la zone d'étude[m]
<b>p<sub>0</sub></b>	pression atmosphérique [Pa]	<b>S<sub>z</sub></b>	surface de la zone d'étude[m <sup>2</sup> ]
<b>r<sub>a</sub></b>	rayon de l'écoulement d'air [mm]	<b>Q<sub>air</sub></b>	débit volumique de l'air [m <sup>3</sup> /s]
<b>r<sub>p</sub></b>	rayon de l'écoulement des particules [mm].	<b>E<sub>ct</sub></b>	énergie cinétique totale du jet [J]
<b>V<sub>p</sub></b>	vitesse des particules [m/s]	<b>d</b>	distance de sablage[m]
<b>r<sub>p</sub></b>	rapport de la pression limite	<b>r<sub>i</sub></b>	constante des gaz parfaits [N.m/Kg.K]
<b>y</b>	la distance radiale [mm]		
<b>x</b>	la distance axiale [mm]		
<b>k</b>	l'exposante radiale		
<b>C<sub>D</sub></b>	coefficient de trainée		
<b>A<sub>p</sub></b>	section de passage d'orifice [m <sup>2</sup> ]		
<b>ρ<sub>a</sub></b>	densité de l'air[g /m <sup>3</sup> ]		
<b>ρ<sub>p</sub></b>	densité d'une particule[g/m <sup>3</sup> ]		
<b>d<sub>p</sub></b>	diamètre d'une particule [m]		
<b>L<sub>N</sub></b>	longueur de la buse[m]		

## *Introduction générale*

**A** la différence des écoulements monophasiques, constitués, comme leur nom l'indique d'une seule phase (gaz, liquide ou solide), les écoulements diphasiques mettent en présence deux phases, qu'elles soient ou non relatives au même constituant. Parmi ces écoulements on trouve les écoulements diphasiques air/particules.

Les jets diphasiques gaz-particules en impact sur une surface solide ont des applications dans des domaines très différents dans l'industrie: séparateurs gaz-solide basés sur la compétition forces de frottement-inertie des particules (impacteurs); procédés de séchage et de refroidissement, procédés de dépôt de couches par pulvérisation de particules réactives sur substrat chaud; etc....

L'une des applications de ce type d'écoulement dans l'industrie est les écoulements air/abrasif dans les machines de sablage. Ces machines sont considérées comme étant l'une des meilleures technologies utilisées pour la préparation de surfaces et le décapage des surfaces métalliques. Pour les matériaux durs et cassants, la force d'impact des particules abrasives provoque des fissures localisées à la surface de travail. Le matériau cible est éliminé par la formation et la propagation de ces fissures.

De l'analyse ci-dessus, il est évident que la vitesse des particules et la trajectoire sont des informations caractéristiques importantes, requises pour comprendre et modéliser le processus de préparation de surface dans les machines de sablage. Un travail considérable a été entrepris pour étudier les vitesses des particules dans un jet d'air ou de gaz; certaines études sur la modélisation du mouvement de l'air et d'abrasif ont été examinées par Momber et Humphrey . Stevenson et Hutchings expérimentalement étudié la relation entre la vitesse des particules et les conditions d'exploitation de la machine de sablage. [1]

Dans cet article, des modèles mathématiques pour les vitesses d'air et des particules abrasives dans les machines de sablage sont développés. La vitesse de l'air à travers une buse se trouve en premier. La vitesse des particules est ensuite modélisée compte tenu de la masse des particules et de la force de traînée du flux d'air. D'autre part, et comme application, une simulation de l'écoulement air/abrasif est réalisée sur une machine de sablage automatique utilisée pour la préparation de surface et le décapage des tubes à flamme et les pièces de transition des turbines à gaz.

# Chapitre I

## *Généralités*

### **I.1.Introduction**

Les domaines industriels concernées par les écoulements diphasiques vont être brièvement présentées. Les motivations d'études sont assez différentes dans chaque branche et quelques éléments explicatifs seront alors apportées [1].

Il y a manifestation des domaines où l'on produit délibérément des écoulements diphasiques, comme le génie chimique, où pour les besoins du procédé deux phases sont mises en contact, un liquide et un gaz par exemple, pour produire une nouvelle espèce à leur interface commune. Bien que la notion thermo dynamique de phase soit relative à l'un des trois états courants de la matière, solide, liquide ou gaz, on continue, par extension, à considérer les écoulements liquide-liquide, par exemple, comme diphasiques car leurs méthodes de description sont analogues à celles des écoulements diphasiques. En énergétique, on produit dans une chaudière de la vapeur en portant à ébullition le liquide et l'écoulement diphasique est délibérément produit [1].

Le transport pneumatique des poudres est un autre exemple d'écoulement diphasique qui, avec les exemples précédents, donnent une idée de la vaste diversité des situations rencontrées.

On se propose dans ce chapitre de donner quelques notions générales sur les écoulements diphasiques en générale, et les écoulements gaz/solide en particulier.

## I.2. Notion de base sur l'opération de sablage

### I.2.1. Définition

Le sablage, est un procédé de traitement de surface largement utilisé dans divers secteurs d'activité pour de nombreuses raisons. C'est un procédé dans lequel des particules abrasives (du sable) sont accélérées à une vitesse très élevée à travers une buse sur une surface métallique. Elles peuvent être transportées par l'eau de l'air comprimé à haute pression, ou éjectées par la force centrifuge d'une roue à aubes.

Pour l'industrie de turbomachine, la méthode la plus courante consiste à utiliser l'air comprimé pour propulser un matériau abrasif (du sable généralement) à partir d'une cuve de sablage, par l'intermédiaire d'un tuyau avec une buse de projection à son extrémité commandée manuellement par l'opérateur, ou automatiquement. L'opération se fait généralement dans un milieu fermé (des cabines pour des petites pièces, ou dans des chambres pour des pièces relativement grandes).



Figure.I.1. a) Sablage manuel, b) sablage automatique

### I.2.2. Méthodes d'application

Les méthodes d'application du sable peuvent être divisées en deux catégories différentes : le *sablage sec* et le *sablage humide*.

#### I.2.2.1. Le sablage sec

Il existe deux méthodes pour la préparation à sec; le *sablage mécanique* et le sablage à *pression d'air*.

### I.2.2.1.a. Le sablage mécanique

Le sablage mécanique s'effectue le plus souvent dans une armoire ou une cabine. Il est disponible soit en version manuelle, semi-automatique ou automatique. En règle générale, la machine est constituée d'une ou plusieurs roues de soufflage qui dirigent l'abrasif vers la pièce par la force centrifuge.

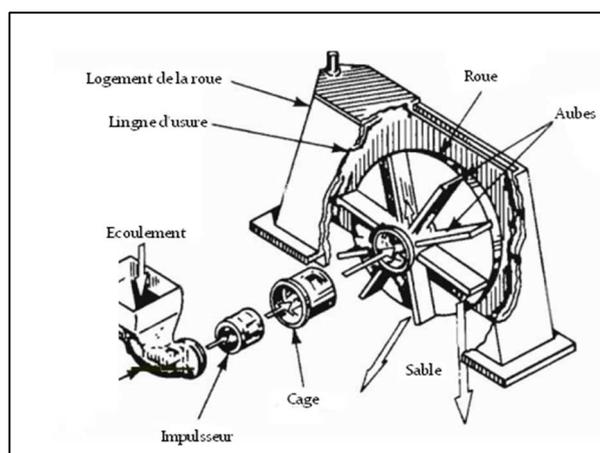


Figure.I.2. Principe du sablage mécanique à sec

D'une manière générale, la vitesse de l'abrasif (environ 80m/s) et le volume d'abrasif sont de telle façon que les systèmes mécaniques offrent un haut niveau de capacité de travail par unité de temps. En conséquence, l'équipement de sablage mécanique peut être orienté vers des applications de moyennes et grand production.

### I.2.2.1.b. Le sablage par pression d'air

Le sablage par pression d'air utilise l'air comprimé pour projeter l'abrasif sur une surface. La propulsion d'abrasif se fait soit par une pression directe ou par une méthode d'induction par gravité comme suit:

- **Méthode de pression directe** : pour le sablage à pression directe, le sable tombe d'un réservoir pressurisé dans un tuyau de soufflage (figure I.3). La conduite d'air comprimé est acheminé à la fois dans le tuyau de sablage et la partie supérieure de la cuve sous pression. La pression d'air (généralement 5 à 6 bar) dans le tuyau et la cuve sous pression sont égales permettant ainsi la chute libre de l'abrasif à travers une ouverture (point d'alimentation) au fond de la cuve sous pression.

L'abrasif qui chute à travers la cuve est capté par un jet d'air comprimé et transmis vers le point d'opération. Afin de maintenir une pression d'air, une soupape est montée

au point de remplissage de la machine et maintenu fermé de manière étanche par la pression de l'air. Une soupape de dosage est montée au niveau du point d'alimentation pour réguler le débit d'abrasif à une vitesse appropriée à la taille d'alésage de la buse et la pression de l'air.

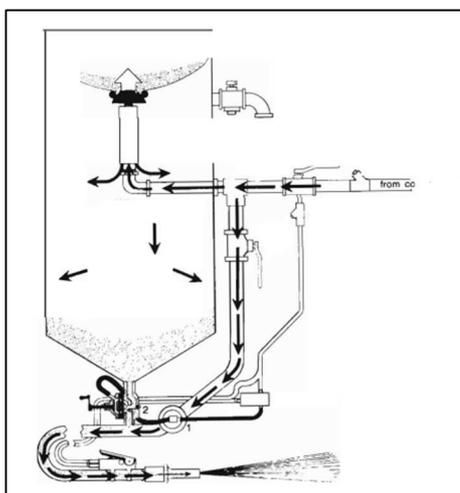


Figure.I.3. Machine de sablage par pression d'air direct

• **Méthode d'induction par gravité** : un équipement d'induction est utilisé pour mélanger l'air et l'abrasif (figure 13). Avec cet équipement, le sable tombe par gravité d'un réservoir de stockage aérien. L'alimentation en air entre dans le pistolet au point où l'abrasif est entraîné sous vide partiel, plus par gravité. L'expansion rapide de l'air comprimé dans le pistolet donne l'accélération finale à l'abrasif. Bien que ces systèmes puissent être appliqués pour un fonctionnement continu, ils sont généralement utilisés que pour des applications spécialisées telles que *le grenailage*.

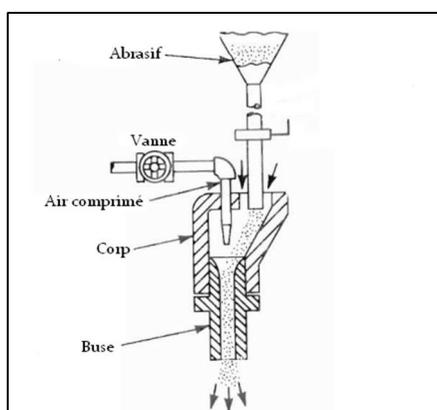


Figure.I.4. Machine de sablage par gravité

**I.2.2.2. Le sablage humide**

Le sablage humide consiste à propulser une boue par de l'air comprimé à une très grande vitesse vers la pièce à traiter. La boue se compose généralement d'abrasif fin en suspension dans l'eau traitée chimiquement.

Comme pour les unités de sablage à sec par pression directe, l'air comprimé est introduit dans une cuve contenant le mélange à une pression égale à celle dans le tuyau de soufflage. Égalisant la pression permet au mélange d'abrasif de passer à travers la vanne de mélange dans la conduite d'air. Le flux abrasif est commandé par une soupape à plein débit situé entre la trémie et chambre de mixage.

**I.3. Notion d'un écoulement diphasique**

A la différence des écoulements monophasiques, constitués, comme leur nom l'indique d'une seule phase (gaz, liquide ou solide), les écoulements diphasiques mettent en présence deux phases, qu'elles soient ou non relatives au même constituant. Ils peuvent s'agir d'un même fluide présent en deux phases différentes (eau et vapeur par exemple), de deux liquides différents dans une même phase (eau et huile liquides par exemple : cela intéresse particulièrement l'industrie pétrolière) ou encore deux fluides différents dans une phase différente (eau et air par exemple)...etc. Le comportement d'un écoulement en présence de deux fluides différents se trouve fortement modifié par rapport au cas monophasique ; c'est pourquoi il est à l'heure actuelle l'un des sous-domaines les plus actifs (au niveau de la recherche et des publications) de la mécanique des fluides [2].

Le comportement de l'écoulement diffère beaucoup en fonction de divers paramètres :

- les différents fluides (mélange liquide/gaz ou liquide/liquide)
- la géométrie du système (réservoir, tube horizontal, tube vertical, ...)
- le chauffage ou non du système et le type de chauffage utilisé (uniforme/non uniforme, par une paroi chauffée/de façon volumique).

**I.4. Classification des écoulements diphasique**

Les écoulements diphasiques peuvent être classés selon les phases en présence (liquide, solide, ou gaz) ou selon la distribution spatiale des interfaces. Pour le premier cas, les combinaisons possibles sont les suivantes [3] :

- mélange de deux liquides non miscibles (échangeurs à contact direct).
- mélange gaz-solide (transport pneumatique du blé, fumées, poussières).
- mélange solide -liquide (transport de boue).
- mélange gaz-liquide (extraction pétrolière).

Concernant le second cas, on distingue les écoulements suivants :

- à phase dispersées.
- à phase séparées.
- de transition.

### **I.5.Approche théorique pour l'étude des écoulements diphasiques**

Les écoulements diphasiques ont fait l'objet de nombreuses publications aussi bien expérimentales que théorique. C'est en particulier le cas des écoulements en conduites [10-11] en raison de leurs très nombreuses applications industrielles.

Deux types d'approches sont généralement considérées. Dans l'approche eulérienne, les deux phases solide et gazeuse sont considérées comme deux milieux continus séparés et en interaction. Cette description est utilisée dans le cas des conduites [12] ou des jets libres diphasiques [12-13]. Dans l'approche lagrangienne, on calcule les trajectoires individuelles de chaque particule en résolvant leur propre équation du mouvement dans un champ de vitesse de gaz supposé connu. Les propriétés de l'ensemble de la phase solide sont alors obtenues en effectuant une moyenne sur un nombre suffisamment important de trajectoires. Cette approche repose sur l'hypothèse d'un écoulement dilué bien que des travaux récents se soient penchés sur le cas de suspensions avec interactions entre particules [11].

C'est cette approche lagrangienne qui sera utilisée dans ce présent travail en raison de son originalité pour traiter le problème posé. Elle y semble a priori très bien adaptée puisque devant rendre compte de conditions expérimentales [1-4] où les particules sont diluées [14] (fractions volumiques instantané des débits solide/gaz largement inférieures à  $10^{-3}$ ). Enfin le module proposé présente l'avantage d'être développé dans un espace tridimensionnel et de tenir compte en particulier des trois composantes de la vitesse de rotation de chaque particule.

### I.6. Formulation pour les écoulements multiphasiques et diphasiques

On considère un écoulement multiphasique à  $n$  phases dans une conduite de section droite  $A_c$ . Les quantités fondamentales qui caractérisent ce type d'écoulement sont :

$m_i$  : le débit massique de la  $i$  éme phase.

$u_i$  : la vitesse de la  $i$  éme phase.

$\alpha_i$  : la fraction volumique de la  $i$  éme phase.

Les relations de base qui relient ces quantités sont :

- Le flux massique de la  $i$  éme phase :

$$G_i = \frac{m_i}{A_c} \quad (I.1)$$

- La vitesse superficielle de la  $i$  éme phase :

$$v_i = \frac{G_i}{\rho_i} \quad (I.2)$$

- La vitesse de la  $i$  éme phase :

$$u_i = \frac{v_i}{\alpha_i} \quad (I.3)$$

- La fraction massique de la  $i$  éme phase :

$$x_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (I.4)$$

- La fraction volumique de la  $i$  éme phase :

$$\alpha_i = \frac{\left( \frac{x_i}{\rho_i \cdot u_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{\rho_i \cdot u_i} \right)} \quad (I.5)$$

Pour calculer les paramètres de l'écoulement multiphasique, on applique les relations suivantes :

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \alpha_i \quad (I.6)$$

Ou :

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{\rho_i} \right) \quad (I.7)$$

$$u = \frac{1}{\rho} \cdot \sum_{i=1}^n G_i \quad (I.8)$$

Le gradient de la pression totale le long de l'écoulement est donné par la relation suivante :

$$\frac{dP}{dz} = \left( \frac{dP}{dz} \right)_g + \left( \frac{dP}{dz} \right)_a + \left( \frac{dP}{dz} \right)_f \quad (I.9)$$

Avec :

$$\left( \frac{dP}{dz} \right)_g = -g \cdot \cos\theta \cdot \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \rho_i \quad (I.10)$$

$$\left( \frac{dP}{dz} \right)_f = -\frac{\rho \cdot u^2}{2D} f \quad (I.11)$$

$$\left( \frac{dP}{dz} \right)_a = -\sum_{i=1}^n G_i \cdot \frac{du_i}{dz} \quad (I.12)$$

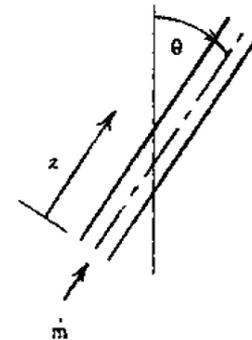
$\theta$  : est l'angle de la conduite à partir de la verticale.

$f$  : facteur de friction pour l'écoulement multiphasique

Dans la pratique, les caractéristiques les plus importantes à déterminer sont le gradient de pression et la fraction volumique. La détermination des autres paramètres est moins importante.

Le modèle de l'écoulement multiphasique le plus simple est l'écoulement homogène équilibré (HEM), pour lequel toutes les phases sont considérées équilibrées. Par conséquent, les vitesses de toutes les phases sont les mêmes.

$$u_i = u, \quad \text{pour tout } i$$



Cette hypothèse permet le calcul direct de la fraction volumique de la manière suivante :

$$\alpha_i = \frac{x_i}{\rho_i \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\rho_i}\right)} \quad (I.13)$$

La vitesse uniforme de toutes les phases est la même comme la vitesse du mélange :

$$u = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n G_i \quad (I.14)$$

Avec :

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\rho_i}\right) \quad (I.15)$$

Ce modèle permet d'évaluation directe de toutes les composantes du gradient de pression axial, si le  $x_i$  sont connus :

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_g = -\frac{g \cos \theta}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\rho_i}\right)} \quad (I.16)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_a = -\left(\sum_{i=1}^n G_i\right) \cdot \frac{du}{dz} \quad (I.17)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_g = -\frac{\rho u^2}{2D_f} \cdot f \quad (I.18)$$

# Chapitre II

## *Modélisation des trajectoires des particules abrasives*

### **II.1.Introduction**

Les jets diphasiques gaz-particules en impact sur une surface solide ont des applications dans des domaines très différents, notamment dans les procédés de préparation de surface par sablage [7,8,9].

Si, du point de vue fondamental, les jets homogènes ont donné lieu à de nombreux travaux, il n'en va pas de même pour les jets diphasiques en impact nettement plus délaissés par la littérature. C'est ainsi que l'on trouve peu de descriptions de comportement hydrodynamique des particules au voisinage de la surface réceptrice.

Des observations photographiques ont montré que leurs trajectoires étaient faites de plusieurs chocs et rebonds [8]. Des observations visuelles [7] confirmées par des mesures locales par analyse d'image [10] ont révélé que ces trajectoires s'arrêtaient dans des zones de dépôt annulaires (dans le cas d'un jet axisymétrique). Les valeurs des lieux d'arrêt ont pu enfin être corrélées empiriquement sous forme d'une loi d'extrapolation [7] en fonction d'un nombre de Stokes défini en sortie de buse.

Le but du présent chapitre est de proposer une approche théorique du problème permettant de rendre compte des observations (chocs et rebonds des particules avant leur arrêt final, à des abscisses dépendant de la granulométrie et des conditions expérimentales).

## II.2. Equation de mouvement d'un particule

### II.2.1. Trajectoire entre deux chocs successifs

On supposera faible la masse volumique du gaz  $\rho_g$  devant celle du solide  $\rho_p$  et négligeable l'influence des particules sur l'écoulement du fluide, dont le champ de vitesse supposé connu sera précisé ultérieurement. Entre deux chocs sur la paroi et pour une particule sphérique et rigide de diamètre  $d_0$ , les expressions vectorielles des forces de trainée  $T$  et de portance  $P$  s'écrivent [15]:

$$T = \frac{\pi}{8} d_p^2 \rho_g C_D \|V - U\| (V - U) \quad (II.1)$$

$$P = \frac{\pi}{8} d_p^3 \rho_g (\Omega - \text{rot}V) \wedge (U - V) \quad (II.2)$$

Le moment par rapport au centre de la particule s'écrit:

$$M = -\pi \mu_g d_p^3 \rho_g (\Omega - \text{rot}V) \quad (II.3)$$

Les nombres de Reynolds pour la translation  $Re_r$  et la rotation  $Re_\Omega$  sont définis par:

$$Re_r = \frac{\rho_g \|V - U\| d_p}{\mu_g} \quad (II.4)$$

$$Re_\Omega = \frac{\rho_g \|\Omega\| d_p^2}{\mu_g} \quad (II.5)$$

Les expressions vectorielles ci-dessus sont établies pour des valeurs de  $Re_r$  et  $Re_\Omega$  très petites. On les supposera encore valables pour des valeurs légèrement supérieures à 10 [16,17].

Le coefficient de trainée  $C_D$  est donné dans les domaines de Stokes et Van Allen par l'expression suivante [18]:

$$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + Re_r^{0.687}) \quad (II.6)$$

Les équations vectorielles régissant à tout instant le déplacement de la particule dans le gaz s'écrivent alors:

$$m_p \frac{dU}{dt} = m_p g + P + T \quad (II.7)$$

$$\frac{m_p d_p^2}{10} \frac{d\Omega}{dt} = M \quad (II.8)$$

En choisissant un repère orthonormé ayant pour origine le point d'arrêt O du jet (Fig. II.1), les expressions (7) et (8) projetées sur ces 3 axes Ox, Oy et Oz conduisent à six équations permettant de calculer les composantes  $U_x$ ,  $U_y$  et  $U_z$  de  $U$ , et  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  et  $\Omega_z$  de  $\Omega$ . Les relations associées suivantes, permettent de calculer la position de la particule.

$$\frac{dx}{dt} = U_x, \quad \frac{dy}{dt} = U_y, \quad \frac{dz}{dt} = U_z \quad (II.9)$$

### II.2.2. Condition de choc de la particule sur la paroi

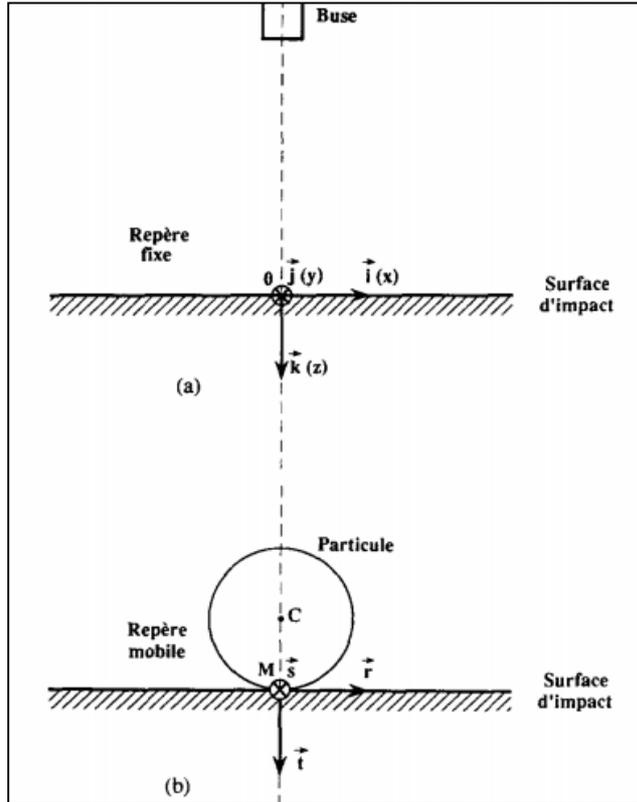
L'ensemble de la modélisation repose sur l'hypothèse d'une surface d'impact parfaitement lisse. Lors d'un choc plastique réel, la particule et/ou le lieu de la surface off se produit l'impact subissent une déformation. Afin de simplifier le problème, on suppose que le choc se produit selon une aire de contact infiniment petite mais avec un coefficient de restitution différent de un. On suppose également que la particule ne subit pas de fracture. On affecte respectivement les indices 1 et 2 aux grandeurs des vitesses linéaires et de rotation attachées à la particule juste avant et après le choc.

La résolution du problème repose sur le choix d'un nouveau repère orthonormé (de vecteurs unitaires  $r$ ,  $s$ ,  $t$ ) lié à la particule au moment du choc et dont l'origine est le point de contact des deux surfaces. L'axe  $t$  est perpendiculaire à la surface et dirigé vers le bas.  $r$  est orthogonal à  $t$  appartient au plan  $(u_1, t)$  et son sens est tel que  $u_1 \cdot r > 0$ .  $s$  complète le trièdre (Fig. II.1). Il en résulte que  $u_1 \cdot s = 0$ . Le choc est gouverné par les équations suivantes:

$$m_p (U_2 - U_1) = \int_0^{t_c} t \cdot dt = N \quad (II.10)$$

$$\frac{m_p d_p^2}{10} (\Omega_2 - U\Omega_1) = \int_0^{t_c} (CM \wedge F) \tag{II.11}$$

Avec: N est la percussion et F la réaction de la plaque sur la particule, définie sur le temps de choc  $t_c$ .



**Figure II.1 :** Définitions des repères: (a) (O, i, j, k) (fixe, lié au point d'arrêt du jet, porté par les axes Ox, Oy et Oz; et (b) (M, r, s, t) (mobile, lié au point d'impact M de la particule).

Le coefficient de restitution e est enfin défini par e :

$$U_{2t} = -e \cdot U_{t1} \tag{II.12}$$

Deux cas sont généralement considérés:

**II.2.2.1. Condition sans glissement :**

La condition correspondante résulte de la loi de Coulomb et s'exprime à partir des composantes de N par:

$$N_r^2 + N_s^2 < f_0^2 \cdot N_t^2 \quad (II. 13)$$

$f_0$  est le coefficient de frottement statique.

Les relations (10)-(12) associées à l'équation vectorielle (14) traduisant l'hypothèse de non glissement:

$$(U_2 + \Omega_2 \wedge CM) \wedge t = 0 \quad (II. 14)$$

permettent de calculer les composantes sur les trois axes des vitesses linéaires et de rotation juste à la fin du choc lorsque sont connues les valeurs correspondantes avant le choc [18]:

$$U_{2r} = -\frac{d_p}{7} \Omega_{1s} + \frac{5}{7} U_{1r} \quad (II. 15)$$

$$U_{2s} = \frac{d_p}{7} \Omega_{1r} \quad (II. 16)$$

$$U_{2t} = -e \cdot U_{1t} \quad (II. 17)$$

$$\Omega_{2r} = \frac{2}{7} \Omega_{1r} \quad (II. 18)$$

$$\Omega_{2s} = \frac{2}{7} \Omega_{1s} - \frac{10}{7d_p} U_{1r} \quad (II. 19)$$

La condition (13) s'écrit alors en fonction de ces grandeurs:

$$(d_p \Omega_{1s} + 2U_{1r})^2 + d_p^2 \Omega_{1r}^2 < 49f_0^2 (1 + e)^2 U_{1t}^2 \quad (II. 20)$$

### II.2.2.1. Condition avec glissement :

Le cas suivant est définie par la relation suivante :

$$N_r^2 + N_s^2 < f^2 \cdot N_t^2 \quad (II. 21)$$

$f$  est le coefficient de frottement dynamique.

Dans cette hypothèse, la composante tangentielle de la percussion ( $N_{1r}+N_{1s}$ ) est parallèle et de sens opposé la vitesse de glissement dont les coordonnées par rapport aux axes (M, r) et (M, s) sont respectivement

$$U_{2r} + \frac{\Omega_{2s}d_p}{2} \text{ et } U_{2s} - \frac{\Omega_{2r}d_p}{2}$$

Le produit de ces deux vecteurs étant nul, il en résulte l'expression:

$$U_{2s} \left( U_{2r} + \frac{\Omega_{2s}d_p}{2} \right) = (U_{2r} - U_{1r}) \left( U_{2s} - \frac{\Omega_{2r}d_p}{2} \right) \quad (II.22)$$

Sachant que :  $U_{1s} = 0$ .

Les relations (10)-(12), (22) et (23) permettent alors de calculer les valeurs des trois composantes des vecteurs U et  $\Omega$  après le choc en fonction de leurs valeurs avant le choc dans l'hypothèse où sont connus les coefficients de restitution, e, et de frottement, f.

$$U_{2r} = U_{1r} - \frac{f(1+e)U_{1t} \left( \Omega_{1s} + 2 \frac{U_{1r}}{d_p} \right)}{W} \quad (II.23)$$

$$U_{2s} = \frac{f(1+e)\Omega_{1r}U_{1t}}{W} \quad (II.24)$$

$$U_{2t} = -eU_{1t} \quad (II.25)$$

$$\Omega_{2s} = \Omega_{1s} - \frac{5f(1+e)U_{1t} \left( \Omega_{1s} + \frac{2U_{1r}}{d_p} \right)}{d_p W} \quad (II.26)$$

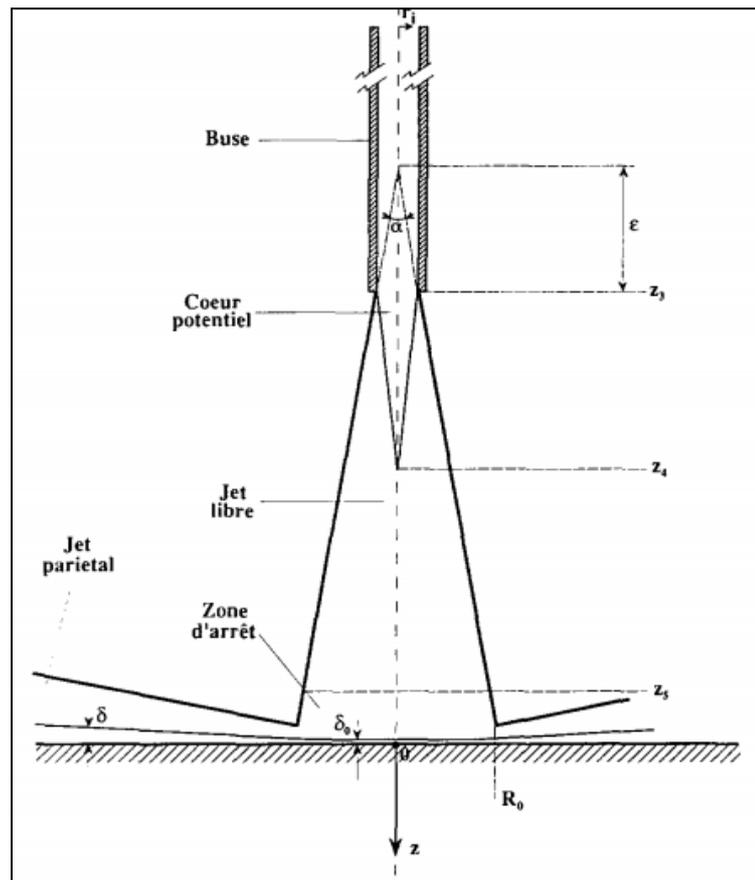
$$\Omega_{2t} = \Omega_{1t} \quad (II.27)$$

$$\text{Avec : } W = \left[ \Omega_{1s}^2 + \left( \Omega_{1s} + \frac{2U_{1r}}{d_p} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (II.28)$$

### II.3. Champ de vitesse de du gaz (air)

La résolution des équations du mouvement d'une particule entre deux chocs sur la paroi nécessite la connaissance point par point de la vitesse du gaz. Dans une approche globale et afin de simplifier le problème, le champ de vitesse spatial du gaz est représenté par un réseau de zones à l'intérieur desquelles on suppose connues certaines lois analytiques simples représentant le profil de vitesse du gaz.

Ces lois, tirées de la littérature, sont la plupart du temps les résultats de mesures effectuées sur des jets monophasiques turbulents (on suppose que les particules en faible concentration ne perturbent pas l'écoulement). Lorsque les données correspondantes à certaines zones manquent, elles sont remplacées par des expressions mathématiques reposant sur des critères de continuité (vitesses et dérivées) entre zones.



*Figure II.2* : Définition des différentes zones choisies pour représenter le champ de vitesse du gaz.

Enfin, deux autres simplifications ont été apportées au problème: les termes de fluctuation des vitesses du gaz dus à la turbulence sont négligés et on suppose que dans le cas où la particule sort des limites du jet,  $V = 0$  en tout point. La Fig. II.2 donne une représentation simplifiée globale de l'écoulement gazeux avant et après la zone d'impact.

On suppose que, dans la buse, les vitesses verticales sont représentées par les équations classiques correspondant à un écoulement turbulent dans une conduite cylindrique [19]. Des expériences effectuées ( $1600 < Re < 16000$ ) avec des formes et longueurs de buses différentes n'ont révélé aucune différence notable sur la position d'arrêt des particules sur la plaque réceptrice. On suppose donc l'écoulement parfaitement établi à l'intérieur de la buse et on ne tiendra pas compte d'éventuelles zones à recirculation localisées près de l'extrémité extérieure de la buse.

En aval de la buse, le jet est décomposé en trois parties principales [19]: zone de jet libre, zone d'arrêt, zone d'écoulement pariétal. L'ensemble est supposé symétrique par rapport à l'axe Oz.

# Chapitre III

## *Modélisation de la vitesse des particules abrasives*

### **III.1.Introduction**

Les machines de sablage sont des technologies modernes utilisées pour la préparation de surface d'un substrat métallique. Un paramètre clé pour la compréhension du processus de ces machines est la détermination de la vitesse des particules abrasives. Dans cet chapitre, une approche théorique pour l'évaluation de la vitesse des particules abrasives est présentée et développée.

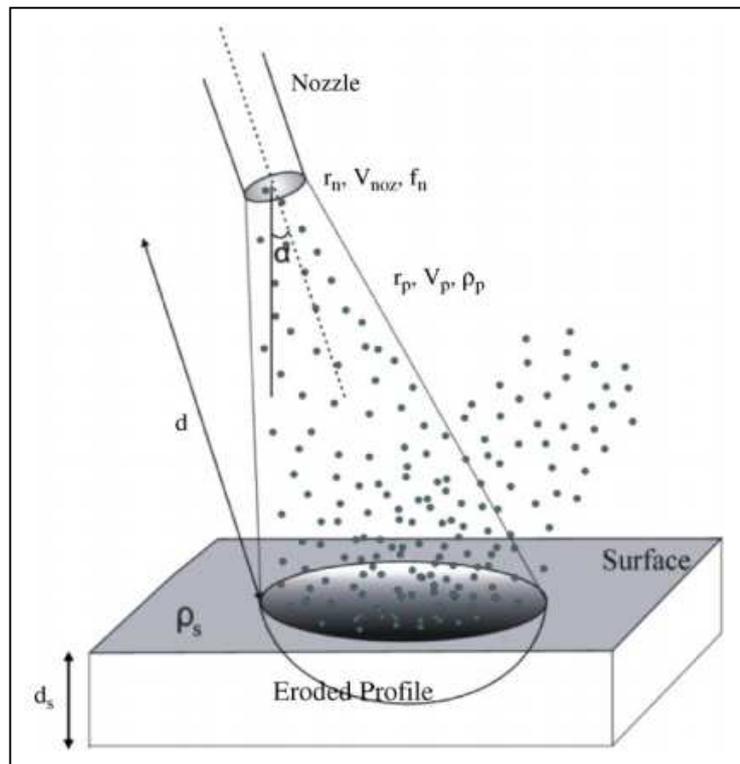
Cette vitesse à la sortie de la buse de projection d'abrasif est basée sur la longueur de la buse, le diamètre moyen des particules, la densité des particules, la densité et la vitesse de l'air. La distribution de la vitesse des particules dans le jet diphasique est représenté également dans cette section, ainsi que le profile de vitesse dans la section transversale de la buse de projection en prend en considération les interactions air-particules.

Une solution numérique est établit pour ce problème, pour la détermination de la vitesse en divisant la buse et l'écoulement d'air en petites segments dans une direction axiale.

### III.2. Hypothèses et considérations préliminaires

Pour cette étude, on considère une machine de sablage avec une buse de projection axisymétrique, d'un rayon  $r_n$ , et placé à une distance  $d$  de la surface de substrat et lance un écoulement de particules abrasives sphériques propulsées à l'aide de l'air comprimé. Pour des buses de projection de diamètres de 0.4-5 mm, et des vitesses de particules de 100-200 m/s, on peut assumer que les particules se déplacent dans des directions droites de la sortie de la buse vers la surface du substrat. La buse de projection peut être inclinée d'un angle  $\alpha$  par rapport à la surface.

Tous les particules abrasives ont la même forme de rayon  $r_p$ , une densité  $\rho_p$  et une vitesse  $V_p$ . La figure III.1 représente la machine de sablage utilisée dans cette étude.



**Figure III.1 :** Les paramètres d'une machine de sablage

Pour notre modèle, on néglige également la fracture des particules abrasives, les forces de frottement et tout échange de chaleur avec le milieu ambiant.

### III.3. Distribution spatiale des particules abrasives dans le jet d'air

La simulation des trajectoire de mouvement des particules comme ils sont lancées de la buse de projection, la description spatiale des vitesses des particules est un facteur très important.

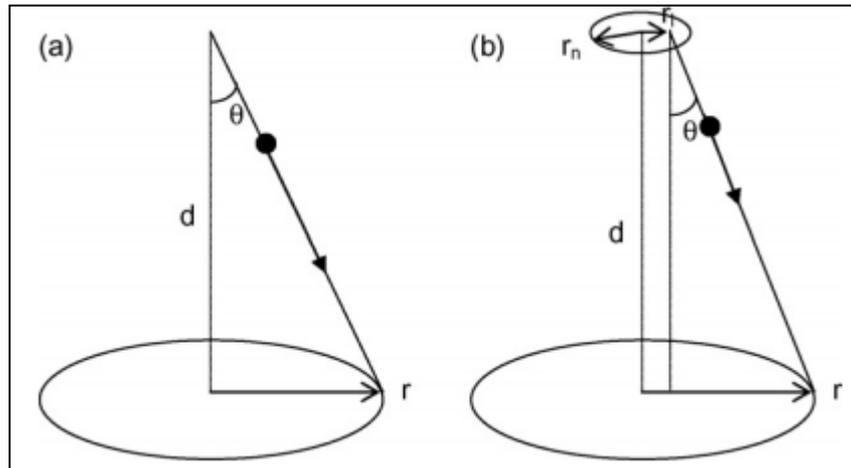
Selon Ghobeity et al, la probabilité qu'une particule arrive à la surface plane du substrat à une distance entre  $r$  et  $r+dr$  de la buse de projection est donnée par :

$$P(r)dr = 2 \cdot \left(\frac{\beta}{d}\right)^2 r e^{-\left(\frac{\beta r}{d}\right)^2} dr \quad (III.1)$$

Avec:  $d$  est la distance entre la buse et la surface de substrat, et  $\beta$  est le facteur de concentration déterminé expérimentalement.

Cela peut être exprimé aussi comme la probabilité qu'une particule atteint la surface entre  $\theta$  et  $\theta+d\theta$ , par la relation suivante:

$$P(\theta)d\theta = \frac{2\beta^2 \sin(\theta)}{\cos^3(\theta)} e^{-(\beta)^2 \tan^2(\theta)} d\theta \quad (III.2)$$



**Figure III.2 :** La trajectoire des particules, a) source ponctuelle, b) buse de taille finie

La distribution donnée dans l'équation (III.1) suppose que les particules sont lancées à partir d'une source ponctuelle (figure.III.2). Pour éviter les problèmes quand la surface est relativement proche de la buse, ou lorsque la buse est relativement grande, une méthode a été développée afin de rapprocher la buse de source ponctuelle par une buse de taille

finie. Pour être en mesure de lancer des particules à partir d'une de taille finie et assure encore que les particules arrivent à la surface à un emplacement radial,  $r$ , un rayon de coupure,  $r_c$ , pour lequel il est hautement improbable que toute particule arrive à la surface correctement. La probabilité que les particules arrivent à la surface entre  $r = 0$  et  $r = r_c$  est donnée par:

$$P(r_c) = 1 - e^{-\left(\frac{\beta r_c}{d}\right)^2} \quad (III.3)$$

On suppose que  $P(r_c) = 0.9999$ , on trouve donc que :

$$r_c = \frac{d\sqrt{-4 \ln(1 - 0.9999)}}{2\beta} \quad (III.4)$$

Et l'angle pour le quel les particules sont lancées est :

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{r - r_1}{d} \right) \quad (III.5)$$

Cette approche modifie légèrement les angles à laquelle les particules sont lancées, par rapport au cas d'une source ponctuelle.

#### III.4. La vitesse de l'écoulement d'air dans la buse de projection

Les buse de projection sont conçues d'une manière à réduire la section de sortie pour accélérer les particules abrasives, pour une pression de sablage donnée. La fonction de la buse est donc, de transformer l'énergie de pression en énergie cinétique de particules abrasives sous forme d'un flux d'air-abrasif.

Pour cette étude, pour faciliter l'analyse, on considère uniquement des buses de formes coniques avec des sections d'écoulement constantes. On considère aussi un écoulement d'air unidirectionnel à travers la buse. Ce type d'écoulement peut être étudié en ignorant les variations de la vitesse de l'écoulement des les différents sections de la buse, et en remplaçant les différentes valeurs des paramètres de l'écoulement par leur valeurs moyennes.

Pour un écoulement stable, l'équation de continuité est donnée par la relation suivante:

$$\frac{d\rho_A}{\rho_A} + \frac{dV_A}{V_A} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (III. 6)$$

Où : A est la section transversal de la buse,  $\rho_A$  est la densité de l'air et  $V_A$  est la vitesse de l'air.

Le flux d'air passe de la région de haute pression à la région de basse pression pour générer un écoulement de très grande vitesse. L'écoulement peut être considéré comme isentropique est le débit constant dans chaque section de la buse. En utilisant l'équation de **Bernoulli** pour un écoulement compressible comme fonction de la fraction de pression, la vitesse de l'air à la sortie de la buse peut être donnée par la relation suivante:

$$V_A = \left( 2 \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{k-1/k} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (III. 7)$$

Avec: k est l'exposante adiabatique qui prend la valeur 1.4 pour l'air, P est la pression absolue de l'air, and  $P_0$  est la pression atmosphérique. La densité de l'air dépend de la pression d'air et la température par la relation suivante:

$$\frac{P}{\rho_A} = R_i T \quad (III. 8)$$

Avec :  $R_i$  est la constante des gaz parfaits et T est la température absolue.

Car l'air est incompressible, le débit volumique de l'air n'est pas constant. Le débit massique théorique maximal de l'air est obtenu pour un rapport de pression critique :

$$r_{lim} = \frac{P}{P_0} = \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}} \quad (III. 9)$$

Dans une buse de projection cylindrique, la vitesse de l'écoulement d'air augmente lorsque la pression diminue. Mais, il existe une valeur critique de la vitesse qui ne peut pas être dépassée, qui dépend des paramètres de l'air. La vitesse maximale de l'air dans une buse de projection parallèle est donnée par:

$$V_L = \left( k \frac{P}{\rho_A} \right)^{\frac{1}{2}} = (kR_i T)^{\frac{1}{2}} \quad (III. 10)$$

Il est noté que la vitesse du son à la sortie de la buse pour les mêmes conditions de l'air à l'entrée de la buse dépend de la température atteinte à la sortie de la buse. La température à la sortie de la buse est plus importante pour une expansion isotherme qu'une expansion isentropique. Si on considère que l'écoulement est isentropique, sans échange de chaleur avec le milieu extérieur, la vitesse sonique de l'air peut être calculé par :

$$V_L = \left( 2 \frac{K}{K+1} \frac{P}{\rho_A} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( 2 \frac{K}{K+1} R_i T \right)^{\frac{1}{2}} \quad (III. 11)$$

Dans la réalité, le frottement inévitable va causer une diminution dans la vitesse de l'écoulement dans la buse. Pour cela, on utilise un coefficient de frottement  $\eta_N$ , qui permet d'estimer la vitesse réel du flux d'air en utilisant la relation suivante :

$$V_A = \left( 2\eta_N \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{k-1/k} \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (III. 12)$$

Si on prend en considération l'efficacité de la buse, l'exposante adiabatique modifiée sera donnée par la relation suivante :

$$k_\eta = \frac{k}{k - \eta_N(k - 1)} \quad (III. 13)$$

Par conséquent, le rapport de pression critique sera donné donc par :

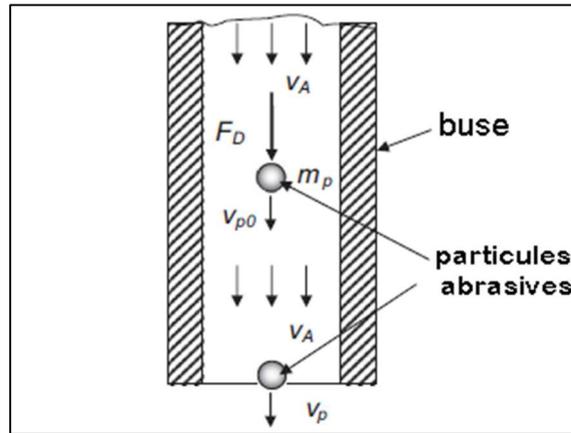
$$r_{\eta \text{ lim}} = \frac{P}{P_0} = \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{k_\eta}{k_\eta - 1}} \quad (III. 14)$$

### III.5. La vitesse des particules abrasives dans la buse de projection

Les particules abrasives dans la buse de projection sont accélérées par le jet de l'air comprimé à cause de la force de trainée. Pour simplifier l'analyse, les hypothèses suivantes sont à poser: (1) les particules sont distribuées de façon que les interactions entre les particules est négligeable. (2) les particules ont les mêmes propriétés physiques avec une

taille uniforme. (3) la rotation des particules est négligée. (4) écoulement air-abrasif stationnaire et unidirectionnel.

Une schématisation de l'accélération des particules par le jet de l'air comprimé est représentée dans la figure III.3 suivante :



**Figure III.3 :** Schématisation de l'accélération d'une particule à travers une buse

L'accélération de particules à travers une buse est régie par la deuxième loi du mouvement de Newton,

$$m_p \cdot a_p = m_p \cdot \frac{dV_p}{dt} = F_D \quad (III. 15)$$

Où :  $m_p$ ,  $V_p$  et  $a_p$  sont respectivement la masse, la vitesse et l'accélération de la particule, et  $F_D$  est la force de traînée [22].

Cette force est donnée par la relation suivante :

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot A_p \cdot \rho_a \cdot (V_a - V_p)^2 \quad (III. 16)$$

Où :  $A_p$  est la section de passage des particules,  $v_a$  est la vitesse de l'air et  $C_D$  est le coefficient de traînée [22].

Si la densité de la particule est  $\rho_p$  et son diamètre est  $d_p$ , la masse et la section de passage sont données respectivement par les relations suivantes :

$$m_p = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \quad (III. 17)$$

$$A_p = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_p^2 \quad (III. 18)$$

Réarrangeant les équations () et (), on obtient :

$$a_p = \frac{dv_p}{dt} = \left( \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho_A}{4 \cdot d_p \cdot \rho_p} \right) (V_a - V_p)^2 \quad (III. 19)$$

Une approximation de la vitesse des particules est donnée, on admettant que la vitesse de la particule sur la longueur de la buse  $L_N$  reste constante, est donc cette vitesse peut être donnée par :

$$V_p = \left( \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho_A \cdot L_N}{4 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \rho_p} \right)^{1/2} (V_a - V_p) \quad (III. 20)$$

Pour établir une relation plus proche à la réalité, on utilise une solution numérique approchée, en divisant la longueur de la buse en  $n$  parties identiques. Pour chaque segment, on suppose que la vitesse des particules est constante, et la vitesse relative  $V_a - V_p$  est calculé en utilisant la vitesse de la particule au point de départ du segment.

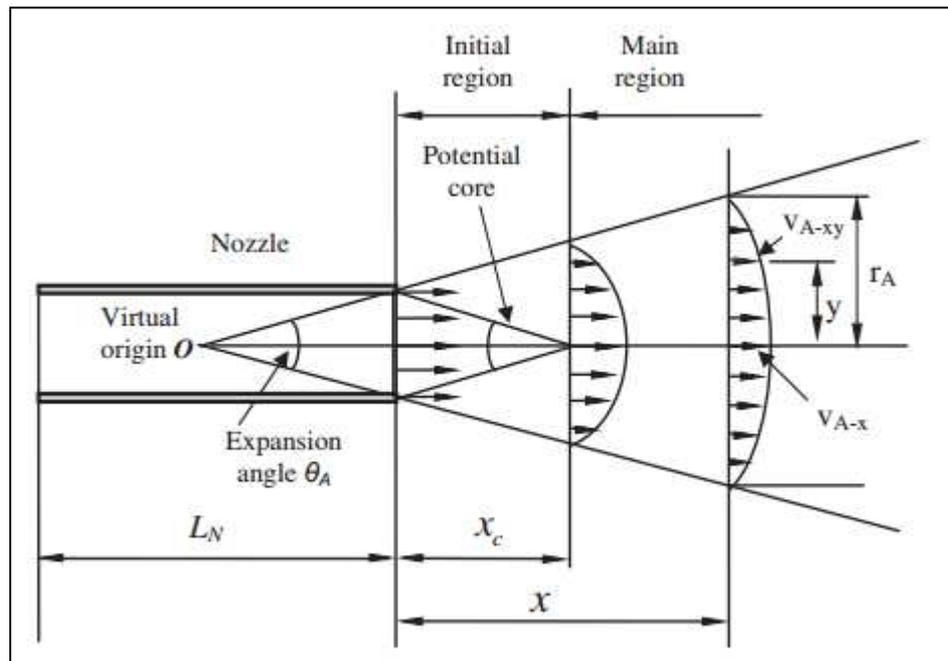
Si la vitesse de l'écoulement au point de départ est  $V_{Pi-1}$ , et la vitesse à la fin de segment est  $V_{Pi}$  et l'accélération est  $a_{Pi}$ , on peut montrer que :

$$V_{Pi}^2 - V_{Pi-1}^2 = \frac{2a_{Pi}L_N}{n} \quad (III. 21)$$

### III.6. La vitesse des particules dans un jet libre

Après passage à travers la sortie de buse avec une vitesse quasi-uniforme, l'écoulement du jet libre est soumise à l'air ambiant entraînement et la taille du jet augmente progressivement à mesure qu'il à une distance de la buse. Pour un jet d'air pur à partir d'une buse cylindrique, avec un nombre de Reynolds supérieur à 2300, il est en fait une circulaire jet turbulent [23]. En raison de l'entraînement de l'air ambiant, la vitesse du jet d'air se dégrade lorsqu'il se déplace en aval de la sortie de la buse.

L'évolution de la structure de la vitesse de particule est divisé en deux régions, comme le représente la figure III.4 suivante :



**Figure III.4 :** Structure de l'écoulement de la particule dans le jet d'air libre

La région initiale est à partir de la sortie de la buse à l'extrémité du noyau de potentiel. Le noyau de potentiel est une zone conique d'écoulement avec une vitesse diminuée égale à la vitesse à sortie de la buse. Il est entouré par une couche de mélange en raison de la couche de cisaillement créé par la différence de vitesse entre le jet et le fluide ambiant.

La région principale, également connue sous le nom de la région d'écoulement pleinement développé, est la région éloignée de l'extrémité du noyau de potentiel. Dans cette région, la turbulence a pénétré dans l'axe du jet et le noyau potentiel a disparu.

# Chapitre IV

## *Simulation de l'écoulement dans la machine de sablage : cas de la machine MEC PB212126*

### **IV.1.Introduction**

Vu la complexité de l'étude des écoulement diphasique par la méthode théorique analytique, il est d'usage général d'utiliser des simulation numérique en utilisant un outils informatique parmi plusieurs existent.

Dans cette section, on présent une simulation numérique complète de l'écoulement diphasique air/particules. Comme exemple d'étude, on prend le cas de la buse de projection d'abrasif de la machine de sablage automatique MEC PB212126, utilisé au niveau de l'atelier de GE Oil & Gas ALGESCO.

Pour se faire, on simule le problème de l'écoulement diphasique sous *FLUENT*, en utilisant la méthode " Eulérienne". Dans ce cas, on utilise des propriétés de l'écoulement les plus proches à la réalité, pour avoir des résultats les plus réels possibles. D'autre hypothèse simplificatrices sont utilisées pour faciliter l'étude.

Après application des conditions initiales et les conditions aux limites, on présent les résultats de la simulation en termes de pression et vitesse de des particules abrasives.

## **IV.2.Présentation de la machine objet de l'étude**

MEC model: PB-212126 SPL est une machine de sablage automatique de grandes dimensions à table rotative travaillant en cycle, utilisée pour le décapage et la préparation de surface des pièces de transition, et des tubes à flamme des turbines à gaz, pour l'application des différents type de revêtement. Son pistolet fonctionne d'une manière automatique est conçu d'une façon à être capable de traiter des pièces de géométries spéciaux et pénétrer dans des endroits difficiles ( sablage interne ) tel que les tubes à flamme et les pièces de transition des turbines à gaz.



*Figure IV.1 :Machine de sablage automatique MEC model: PB-212126 SP*

Cette machine offre plusieurs options en terme de type d'abrasif (sable) et de buse de projection selon l'application en question. Elle fonctionne en utilisant de l'air comprimé et selon le principe d'alimentation en abrasif par surpression. La cabine est équipée d'une installation de recyclage et de nettoyage de l'abrasif en continu.

### IV.3. La buse de projection utilisée

Sur MEC PB212126, on utilise une buse de projection angulaire pour propulser les particules abrasives vers la surface de la pièce à traiter ( figure IV.2). Cette buse est conçu en carbure de tungstène.



Figure IV.2 : Une buse de projection angulaire objet de notre étude

C'est un type de buse utilisé pour traiter opérer dans des endroits difficiles et serrés, ou bien pour des pièces de géométrie spéciale. Cette buse est constituée de deux parties montées avec serrage. Une partie intérieure de forme conique construite en carbure de tungstène. Cette partie porte un trou droit de 8 mm incliné d'un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe pour projeter le sable.

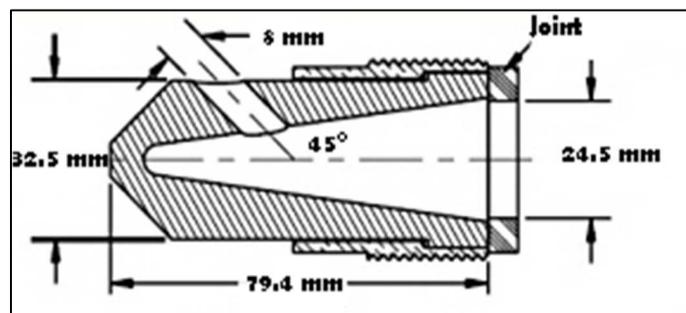


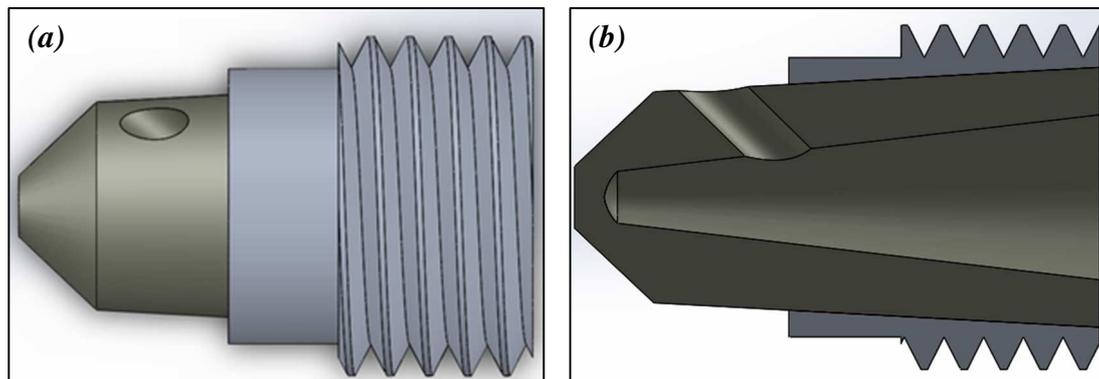
Figure IV.3 : Dessin de définition de la buse de projection angulaire objet de notre étude

#### IV.4.Simulation de l'écoulement dans la buse de projection

Pour se faire, on utilise FLUENT, un logiciel de simulation MDF/CFD très puissant, suivant les étapes suivante :

##### IV.4.1.Conception de la pièce sous SOLIDWORKS

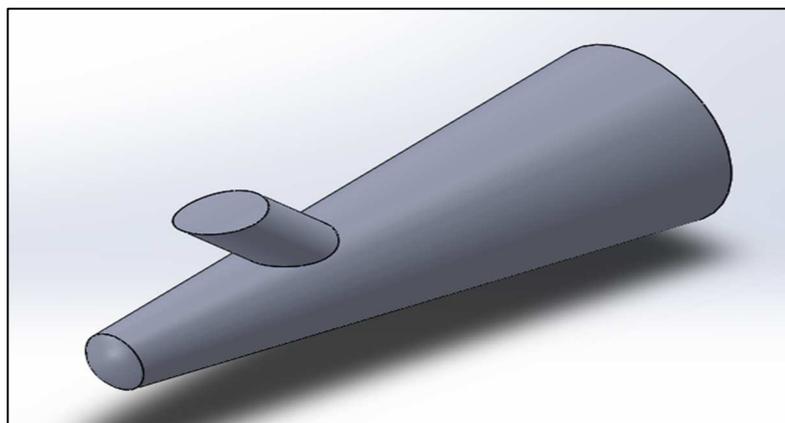
On utilisant SOLIDWORKS, on fait la conception de la buse de projection par les dimension réels



**Figure.IV.4:** a) La buse de projection réalisée sous SOLIDWORKS, b) vue en coupe de la buse de projection

##### IV.4.2.Modélisation du parcours de fluide sous SOLIDWORKS

Pour simuler l'écoulement diphasique du mélange air / abrasif dans la buse, on doit d'abord faire une modélisation du parcours du fluide sous **SOLIDWORKS**, puis enregistre le fichier sous l'extension **.IGES**.



**Figure.IV.5:**Modélisation du parcours du fluide à travers la buse de projection.

#### IV.4.3. Application du maillage sous GAMBIT

On importe le fichier *.IGES* sous *GAMBIT*, et on applique un maillage volumique triangulaire sur le parcours du fluide, avec un espacement de 0.2 pour avoir des résultats de précision. On exporte le fichier sous l'extension *.MSH*.

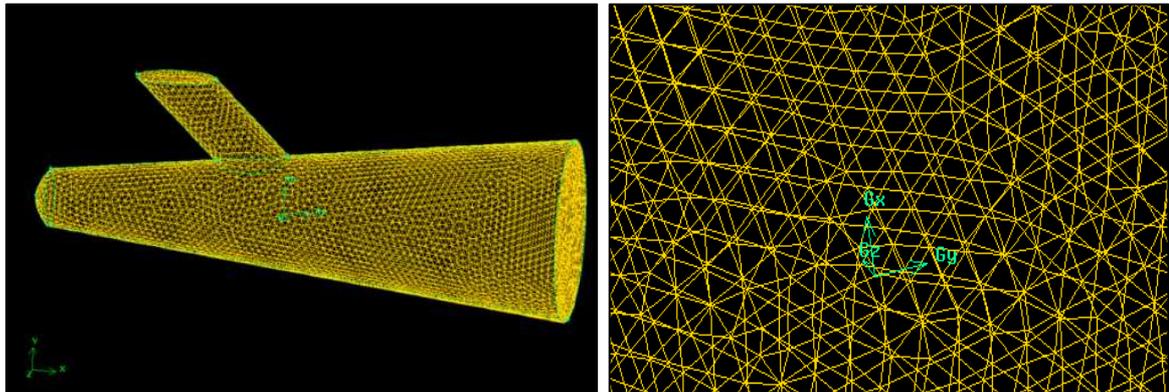


Figure.IV.6: Maillage volumique triangulaire sur le parcours du fluide

#### IV.4.4. La simulation sous FLUENT

Après maillage, on utilise *FLUENT* pour faire la simulation de l'écoulement du mélange air/abrasif à travers la buse de projection. On a utilisé les données et les hypothèses suivantes :

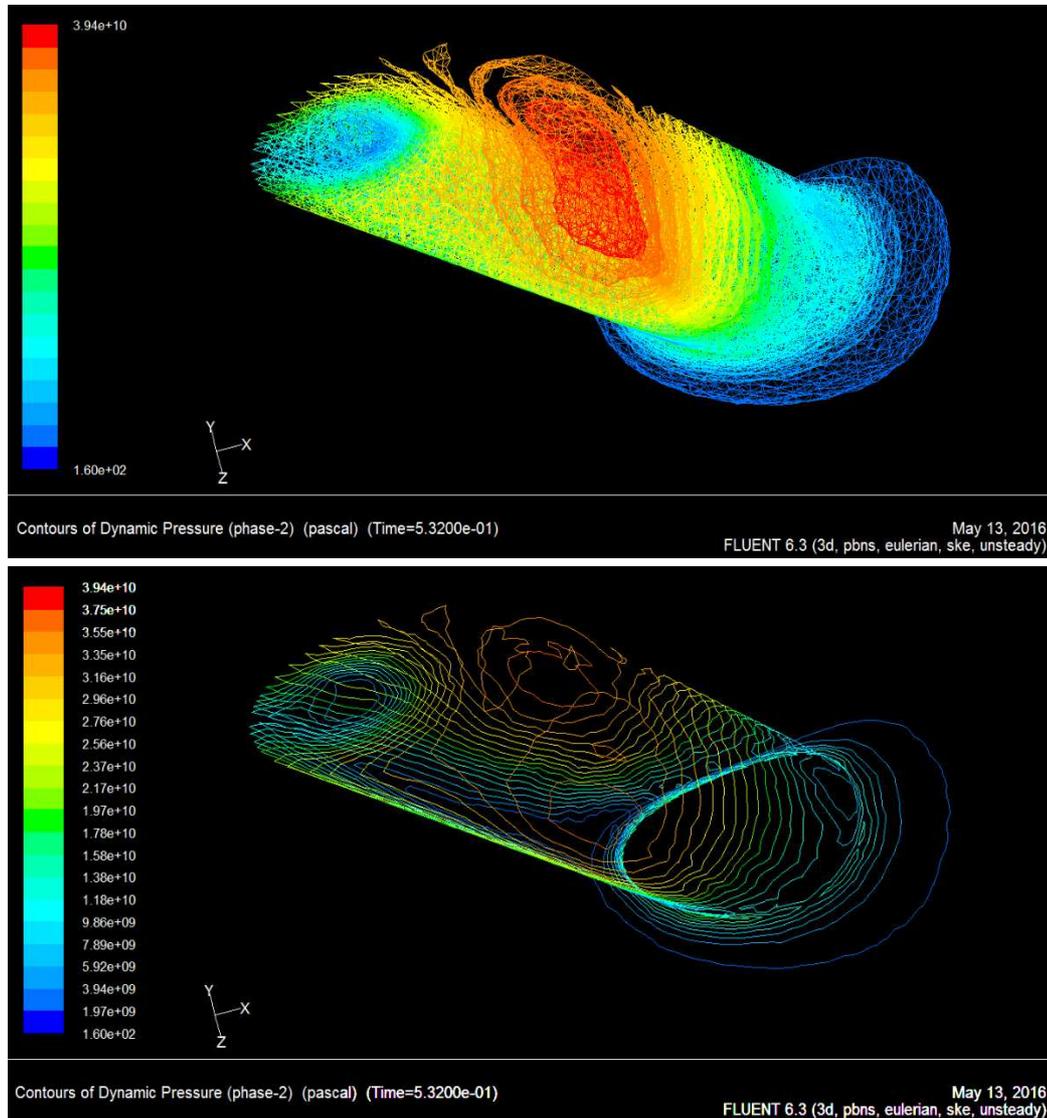
- Ecoulement diphasique granulaire (grains de particule suspendus dans l'air).
- Ecoulement turbulent et instationnaire.
- Calcul de l'énergie par la méthode Eulérienne.
- Condition initiale sur la vitesse à l'entrée, et condition aux limites sur la pression à la sortie.

On a utilisé un nombre d'itérations de 1000, et on a tracé les courbes résiduelles pour observer l'avancement des calculs.

## IV.5. Résultats et discussion

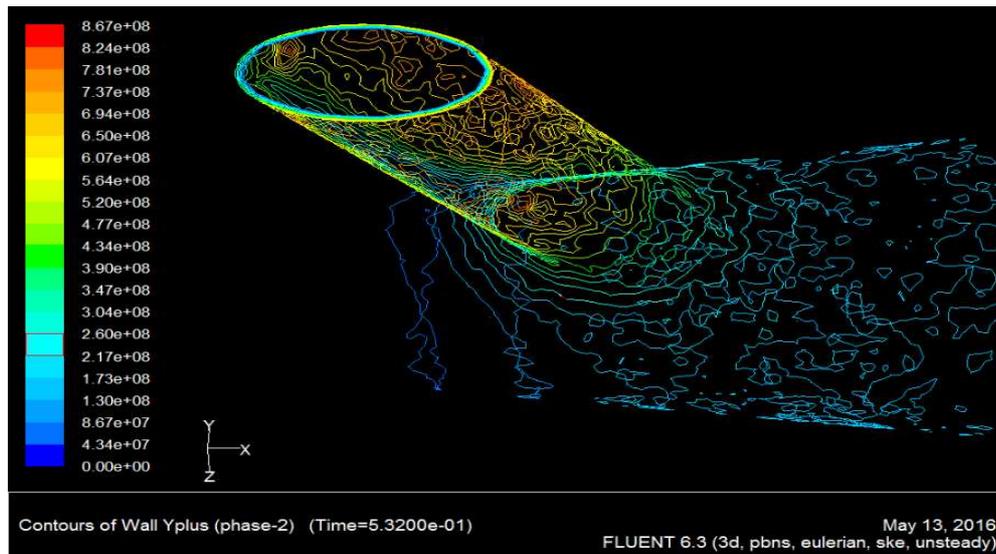
### IV.5.1. La pression de l'écoulement

Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures suivantes :



**Figure IV.7.** Distribution de la pression du fluide sur tout le volume de l'orifice de sablage

La figure IV.7 représente la distribution de la pression dynamique de l'écoulement à travers l'orifice de la buse de projection. On remarque une distribution de pression non homogène dans l'orifice. Ces fluctuations reviennent à la déviation brusque de l'écoulement de la buse vers l'orifice. Ils créent aussi des turbulences importantes dans l'orifice de sablage illustrées par figure III.8.

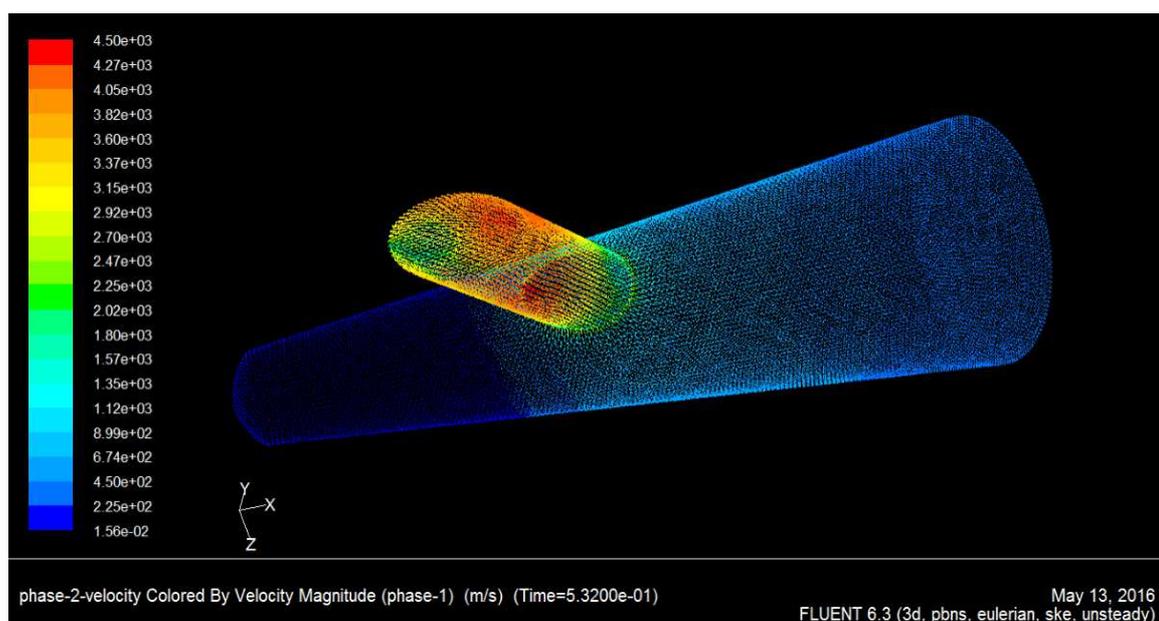


*Figure.IV.8. Distribution de la turbulence dans l'orifice de sablage*

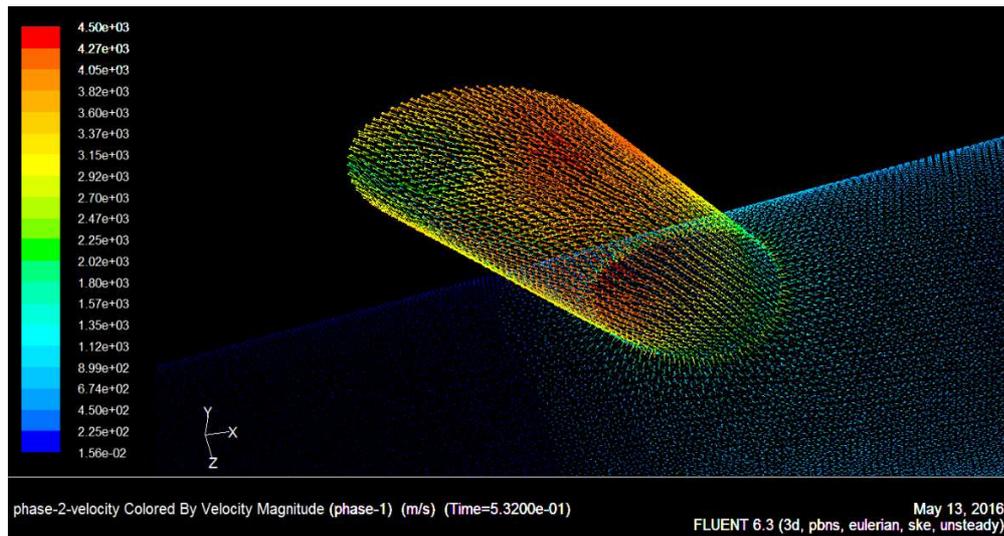
Les turbulences de l'écoulement dans la buse de projection, ont influencées considérablement à leurs tour sur la vitesse d'écoulement, et donc sur l'efficacité et l'homogénéité du jet abrasif.

#### IV.5.2. La vitesse de l'écoulement

La figure IV.9 représente la distribution des vecteurs vitesse de l'écoulement diphasique air/abrasif à travers la buse de projection.



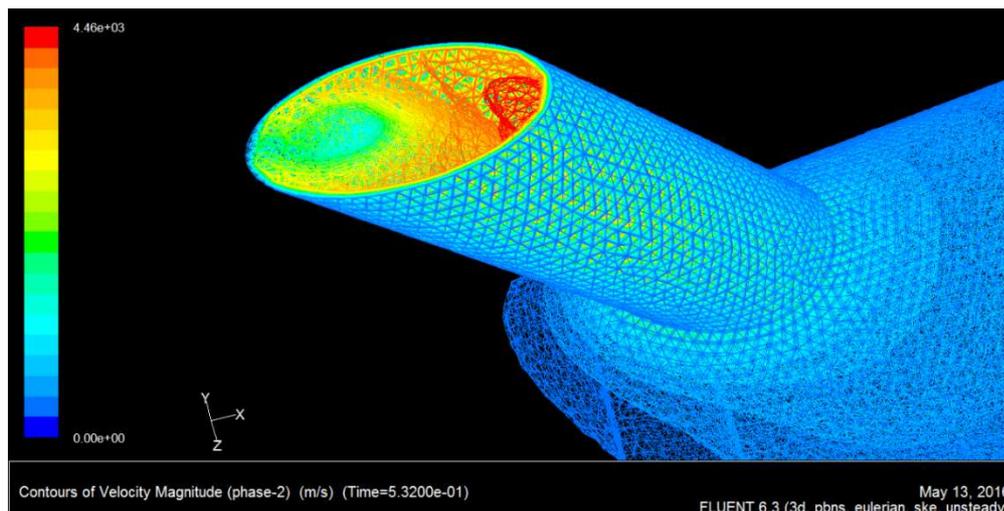
*Figure.IV.9: Distribution de la vitesse de l'écoulement dans la buse de projection*



**Figure.IV.10:** Distribution de la vitesse de l'écoulement dans l'orifice de projection

D'autre part, la figure IV.10 représente la distribution des vecteurs dans l'orifice de projection.

On remarque une élévation de vitesse très importante dans l'orifice de projection. Cette augmentation due à la diminution brusque de la section de passage du fluide. On remarque aussi qu'il y a des régions de l'orifice avec des vitesses faibles (en vert). Ces fluctuations conduites à un écoulement perturbé à la sortie de la buse.



**Figure.IV.11:** Distribution de la vitesse sur les parois de la buse de projection

Si on observe aussi la figure IV.12, on remarque une vitesse nulle de l'écoulement des particules en contact avec les proies de la buse de projection.

## *Conclusion générale*

Dans ce projet, nous avons mis en place l'étude des caractéristiques de l'écoulement air/particule dans les machines de sablage en générale, et la machine de sablage automatique MEC PB212126 en particulier.

La modélisation des trajectoires projetées par un jet gazeux sur une surface plane a été effectuée par une approche lagrangienne. Les calculs ont été faits sur la base d'un champ de vitesse connu du gaz vecteur dans le jet libre impactant, la zone d'arrêt, le jet pariétal et les couches limites correspondantes. Les résultats montrent que les particules subissent un certain nombre de chocs séparés par des rebonds avant de se déposer une certaine distance du point d'arrêt de jet. Cette distance d'arrêt dépend fortement de la granulométrie des particules.

Le modèle présenté dans cet article repose sur une approche très rustique de représentation de l'écoulement gazeux basé sur un découpage en zones. Outre sa simplicité, il a pour avantage de permettre une résolution rapide du problème et de rendre compte de façon très satisfaisante des observations expérimentales.

D'autre part, une analyse théorique et des modèles mathématiques associées à la vitesse des particules abrasives dans les machines de sablage ont été présentés. vitesse des particules à la sortie de la buse a été modélisé en termes de longueur de la buse, le diamètre moyen des particules, la densité des particules, la densité de l'air et la vitesse d'écoulement de l'air. La vitesse du jet d'air est calculée en utilisant l'équation de Bernoulli pour les écoulements compressibles. Une approche numérique a été développé pour calculer la vitesse des particules en discrétisant la buse en petits segments le long de sa direction axiale.

Finalement, une simulation numérique de l'écoulement air/abrasif dans la buse de projection de la machine de sablage automatique, MEC PB212126 , a été faite sous Fluent comme application de l'étude théorique.

*Références bibliographiques*

- [1]. J.M. Fan, C.Y. Wang, J. Wang, “Modelling the erosion rate in micro abrasive air jet machining of glasses”, *Wear* 266, 968–974, 2009.
- [2]. Q.L. Li, J. Wang, C.Z. Huang, “Erosion mechanisms of monocrystalline silicon under a microparticle laden air jet”, *Journal of Applied Physics* 104, 034903, 2008.
- [3]. H.J. Ligthart, P.J. Slikkerveer, F.H. in’t Veld, P.H.W. Swinkels, M.H. Zonneveld, “Glass and glass machining in Zeus panels”, *Philips Journal of Research* 50 (3/4), 475–499, 1996.
- [4]. M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans, “Particle Image Velocimetry: A Practical Guide”, second ed, Springer, 2007.
- [5]. B. Karpuschewski, A.M. Hoogstrate, M. Achtsnick, “Simulation and improvement of the micro abrasive blasting process”, *CIRP Annals* 53 (1), 251–254, 2004.
- [6]. A. Ghobeity, M. Papini, J.K. Spelt, Computer simulation of particle interference in abrasive jet micromachining, *Wear* 263, 265–269, 2007.
- [7]. M. Achtsnick, P.F. Geelhoed, A.M. Hoogstrate, B. Karpuschewski, Modelling and evaluation of the micro abrasive blasting process, *Wear* 259, 84–94, 2005.
- [8]. M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans, Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, second ed, Springer, 2007.
- [9]. D. Kirk, Generation of air-blast shot velocity, *The Shot Peener* 21 (1), 26–30, 2007.
- [10]. S. Matsumoto et S. Saito, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 3 (1970) 83.
- [11]. B. Oesterle et A. Petitjean, *Int. J. Multiphase Flow*, 19 (1993) 199.
- [12]. F. Durst, D. Milojevic et B. Schonung, *Appl. Math. Modelling*, 8 (1984) 101.
- [13]. C.P. Chen et P.E. Wood, *AIChE J.*, 32 (1986) 163.
- [14]. S. Elghobashi, *Appl. Sci. Res.*, 48 (1991) 301.

- [15]. S.I. Rubinow et J.B. Keller, *Z Fluid Mechanics*, 11 (1961) 447.
- [16]. M. Laquerbe, *Thèse*, Université de Toulouse, France, 1970
- [17]. B.R. White et J.C. Schulz, *J. Fluid Mechanics*, 81 (1977) 497.
- [18]. N. Midoux, *Mécanique et Rhéologie de Fluides en Génie Chimique*, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 1985.
- [19]. H. Martin, dans J.P. Hartnett et T.F. Irvine (rédacteurs), *Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces, Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, Academic Press, New York, 1977.
- [20]. H. Liu, J. Wang, N. Kelson, R. Brown, A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation, *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (20 04) 488–493.
- [21]. N. Rajaratnam, *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976.
- [22]. E.J. Shaughnessy, Ira M. Katz, J.P. Schaffer, *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford University Press, 2005.
- [23]. P.J. Thomas, *Simulation of Industrial Processes for Control Engineers*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- [24]. S. Turenne, M. Fiset, Modeling of abrasive particle trajectories during erosion by a slurry jet, *Wear* 162–164 (1993) 679–687.
- [25]. A. Mombert, *Blast Cleaning Technology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [26]. A.P. Verma, G.K. Lal, A theoretical study of erosion phenomenon in abrasive jet machining, *Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering* 118 (1996) 564–570.
- [27]. S.S. Chiang, D.B. Marshall, A.G. Evans, The response of solids to elastic/plastic indentation. I. Stresses and residual stresses, *Journal of Applied physics* 53 (1982) 298–311.
- [28]. P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.C.M. de Hass, High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting, *Sensors and Actuators* 85 (2000) 296–303.