

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

Mohamed BOUDIAF

FACULTE DE GENIE MECANIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

ECOLE DOCTORALE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

OPTION : MACHINES THERMIQUES, APPLICATIONS ET RISQUES

ENVIRONNEMENTAUX

PRESENTE PAR

Mr : BENYETTOU Abderraouf

Analyse hydrodynamique de la dispersion du fluide sur une plaque

SOUTENU LE / / DEVANT LE JURY COMPOSE DE

Mr ABIDAT. M	Professeur USTO-MB	Président
Mr TEBBAL. M	Professeur USTO-MB	Rapporteur
Mr YOUCEFI. AEK	Professeur USTO-MB	Examineur
Mr NOURDINE. AEK	Maitre de conférences A USTO-MB	Examineur
Mr OUADHA. A	Maitre de conférences A USTO-MB	Examineur

Mémoire de MAGISTER

Analyse hydrodynamique de la dispersion du fluide sur une plaque

Par

BENYETTOU Abderraouf

**Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MB
Faculté de génie mécanique
Département de génie mécanique
Oran 2013**

Remerciements

Je remercie, en premier lieu, le dieu le tout puissant de m'avoir aidé à achever ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mon encadreur Pr. TEBBAL Mohammed, qui n'a rien épargné pour l'élaboration de ce mémoire, son encadrement était très enthousiaste pour moi.

Je remercie aussi mes parents qui m'ont aidé et encouragé durant la période de la réalisation de ce travail.

Tous mes sentiments de respect pour les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

J'adresse mes chaleureux remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Enfin, de chaleureuses pensées vont aux enseignants et à mes collègues de l'école doctorale Energétique et Environnement.

Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
g	La fonction de dispersion	$\text{mm}^3/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
d_0	Le diamètre de sortie de l'orifice	m
θ_0	L'angle initial de la pulvérisation noté	degré
d_g	le diamètre des gouttes	mm
U	La différence de vitesse ou vitesse relative	m/s
VMD ou D30	Le diamètre moyen en volume	mm
SMD ou D32	Le diamètre moyen de Sauter	mm
D20	Le diamètre moyen surfacique	mm
L1	La longueur de la surface intacte	mm
L2	La longueur du cœur liquide	mm
	L'angle du spray	dégré
We	Le nombre de Weber	
Re	Le Nombre de Reynolds	
d_h	Le diamètre hydraulique	m
ν_{gaz}	La viscosité cinématique du gaz	m^2/s
U_{gaz}	La vitesse du gaz	m/s
U_l	La vitesse de jet	m/s
ρ_l	La masse volumique du liquide	Kg/m^3
ρ_g	La masse volumique du gaz	Kg/m^3
σ_l	La force de tension superficielle.	N/m
μ_l	La viscosité dynamique du liquide	Pa.s
Oh	Le nombre d'Ohnesorge.	
P_{inj}	La pression d'injection.	Pascal
P_{atm}	La pression atmosphérique.	Pascal

Nomenclature

P_{sat}	La pression de saturation.	Pa
A_c	La section de contraction.	mm
C_c	Le coefficient de contraction.	
$A_{géo}$	La section géométrique.	mm
\dot{m}	Le débit massique.	Kg/s
V_c	La vitesse au point de contraction.	m/s
u_i	Composante de vitesse fluctuante suivant la direction i.	m/s
u_j	Composante de vitesse fluctuante suivant la direction j.	m/s
g	L'accélération de la pesanteur	m/s ²
∂	Opérateur de dérivée partielle	
$\frac{\partial}{\partial t}$	Opérateur de dérivée partielle par rapport au temps	
$\frac{\partial}{\partial x_i}$	Opérateur de dérivée partielle par rapport à l'espace	

Résumé

L'optimisation des systèmes de refroidissement utilisant la pulvérisation des jets liquides dans les procédés métallurgiques exige une bonne analyse hydrodynamique du mécanisme aboutissant à la dispersion du liquide sur la plaque. La réduction des dépenses d'énergie d'une part, et l'économie en eau (fluide refroidissant) d'autre part, restent le grand souci de toutes les études hydrodynamiques.

Notre travail a pour objectif d'étudier le comportement hydrodynamique de la dispersion de l'eau sur une plaque plane. La connaissance de la dispersion d'un fluide en fonction des paramètres hydrodynamiques et physiques (la hauteur, la pression d'alimentation, l'angle du jet, la viscosité, la vitesse de déplacement de la plaque...etc.) est d'une importance capitale.

Durant nos essais expérimentaux, nous avons fait varier la hauteur de la buse (distance entre la buse et la plaque), la pression d'alimentation et la vitesse de déplacement de la plaque.

La pulvérisation de l'eau est assurée par une buse dans laquelle nous avons intégré une tige de forme hélicoïdale à 4 rainures, cette technique a permis l'obtention d'un écoulement tridimensionnel tourbillonnaire à l'intérieur de la buse. Ce type d'écoulement interne facilite d'une manière très importante le mécanisme de la désintégration du jet à la sortie de la buse. Ce type de buse a été nommé « buse à tige hélicoïdale à 4 rainure **BUTH-4R** ».

A partir de l'analyse des différentes courbes montrant le champ de dispersion en fonction de la pression et la hauteur, le comportement Gaussien est bien remarqué.

Afin de mieux comprendre l'aspect hydrodynamique réel de l'écoulement tridimensionnel de l'eau à l'intérieur de la buse utilisée dans notre travail expérimental, une simulation numérique sur le code de calcul Fluent 6.3.26 est envisagé. Cette simulation a pour but l'explication et l'analyse du mécanisme aboutissant à la désintégration du jet à la sortie de la buse de pulvérisation.

L'écoulement à l'intérieur de la buse de la nature tourbillonnaire est commandé par la tige hélicoïdale intégrée.

Mots clés : analyse hydrodynamique, pulvérisation, désintégration des jets liquides, dispersion, écoulement tourbillonnaire, dispersion de Gauss, systèmes de refroidissement, simulation, Fluent.

Abstract

The optimization of the cooling systems using the liquid jets spraying in the metallurgical processes requires a good hydrodynamic analysis of the mechanism leading to the liquid dispersion on the plate. The reduction of the energy expenses on the one hand, and the water economy (cooling fluid) on the other hand, stay the great preoccupation to the all hydrodynamic studies.

The objective of our work is to study the hydrodynamic behavior of the water dispersion on a plane plate. The knowledge of the fluid dispersion according to the hydrodynamic and physical parameters (the height, the supply pressure, the angle of the jet, the viscosity, the displacement velocity of the plate... etc) is of a major importance.

During our experimental tests, we varied the height of the sprayer (distance between the sprayer and the plate), the supply pressure and the displacement velocity of the plate.

The water spraying is ensured by a sprayer in which we integrated a helicoid rod of 4 grooves, this technique allowed obtaining a swirling three-dimensional flow inside the sprayer. This type of internal flow facilitates the jet disintegration mechanism at the exit of the sprayer. This type of sprayer was named « sprayer with helicoid rod of 4 grooves ».

From the analysis of the various curves showing the field of dispersion according to the pressure and the height, the Gaussian behavior is remarked.

In order to better understand the real hydrodynamic aspect of the three-dimensional flow of water inside the sprayer used in our experimental work, a simulation on the code of calculate Fluent 6.3.26 is considered. The aim of this simulation is the explanation and analysis of the mechanism leading to the jet disintegration at the exit of the sprayer.

The swirling flow inside the sprayer is commanded by the integrated helicoid rod.

Key words: analysis hydrodynamic, pulverization, disintegration of the liquid jets, dispersion, swirling flow, dispersion of Gauss, cooling systems, simulation, Fluent.

Introduction générale 01

Chapitre 01

Analyse bibliographique de la désintégration des jets liquides

I.1. Les différents types des buses de pulvérisation 07

I.2. Caractéristiques générales des buses de pulvérisation 09

I.3. Mécanismes et étapes de fractionnement des jets et formation du spray 10

 I.3.1. La formation d'un spray 10

 a. Atomisation primaire 11

 ▪ Ecoulement à l'intérieur de la buse 11

 ▪ Déformation du système liquide 12

 ▪ Rupture et formation des gouttes 12

 b. Atomisation secondaire 13

I.4. Résultats concernant la variation de la vitesse et de la taille des gouttes 13

I.5. Phénoménologie des écoulements rotationnels 16

Chapitre II

Phénoménologie et mécanismes de la pulvérisation des jets liquides

II.1. Instabilité et pulvérisation d'un jet liquide 19

 II.1.1. Les longueurs caractéristiques 19

 II.1.2. Nombres adimensionnels caractéristiques 19

 ▪ Nombre de Weber 20

 ▪ Nombre de Reynolds 20

 ▪ Nombre d'Ohnesorge 21

II.2. Les régimes de fractionnement des jets 21

II.3. Régimes de fractionnement des gouttes 23

II.4. Phénoménologie physique de l'écoulement à l'intérieur des buses 25

II.4.1. La turbulence interne	25
II.4.2. La cavitation	26
II.4.2.1. Les différents types de la cavitation	28
II.4.2.2. Impact de la cavitation sur l'écoulement	29
a. Dissymétrie de l'écoulement	29
b. Limitation du débit dans l'orifice	29

Chapitre III

Description du banc d'essai

III.1. Contexte du travail expérimental	32
III.2. Déroulement des essais	33
III.3. Description du banc d'essai	33
• La buse de pulvérisation	33
• Système de collection et de mesure de la dispersion	34
• Système mécanique de déplacement	35
• Système de pompage	36

Chapitre IV

Simulation numérique de l'écoulement à l'intérieur du pulvérisateur

IV.1. Formulation mathématique	39
IV.1.1. Cas générale	39
IV.1.2. Ecoulement stationnaire et incompressible	40
IV.1.3. Ecoulement turbulent	40
IV.2. Procédure de résolution numérique	42
IV.2.1. Géométrie & Maillage	42
IV.2.1.1. Différents types de maillage	42
IV.2.1.2. Choix des types de frontières	45
IV.2.2. Procédure de résolution sur Fluent	47
IV.2.2.1. Modélisation	47

a. Solveur	47
b. Modèle de turbulence	47
IV.2.2.2. Teste d'indépendance du maillage	48

Chapitre V

Analyse et discussion des résultats

V.1. Résultats du travail expérimental	51
V.1.1. Remarques	57
V.1.2. Explication et analyse	57
V.1.2.1. Comment la tige hélicoïdale facilite la désintégration du jet ??	58
V.1.2.2. Le comportement Gaussien de la dispersion ?	59
V.1.2. Variation du volume collecté en fonction de la vitesse	60
V.2. Résultats de la simulation numérique	61
V.2.1. Description du comportement hydrodynamique de l'écoulement interne ...	62
V.2.1.1. Champs et profils de la pression statique	63
V.2.1.2. Champs et profils de la vitesse	63
V.2.1.3. Comparaison des trois profils de vitesse à la sortie	68

Conclusion et Perspectives

Conclusion	72
Perspectives	72

Introduction générale

En vue de l'accompagnement du progrès actuel, les industries métallurgiques doivent répondre aux demandes de plus en plus augmentées pour l'invention de nouveaux métaux satisfaisant les exigences spéciales, tant économiques que mécaniques. En prenons le cas de l'industrie spatiale, l'utilisation de métaux légers, fiables supportant les différentes formes d'usure thermiques et mécaniques est l'un des soucis majeur.

Pour répondre à ces exigences spéciales et avoir finalement les propriétés souhaitées, dans l'industrie métallurgique, les métaux chauffés à des températures supérieures à 1000°C sont passés par un processus de traitement thermique et mécanique dont la technique de refroidissement joue un rôle prépondérant. Citons comme exemple « le laminage des aciers », visé pour produire des tôles épaisses, légères ayant une grande fiabilité.

La pulvérisation des liquides utilisée dans les systèmes de refroidissement (spray cooling system) est une technique très efficace. Pour cela, une étude de l'effet des différents paramètres hydrodynamiques du système de pulvérisation tels que ; la pression, la hauteur du pulvérisateur par rapport à la plaque, l'angle du jet par rapport à l'orthogonale...etc. devient indispensable pour trouver la forme optimale.

Le liquide mis sous pression, en passant par un bec (pulvérisateur) de forme géométrique de construction spéciale, se pulvérise sur un champ de dispersion à quantifier en fonction des différents paramètres hydrodynamiques, ça nous permet de trouver l'arrangement favorable des pulvérisateurs.

Du fait de la pénurie mondiale des ressources en eau, et d'autre coté, une croissance massive de la demande de cette matière précieuse appelée « l'or bleu » dans le domaine sidérurgique, toutes les recherches menées ont un but essentiel consiste à réduire le gaspillage de l'eau dans les procédés de refroidissement.

Organisation du travail

Notre travail est composé de cinq chapitres :

- ❶ Le premier chapitre présente une analyse bibliographique de la pulvérisation des jets liquides, tout en présentant les différents types des pulvérisateurs et

leurs empreintes de jet, et même l'effet de chaque paramètre hydrodynamique. Les deux étapes de fractionnement primaire et secondaire seront envisagées.

- ② Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des phénomènes physiques qui ont lieu à l'intérieur du pulvérisateur, ces phénomènes comportant la cavitation et la turbulence ont un effet majeur sur le mécanisme de désintégration du jet et en suite sur le fractionnement des gouttes.
- ③ Le troisième chapitre concerne la description du banc d'essai, tout en présentant les différents composants. De plus, l'explication du principe de fonctionnement et le déroulement des essais seront envisagés. Pour assurer la pulvérisation de l'eau met sous pression, on a intégré à l'intérieur de la buse de pulvérisation une tige de forme hélicoïdale.
- ④ Dans le quatrième chapitre, on a mené une analyse hydrodynamique de l'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation via la simulation numérique sur le code de calcul Fluent, tout en présentant les champs de pression et de vitesse.
- ⑤ Le dernier chapitre est dédié à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux et numériques. L'effet de la pression et de la hauteur est bien remarqué.

Problématique, Avantages et Objectifs

Dans l'industrie sidérurgique, le traitement thermique des métaux consiste à les faire subir des transformations de structure suivant des stades de chauffage et de refroidissement très précis. Ces transformations permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, limite d'élasticité, ...etc.

Les qualités et les propriétés thermiques et mécaniques des tôles dépendent de certains paramètres liés principalement au procédé de refroidissement. Prenant le cas de la trempe, les résultats sont fortement conditionnés par la vitesse de refroidissement qui doit être supérieure à la vitesse critique. Une condition n'est pas toujours satisfaite en tous les points du volume traité, surtout pour les pièces épaisses imposant la variété de la vitesse de refroidissement entre le cœur et la périphérie, ce qui conduit à la formation de structures cristallines ayant des caractéristiques ne satisfont pas les besoins recherchés.

La méthode classique utilisée dans les procédés de refroidissement repose sur l'immersion des bandes d'acier dans un bain d'eau proche de la température de saturation (ébullition) pour accélérer l'extraction de la chaleur des plaques à haute température ($T = 900\text{C}^\circ$). Cette technique permet d'avoir une homogénéité de refroidissement excellente quelle que soit les conditions de travail, mais d'autre coté, l'efficacité de cette technique est limitée par le faible taux de refroidissement qui peut atteindre $50\text{ C}^\circ/\text{s}$.

Au voisinage de la surface chaude, l'eau s'évapore instantanément pour former un film de vapeur adjacent (Phénomène de caléfaction). Ce film de vapeur constitue un écran thermique devant l'extraction de la chaleur de la surface chaude, ce qui ralentit considérablement la vitesse de refroidissement.

En vue de remédier à ce problème d'un coté et de satisfaire la nécessité de concevoir de nouvelles nuances d'acier de haute qualité, nous sommes obligés de penser à d'autres procédés permettant de perfectionner de plus l'industrie métallurgique.

L'utilisation des jets pulvérisés sous forme de fines gouttelettes (spray) dans les procédés de refroidissement offre deux avantages :

- La finesse des gouttes facilite et accélère en même temps le mécanisme d'évaporation ;
- L'impact entre les gouttes à grande vitesse et la surface à refroidir contribue fortement au fractionnement de la continuité du film de vapeur et à la création d'une turbulence intense sur la surface chaude.

Ces deux avantages accroître sensiblement le taux d'extraction de la chaleur des surfaces chaudes.

De cet effet, les lignes de production et de traitement thermique des aciers utilisant le procédé de refroidissement par jet liquide devient plus rapides, plus optimisées et moins volumineuse en raison de son faible cout et sa grande capacité d'extraction de chaleur.

A partir de l'analyse hydrodynamique parfaite du champ de dispersion de l'eau sur les bandes d'acier, on souhaite acquérir des connaissances dans ce domaine afin de mieux contrôler localement le refroidissement des plaques d'acier pour obtenir un équilibre rapide entre les différentes parties et éviter l'apparition des déformations plastiques et des fissures (tapures) à cause des contraintes thermiques très élevées liées étroitement à une maîtrise insuffisante des opérations de refroidissement.

Chapitre I :

Analyse bibliographique de la désintégration des jets liquides

L'étude des jets liquides et les phénomènes qui l'accompagnent prennent une place très importante dans la recherche menée dans les dernières décennies.

Dans ce qui suit nous verrons les différentes formes géométriques des buses de pulvérisation utilisées dans le domaine métallurgique, dont dépendent plusieurs phénomènes aboutissant à la désintégration.

La compréhension de l'effet des différents paramètres hydrodynamiques ; tels que la pression, la hauteur, les propriétés du liquide...etc. est envisagée, en plus de la taille des gouttes produites pour chaque type de pulvérisation.

I.1. Les différents types des buses de pulvérisation

Les buses de pulvérisation des jets liquides sont très utilisées dans plusieurs applications industrielles tels que ; les procédés de refroidissement des plaques d'aciers, l'injection dans les moteurs à combustion interne...etc. Pour mieux adapter le type du pulvérisateur aux besoins cherchés, nous sommes toujours obligés d'inventer de nouvelles technologies de construction.

Les différents types de pulvérisateur actuellement utilisés sont :

- Les atomiseurs pneumatiques : cette technique repose sur le mixage de l'air comprimé et un débit de liquide pour aboutir à la production d'un nuage de fines gouttelettes avoisinant les 50 μm . ces dernières possèdent une importante vitesse relative (fig. I.1).

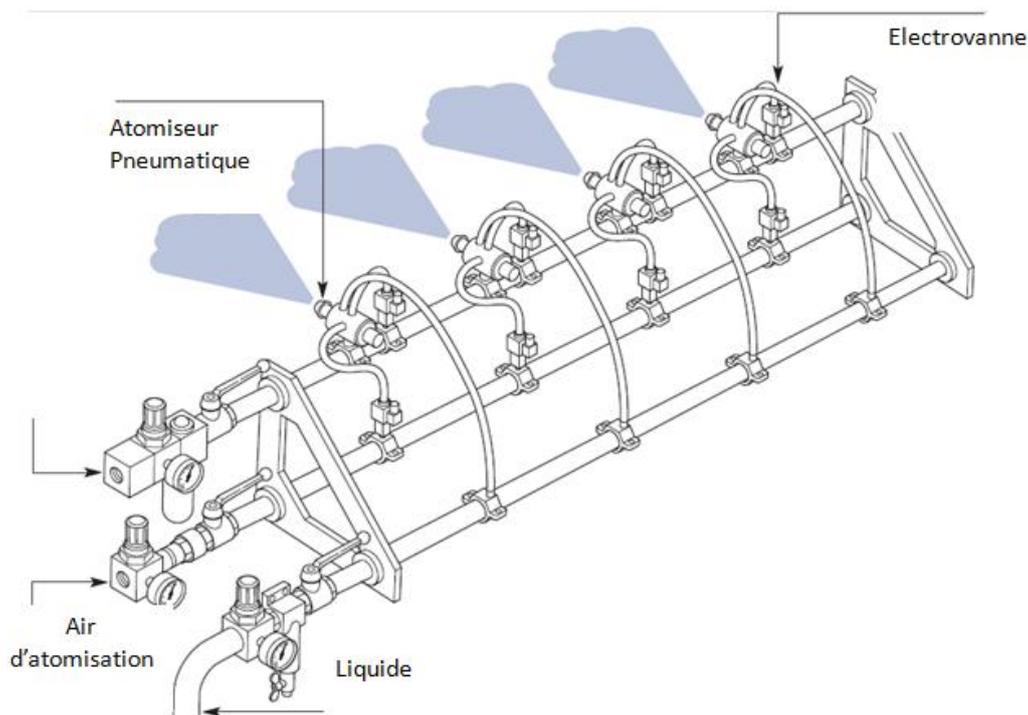


Figure I.1 : Schéma descriptif de l'atomisation pneumatique [14].

- Les pulvérisations : consiste à mettre sous pression le débit du liquide à pulvériser. pour cela le rétrécissement de section à la sortie de la buse crée une différence de pression, qui résulte l'augmentation de la vitesse d'injection. La taille des gouttes produites est entre 300 et 400 μm [12].
- Jet de liquide sous pression impactant une plaque. Les gouttes obtenues ont un diamètre qui varie entre 300 et 400 μm .



Figure I.2 : Buse de pulvérisation par impact [15].

- Vibration piézo-électrique. La formation des gouttes est due à la vibration d'une membrane. Le mode d'excitation de cette membrane détermine le diamètre des gouttelettes [13].

Selon l'empreinte, il existe trois types de jet :

- Jet à cône plein : la répartition des gouttelettes est uniforme sur une surface d'impact circulaire. Deux procédés permettant d'avoir la pulvérisation ; soit par l'intégration d'une hélice à l'entrée de la buse, soit par une déviation de l'écoulement à l'entrée.



Figure I.3 : Buse à cône plein [15].

- Jet à cône creux : la distribution des gouttes est située sur le pourtour. Le mouvement de rotation est assuré par de rainures hélicoïdales ou d'hélice fixe. Les gouttelettes produites sont très fines que pour le cas d'un cône plein.

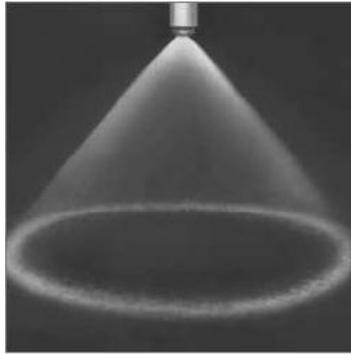


Figure I.4 : Buse à cône creux.

- jet plat : la section du jet est elliptique.

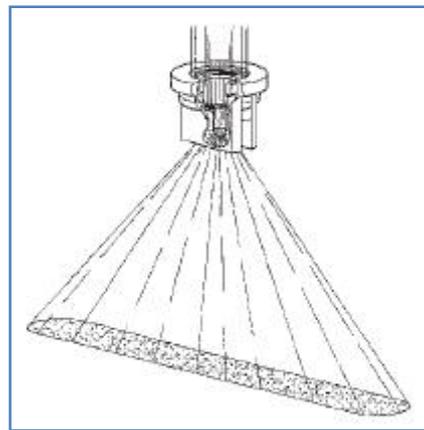


Figure I.5 : Buse à jet plat

I.2. Caractéristiques générales des buses de pulvérisation

En plus de la variété des empreintes du jet, chaque buse de pulvérisation a ses propres caractéristiques de fonctionnement suivant la technique de fabrication.

Les buses de pulvérisation sont caractérisées par :

- la force d'impact ;
- l'angle du jet en fonction de la pression ;
- la taille des gouttelettes produites ;
- la résistance à l'usure ;
- le diamètre de son orifice de sortie noté d_0 ,
- l'angle initial de la pulvérisation noté θ_0 ,

A l'aide d'instruments de mesure très sensibles, l'évaluation de la force d'impact des différentes buses est devenue possible.



Figure I.6 : Instrument de mesure de la force d'impact [19].

I.3. Mécanismes et étapes de fractionnement des jets et formation du spray

I.3.1. La formation d'un spray

La pulvérisation des jets liquides suit, en partant de la buse jusqu'à la rupture finale, les mêmes étapes de désintégration, quelque soit la buse utilisée ou les paramètres hydrodynamiques de fonctionnement [17]. L'analyse de ces étapes conduit à la bonne compréhension de la complexité de ce phénomène, et même à distinguer les différents mécanismes aboutissant à la formation du spray.

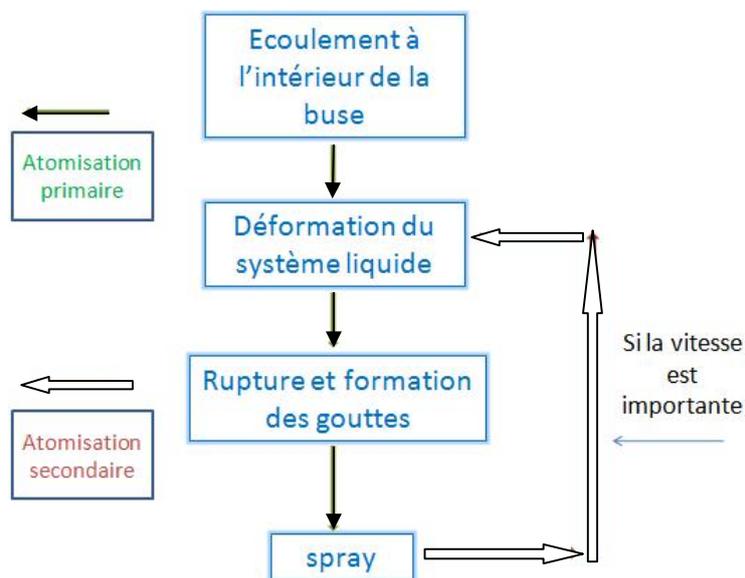


Figure I.7 : Processus d'atomisation primaire et secondaire.

Pour les différentes applications industrielles, la formation du spray se fait suivant deux processus : « *Atomisation Primaire et Secondaire* » (fig. I.7).

a. Atomisation primaire

Le passage à travers une buse de pulvérisation et l'injection dans un milieu au repos permet la création d'un système liquide composé d'une phase liquide « *dispersée* » et une phase gazeuse « *porteuse* ».

Les étapes aboutissant à l'atomisation primaire sont :

- **Écoulement à l'intérieur de la buse :**

La buse de pulvérisation joue un rôle très important pour la formation d'un système liquide, suivant sa forme géométrique qui détermine le champ de vitesse et le type de jet à la sortie pour des paramètres de fonctionnement (pression, viscosité) donnés [17].

La viscosité aussi influence fortement sur l'aspect réel du jet que la pression. L'utilisation d'un liquide plus visqueux diminue la turbulence de l'écoulement et en même temps rend la désintégration difficile à réaliser (fig. I.8), ce qui traduit par la croissance des dépenses d'énergie (augmentation de la pression d'injection est nécessaire) (fig. I.9). Pour remédier à ce problème l'adaptation d'un préchauffage est envisagée [4].

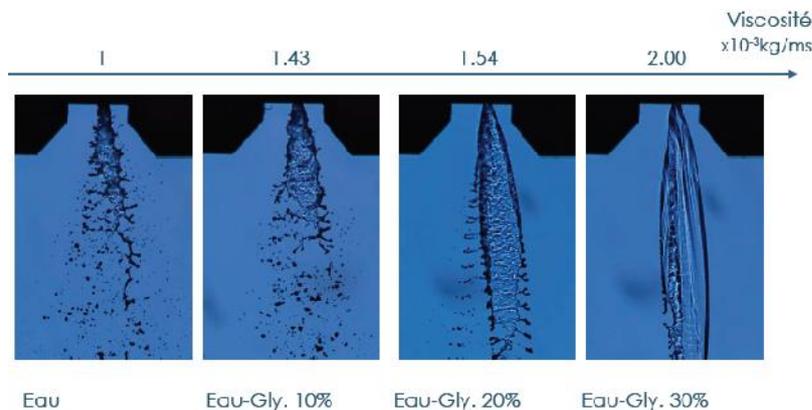


Figure I.8 : Influence de la viscosité sur la désintégration du jet [18].

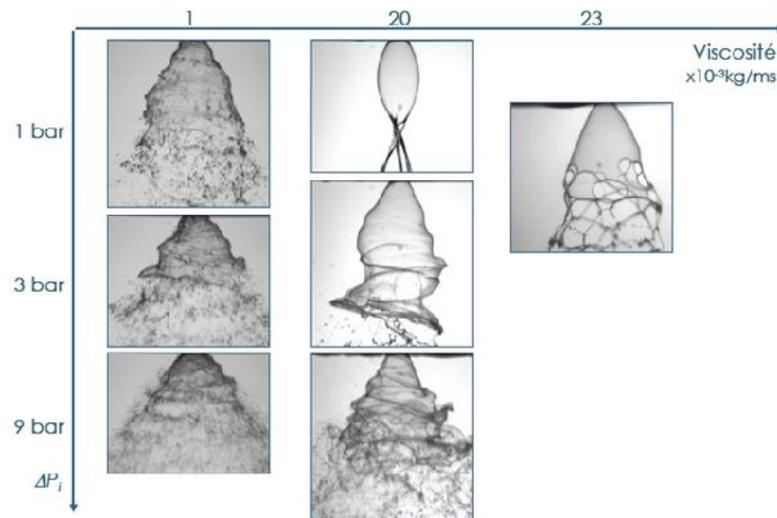


Figure I.9 : Croissance des dépenses d'énergie (la pression) en fonction de la viscosité [18].

▪ **Déformation du système liquide :**

Après la détente et la formation du système liquide, le jet s'accélère en heurtant le milieu gazeux, ce qui est traduit par l'apparition de perturbations sur l'interface liquide/gaz aboutissant à la rupture et la formation de gouttes. Deux mécanismes entrent en jeu : interne (propre au liquide) exprimé par la tension superficielle opposée à la désintégration, et aérodynamique exprimé par la vitesse relative entre le liquide et le gaz environnant [2,11].

▪ **Rupture et formation des gouttes :**

En s'éloignant de la buse, la vitesse des gouttes (vitesse relative) produites antérieurement atteint des valeurs très importantes en amplifiant les ondes de perturbation [17]. La croissance de la vitesse multiple les forces aérodynamiques aboutissant à la formation des ligaments puis des gouttelettes (fig. I.11).



Figure I.10 : Influence de la croissance de la vitesse de jet [18].

b. Atomisation secondaire

Si la vitesse relative des gouttes produites par l'atomisation primaire est assez importante, il apparaît un nouveau mécanisme de fractionnement qu'on appelle « l'atomisation secondaire » ou désintégration des gouttes (fig. I.12). Le processus et les régimes classés par les différents auteurs [2, 8, 11] seront envisagés ultérieurement.

L'atomisation produisant de fines gouttelettes n'est pas applicable dans toutes les applications industrielles, on la trouve surtout dans les moteurs à combustion interne, exigées pour avoir un mélange homogène.

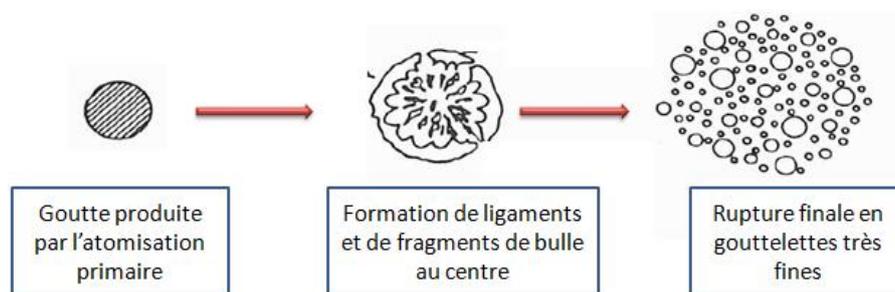


Figure I.11 : Mécanisme de l'atomisation secondaire.

Croissance de la vitesse relative traduit par la croissance de la différence de pression

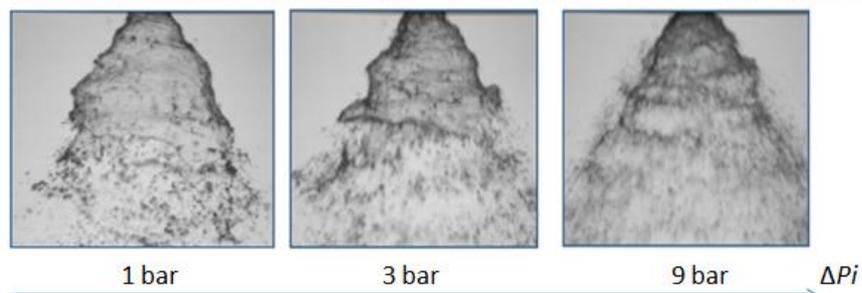


Figure I.12 : Apparition de l'atomisation secondaire [18].

I.4. Résultats concernant la variation de la vitesse et de la taille des gouttes

En plus des caractéristiques vus précédemment, la connaissance de la distribution granulométrique (distribution des tailles des gouttes) que peut produire une buse de pulvérisation, permet l'optimisation du choix de la buse qui garantit une bonne efficacité de fonctionnement.

Plusieurs définitions des diamètres moyens ont été proposées pour caractériser le spray [16, 17,13]:

- **Diamètre moyen en volume (VMD ou D30)** : Permet d'exprimer la taille des gouttes en fonction du volume de liquide pulvérisé.

$$D_{30} = \left(\frac{\sum_i n_i \cdot d_i^3}{\sum_i n_i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (eq: I.01)$$

- **Diamètre moyen en surface (D20) :** Permet d'exprimer la valeur moyenne du diamètre pour une section du jet.

$$D_{20} = \sqrt{\frac{\sum_i n_i \cdot d_i^2}{\sum_i n_i}} \quad (eq: I.02)$$

- **Diamètre moyen de Sauter (SMD ou D32) :** est un diamètre basé sur le rapport entre le volume total occupé par les gouttes et la surface totale des gouttes dans le spray. Ce diamètre est notamment utilisé pour exprimer la finesse de la pulvérisation.

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i \cdot d_i^3}{\sum_i n_i \cdot d_i^2} = \frac{D_{30}^3}{D_{20}^2} \quad (eq: I.03)$$

Les recherches menées sur la structure du jet ont prouvé un non uniformité dans la distribution radiale des gouttes produites lors de la désintégration du jet, cette distribution est formée d'une diminution du diamètre des gouttes radialement du centre vers le périphérique [21].

Ce phénomène ou bien ce résultat peut être expliqué aussi par un non uniformité dans le champ de vitesse des gouttes durant la désintégration (fig. I.13).

Ces constats traduisent une croissance radiale des forces responsables à la désintégration du jet et ensuite à la désintégration des grosses gouttes.

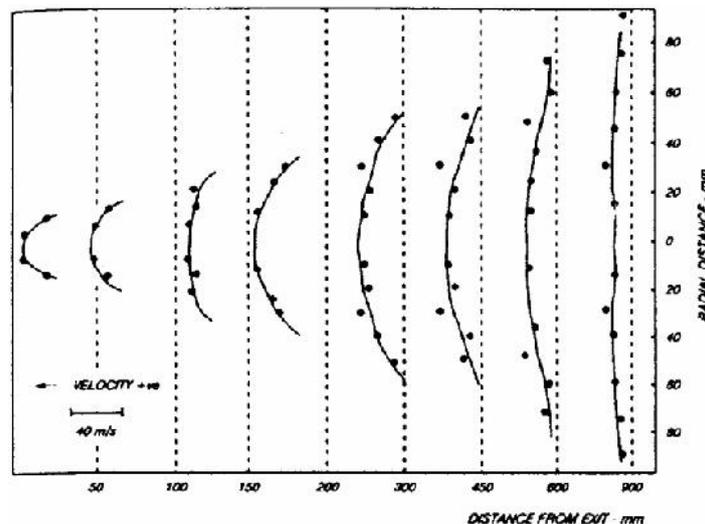


Figure I.13 : Profil de vitesse des gouttes à différentes hauteurs [21].

La figure I.13 présentant la variation du profil de la vitesse des gouttes à différentes hauteurs, montre un comportement gaussien. Par définition, ce comportement du jet

est traduit par une tendance de la courbe de dispersion à l'aplatissement en s'éloignant de la buse pour avoir enfin une pulvérisation uniforme.

L'étude des jets par la simulation numérique [21] a permis de présenter la variation de la vitesse axiale le long de l'axe du jet (fig. I.14).

En utilisant la sonde optique KADEM Naima [11], a pu montrer la structure du jet par la présentation des résultats concernant le taux de vide à différentes hauteurs (fig. I.15).

Le taux de vide présente la fraction surfacique liquide, il présente le rapport entre la surface occupée par les gouttes sur la surface occupée par l'air ou vide des gouttes.

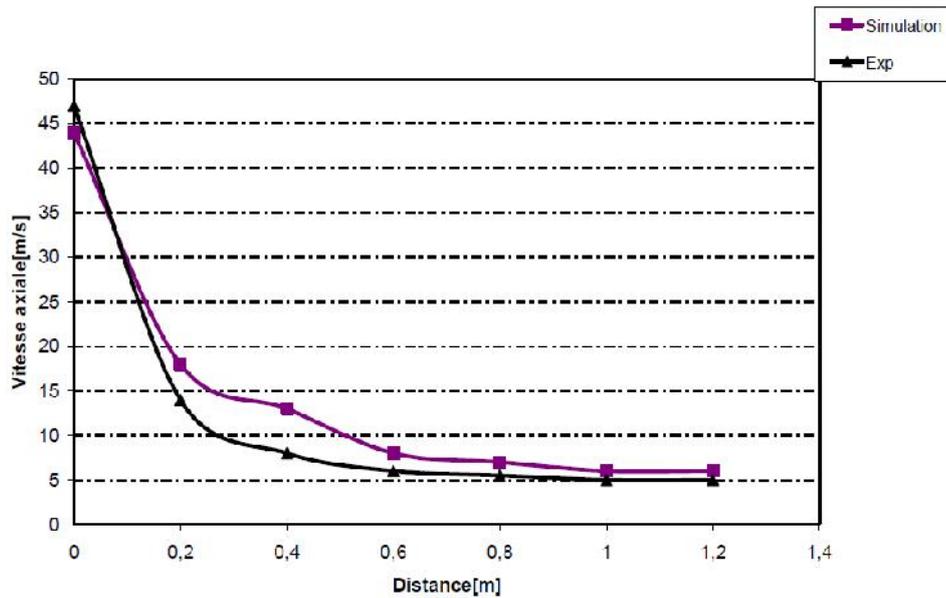


Figure I.14 : Variation de la vitesse axiale le long de l'axe de jet. [21]

Ces résultats qui, nous donnent une information très importante du comportement hydrodynamique de la dispersion lors de la désintégration du jet, confirme bien la dispersion gaussien ; en s'éloignant de la buse on tire les remarques suivantes :

- Une augmentation de la surface couverte par le jet (fig. I.15);
- Diminution de la dispersion au niveau du centre traduite par l'augmentation du taux de vide (fig. I.15);

Ces deux résultats confirment l'aplatissement de la courbe de la dispersion avec l'augmentation de la hauteur de jet.

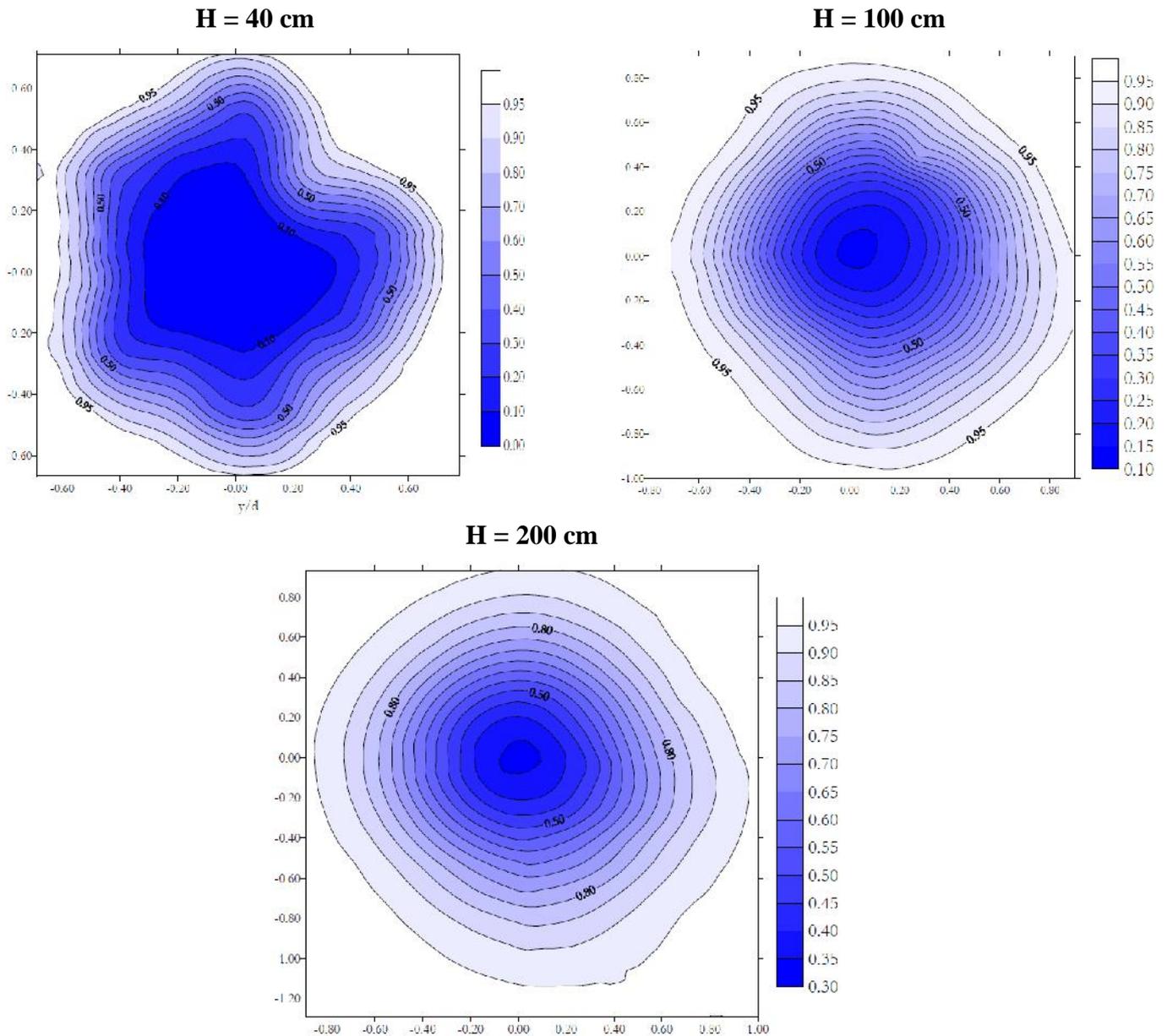


Figure I.15 : Variation du taux de vide en fonction de la hauteur du jet (H) [11].

I.5. Phénoménologie des écoulements rotationnels

D'autre part, l'utilisation des buses à turbulence basant sur le principe d'adopter un écoulement rotationnel interne est devenue une solution pour plusieurs applications industrielles.

L'analyse des résultats présentés par Magali. D [06] sur les champs de vitesse axiale, radiale et tangentielle à l'intérieur comme à l'extérieur de la buse sert bien à expliquer et à comprendre les phénomènes accompagnant l'écoulement (fig. I.16):

- La composante axiale de la vitesse possède une valeur très faible dans la partie supérieure de la buse, elle présente en revanche un maximum de 21 m/s au niveau du col.

- La vitesse est essentiellement tangentielle dans la chambre de turbulence du fait de la formation d'un écoulement tourbillonnaire rotationnel, et radiale à la sortie de la buse.

Le point clé de la formation d'un champ de dispersion très important est le changement brusque de la composante tangentielle de l'écoulement en une composante radiale très importante à la sortie de la buse.

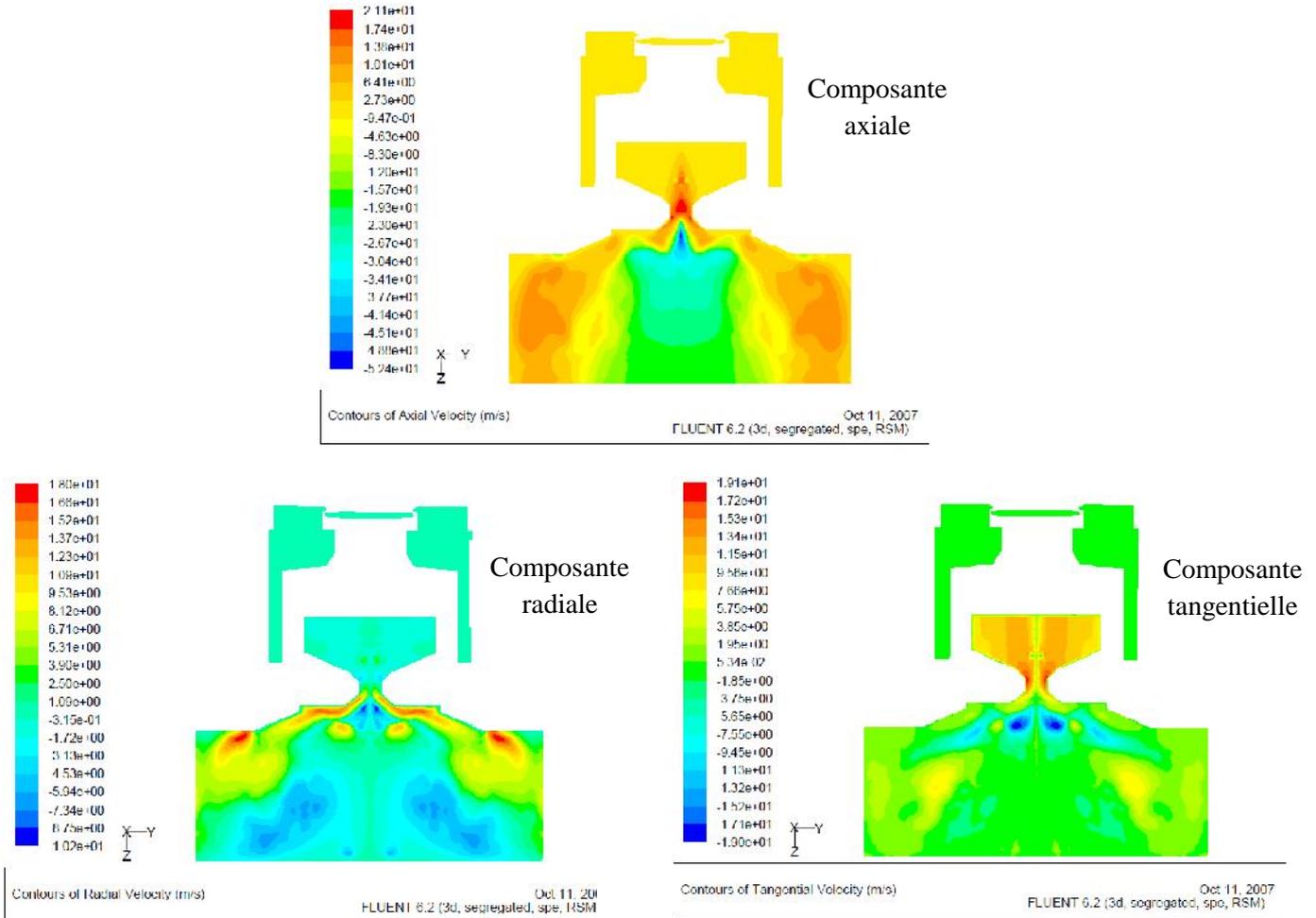


Figure I.16 : Champs de vitesse [06].

Chapitre II :

Phénoménologie et mécanismes de la pulvérisation des jets liquides

Les jets utilisés dans la métallurgie sont généralement conique creux, conique plein ou de forme spéciale. Les étapes qui commande leur pulvérisation et désintégration dans un milieu au repos sont les mêmes. Ce jet va d'abord subir un fractionnement primaire, qui correspond à la formation de fragments liquides, puis un fractionnement secondaire, qui se traduit par une désintégration ultérieure de ces éléments liquides déjà détachés du jet.

L'efficacité de la pulvérisation des jets liquides dépend de plusieurs paramètres, tels que la cavitation, la turbulence, le profil de la vitesse à l'intérieur de la buse...etc.

Le fractionnement des jets liquides se divise en fonction de la vitesse du jet en plusieurs régimes de fractionnement, d'où la compréhension du mécanisme exige la bonne identification des forces agissantes.

II.1. Instabilité et pulvérisation d'un jet liquide

II.1.1. Les longueurs caractéristiques

Ces grandeurs nous permettent de connaître l'allure réelle de la pulvérisation.

Lorsque la vitesse est basse juste au voisinage de la buse de pulvérisation la colonne d'injection reste intacte en surface sur une distance appelée «longueur de surface intacte ».cette longueur n'est pas vu lorsque la vitesse atteint des valeurs très élevés, le cas pour les moteur à injection ou le carburant entre dans la chambre de combustion totalement sous forme de gouttelettes pour faciliter le mélange.

A partir d'une distance, la colonne liquide disparaître à cause de l'effet de l'arrachement de fragments liquides de sa surface (fig. II.1). Cette distance est appelée «longueur de cœur liquide» traduit la distance nécessaire pour la disparition de colonne liquide.

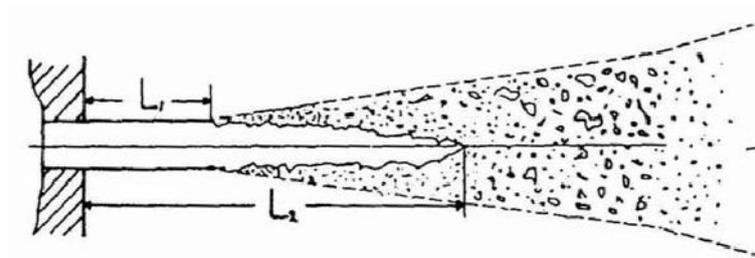


Figure II.1 : Longueurs caractéristiques du jet : L1 est appelée longueur de surface intacte et L2 longueur de cœur liquide [1].

Autre caractéristique, l'angle du spray , qui est défini come l'angle du plus petit cône contenant tous les fragments représentatifs du spray [1]. Une grandeur qui a beaucoup d'importance dans le domaine de la métallurgie et surtout le traitement thermique, parce que sa connaissance permet l'optimisation de l'emplacement et la disposition des pulvérisateurs.

Citons aussi le diamètre des gouttes, un facteur très important à connaître dans les procédés utilisant la pulvérisation des liquides. Beaucoup de travaux expérimentaux ont été faits pour mesurer la taille réelle des gouttes.

II.1.2. Nombres adimensionnels caractéristiques

Il est très important de définir les différents nombres adimensionnels entrant dans l'explication de certains phénomènes physiques de la pulvérisation des liquides.

Parmi ces nombres on trouve :

- **Nombre de Weber**

$$We = \frac{\rho U^2 d}{\sigma} \quad (eq: II. 01)$$

$$We = \frac{\text{forces aérodynamiques}}{\text{forces de tension superficielle}} \quad (eq: II. 02)$$

Il représente le rapport entre les forces d'inertie (force aérodynamique) et les forces de tension superficielle. Il exprime la capacité de résistance des gouttes et des ligaments devant les forces aérodynamiques d'arrachement, cette capacité est fonction de la tension superficielle [3].

On peut trouver le nombre de weber gazeux :

$$We_g = \frac{\rho_{gaz}(U_l - U_{gaz})^2 d}{\sigma_l} \quad (eq: II. 03)$$

Qui exprime la résistance de la goutte aux forces aérodynamiques créés par le gaz sur l'interface liquide/gaz.

D'autre coté le nombre de Weber liquide [3]. En caractérisant le phénomène de collision de deux gouttes après un fractionnement antérieur, il nous donne une quantification des forces aérodynamiques mises en jeu par rapport aux forces de tension superficiel équivalentes.

$$We_l = \frac{\rho_l(U_{l,1} - U_{l,2})^2 d}{\sigma_l} \quad (eq: II. 04)$$

- **Nombre de Reynolds Re**

Le nombre de Reynolds est défini de la façon suivante.

$$Re = \frac{U d_h}{\nu} \quad (eq: II. 05)$$

$$Re = \frac{\text{forces aérodynamique}}{\text{forces de viscosité}} \quad (eq: II. 06)$$

Exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité

$$Re_g = \frac{|U_l - U_{gaz}| d_g}{\nu_{gaz}} \quad (eq: II. 07)$$

En caractérisant l'écoulement gazeux autour d'une goutte de diamètre d_g , le nombre de Reynolds gazeux correspond au rapport des forces aérodynamiques sur les forces de viscosité du gaz.

$$Re_l = \frac{\rho_l |U_l - U_{gaz}| d_g}{\mu_l} \quad (eq: II. 08)$$

Ce nombre de Reynolds caractérise le rapport des forces aérodynamiques mises en jeu sur les forces de viscosité du liquide.

- **Nombre d'Ohnesorge Oh**

Le nombre d'Ohnesorge est défini de la façon suivante.

$$Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l} \quad (eq: II. 09)$$

$$Oh = \frac{\text{force de viscosité liquide}}{\text{force aérodynamique liquide}^{1/2} * \text{force de tension superficielle}^{1/2}} \quad q: II. 1eq: II. 10)$$

Il représente le rapport de la force de viscosité interne de la goutte sur les forces de tension superficielle et aérodynamique [3].

II.2. Les régimes de fractionnement des jets

La première remarque qu'a fait Reitz pour les régimes de fractionnement d'un jet liquide est que pour des faibles vitesses, les gouttes se forment immédiatement à la sortie de la buse, puis en fonction de l'augmentation de la vitesse, il présente quatre régime :

- Régime de Rayleigh : pour de faibles vitesses d'injection, le fractionnement a lieu à une très grande distance du nez de l'injecteur et des gouttes de diamètre supérieur à celui de la buse apparaissent [1], le fractionnement se produit en raison de la croissance des oscillations axisymétriques du volume complet du jet, initiées par l'inertie du liquide et les forces de tension superficielle [2].
- Premier régime induit par l'aérodynamique : Le fractionnement se fait à une distance assez grande que le diamètre d'injection du fait de la faible augmentation de la vitesse, conduisant à la formation de gouttelettes dont le diamètre est voisin de celui de la buse [1].

- Second régime induit par l'aérodynamique : la distance du fractionnement devient plus faible de l'ordre de quelques diamètres d'injection, et les gouttelettes sont plus petites que l'orifice de l'injecteur [1]. Dans ce stade, l'écoulement à l'intérieur de la buse devient turbulent. Le fractionnement du jet se produit maintenant en raison de la croissance instable des courtes longueurs d'onde qui sont initiées par la turbulence du jet et amplifiées par les forces aérodynamiques dues à la vitesse relative entre le jet et le gaz environnant [2].
- Régime d'atomisation : à cause de la forte vitesse d'injection (nombre de Reynolds supérieur à 3000) les gouttelettes produites sont très fines, et même le fractionnement du jet a lieu très près de la sortie de la buse de pulvérisation [1].

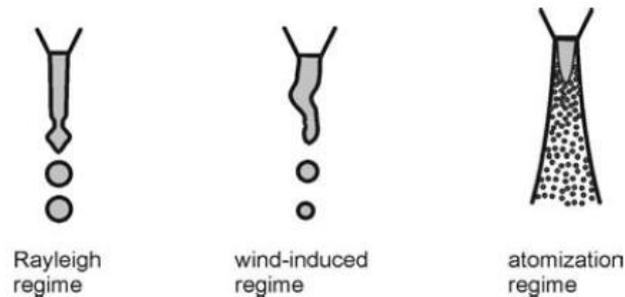


Figure II.2 : Régimes caractéristiques de fractionnement du jet en fonction de la vitesse d'injection [2].

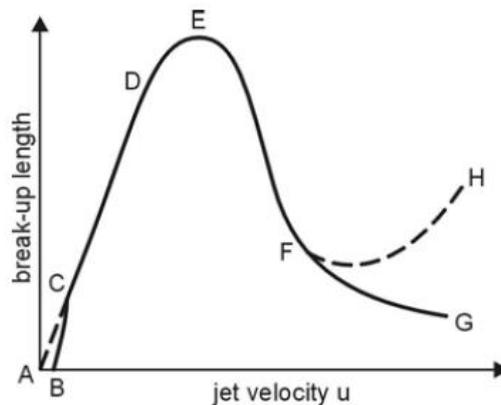


Figure II.3 : Classification des régimes de fractionnement d'un jet liquide en fonction de la vitesse d'injection [1].

D'après les travaux de Reitz, la longueur de la surface intacte et la longueur du cœur liquide sont coïncides dans les deux premiers régimes.

En plus de l'effet de la vitesse dans le fractionnement des jets liquides, d'autres paramètres tels que la viscosité μ_l , la tension superficielle du liquide σ , la viscosité du

gaz μ_g , la masse volumique du liquide et du gaz jouent un rôle très important dans le processus général de la pulvérisation des liquides.

Durant ses travaux, Ohnesorge en mesurant la longueur intacte du jet a prouvé que le processus de la désintégration peut être décrit par le nombre de Weber liquide et le nombre de Reynolds.

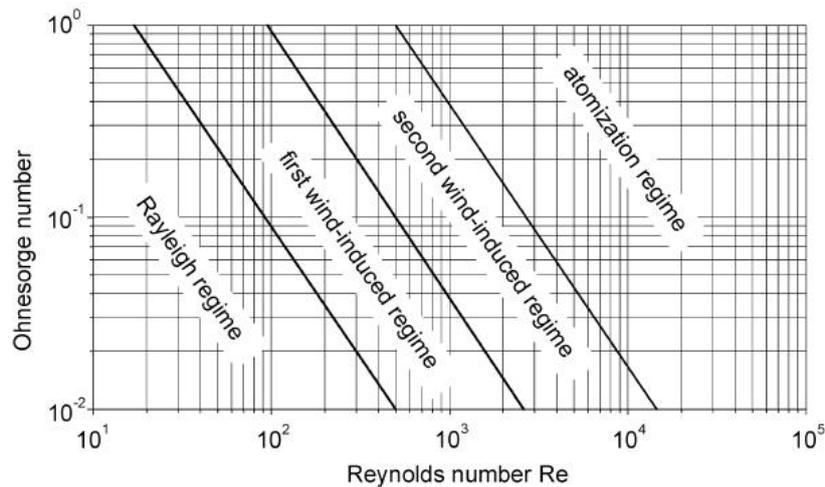


Figure II.4 : Diagramme d'Ohnesorge « régimes de fractionnement » [2].

Le diagramme d'Ohnesorge permet l'introduction de toutes les propriétés du liquide, tels que la tension superficielle à l'interface liquide-gaz, la masse volumique du liquide, la viscosité dynamique du liquide et aussi le diamètre caractéristique des gouttelettes (fig. II.4). Cependant, l'introduction seulement des propriétés de la phase liquide dans la description des régimes n'est pas suffisante, parce que la désintégration peut être accélérée en augmentant la masse volumique du gaz environnant.

Pour cela, Reitz a suggéré d'inclure le rapport des masses volumiques gaz/liquide dans le diagramme bidimensionnel d'Ohnesorge, pour le transformer en diagramme tridimensionnel (fig. II.5).

II.3. Régimes de fractionnement des gouttes

Le mécanisme de fractionnement des gouttes dépend des forces aérodynamiques induites par la vitesse relative sur l'interface air/liquide

Les forces aérodynamiques ont comme conséquence une croissance instable des vagues sur l'interface gaz/liquide ou sur la gouttelette entière lui-même. Cela abouti finalement à la désintégration et à la formation de gouttelettes plus petites. Ces gouttelettes sont encore sujettes à un autre fractionnement aérodynamique ultérieur.

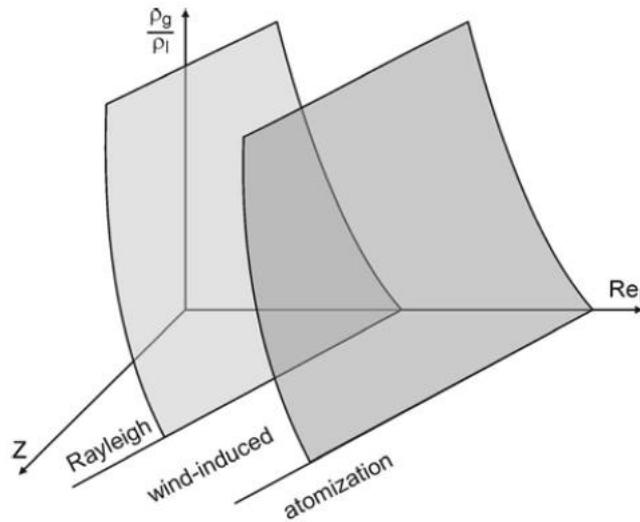


Figure II.5 : Schéma du diagramme incluant l'effet de la masse volumique du milieu gazeux dans le fractionnement des jets [2].

Les forces de tension superficielle qui, cherchent à maintenir la gouttelette sphérique en atténuant la force aérodynamique de déformation, dépend de la surface de la goutte: plus la gouttelette est petite, plus la force de tension superficielle est grande et plus la vitesse relative critique pour la désintégrer est grande.

Plusieurs théories ont été présentées pour classer les différents modes de fractionnement des gouttes en gouttelettes plus fines en fonction du nombre de Weber, de Reynolds et d'Ohnesorge. A partir des travaux expérimentaux, Borisov et all ont présenté trois modes de fractionnement selon le nombre de weber [11].

- « Fractionnement en sac » : Dans ce mode les gouttes s'aplatissent avant d'être étirées en son centre pour former un « sac », ce sac se fragmente en ligaments puis en fines gouttelettes (fig. II.6).



Figure II.6 : Fractionnement en sac [11].

- « Fractionnement en ligaments » : l'absence du sac est vue, et les gouttes sont directement cassées en plusieurs ligaments puis en fines gouttelettes (fig. II.7).



Figure II.7 : Fractionnement en ligaments [11].

- « Fractionnement catastrophique » : à cause des fortes forces aérodynamiques résultant dans de courtes longueurs d'ondes sur l'interface liquide/gaz, les gouttes sont suffisamment déstabilisantes pour être fractionnées en fines gouttelettes [2], (fig. II.8).

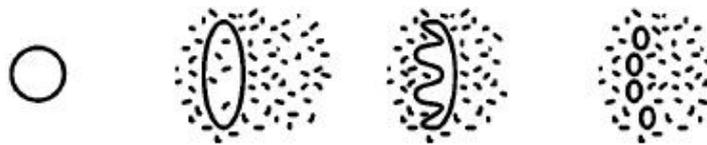


Figure II.8 : Fractionnement catastrophique [11].

II.4. Phénoménologie physique de l'écoulement à l'intérieur des buses

Le processus de la pulvérisation des jets liquides est très complexe, fortement influencé par les phénomènes qui régissent l'aspect réel de l'écoulement à l'intérieur des buses.

La turbulence et la cavitation sont deux facteurs très importants, dont la croissance de l'intensité accélère la désintégration du liquide et la formation du spray.

II.4.1. La turbulence interne

La pulvérisation des liquides dépend fortement de l'intensité de la turbulence de l'écoulement à l'intérieur de la buse. L'intensité de turbulence varie d'une buse à autre selon la forme géométrique interne [3].

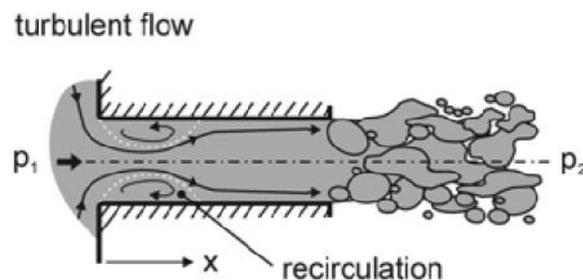


Figure II.9 : Phénomène de turbulence dans les buses [2].

L'influence de la turbulence est visible sur :

- L'angle du jet (fig. II.10).
- La taille des gouttes : l'augmentation de l'intensité de la turbulence à l'intérieur des buses conduit à la production de gouttelettes de taille plus petite, à cause de la croissance des interactions aérodynamiques sur l'interface liquide/gaz à la sortie de la buse.

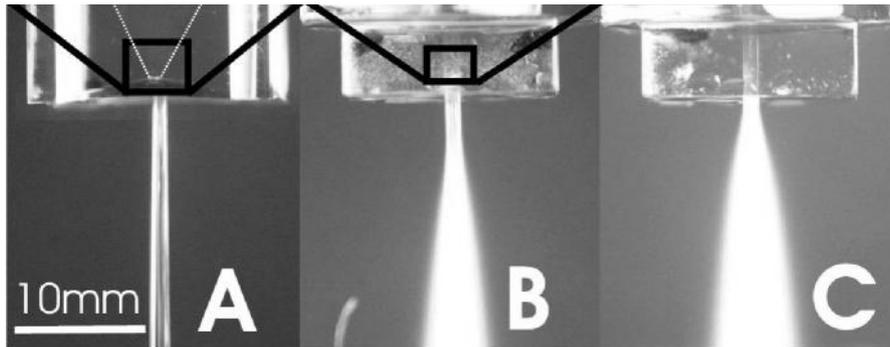


Figure II.10 : Sprays obtenus pour le même injecteur et des nombres de Reynolds différents [3].

II.4.2. La cavitation

A cause de l'effet majeur de la cavitation sur le mécanisme de la pulvérisation des liquides, la compréhension de ce phénomène physique devient inéluctable pour prévoir les circonstances de fonctionnement surtout dans le domaine de l'injection des carburants.

Durant l'écoulement du liquide à l'intérieur des buses de pulvérisation, au niveau de certains points, la chute de pression en-deçà de la pression de vapeur saturante du liquide cause la rupture du milieu continu du liquide [9]. Cela se traduit par la formation de bulles de vapeur de poches ou de film de vapeur.

A partir du diagramme de phase d'un corps pur (fig. II.11), le changement de phase d'un état liquide à un état vapeur, se fait : soit on élève la température à pression constante par un apport de chaleur extérieure (ébullition), soit on abaisse la pression à température constante jusqu'à atteindre la courbe de saturation (cavitation).

Le degré de gravité de la cavitation consiste dans la production d'important volume de vapeur à partir d'un faible volume liquide, ce changement de phase se fait totalement adiabatique et ne nécessite pas un apport extérieur de chaleur.

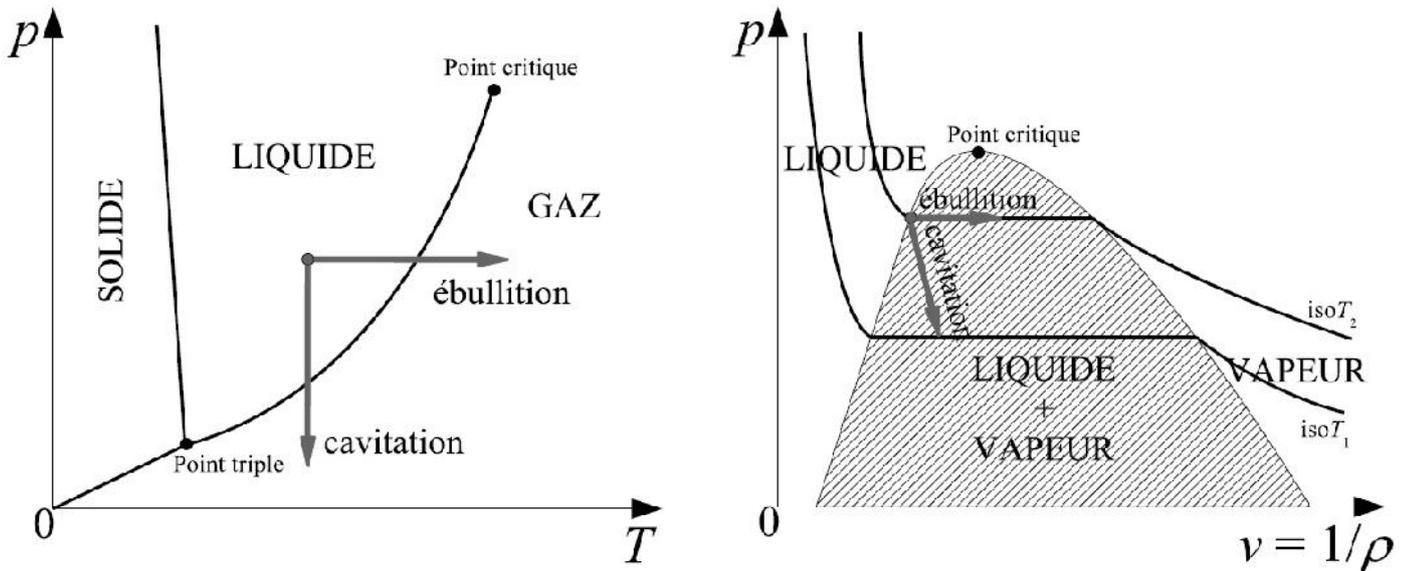


Figure II.11 : Modes de vaporisation d'un liquide, v étant le volume spécifique [1].

Le genre de la cavitation le plus rencontré dans le domaine industriel métallurgique est la cavitation par bulles, étudié par Rayleigh [1] en basant sur les points suivantes :

- que l'interface se développe sphériquement,
- que le liquide occupe un grand domaine au regard de celui qu'occupe la bulle,
- que le liquide est incompressible.

D'après plusieurs analyses théoriques comme expérimentales, la chute de pression en deçà de la pression de saturation, ou plus précisément la rupture du domaine liquide revient aux causes ci-dessous [9] :

- **Le changement brusque de la section** provoque une brusque variation de la pression ;
- **L'Augmentation excessive de la vitesse** sur des points de l'écoulement ;
- **La rugosité des parois de la buse** qui amplifie les sillages de cavitation de petite taille ;
- **Les mouvements vibratoires** sont un facteur très important aboutissant à la fluctuation de la pression au voisinage des parois ;

Pour notre cas de pulvérisation des liquides dans le domaine métallurgique, au niveau du rétrécissement à la sortie de la buse (convergent – divergent) la cavitation, en créant des point de recirculation, résulte le décollement de la couche limite le long de la paroi (fig. II.12).

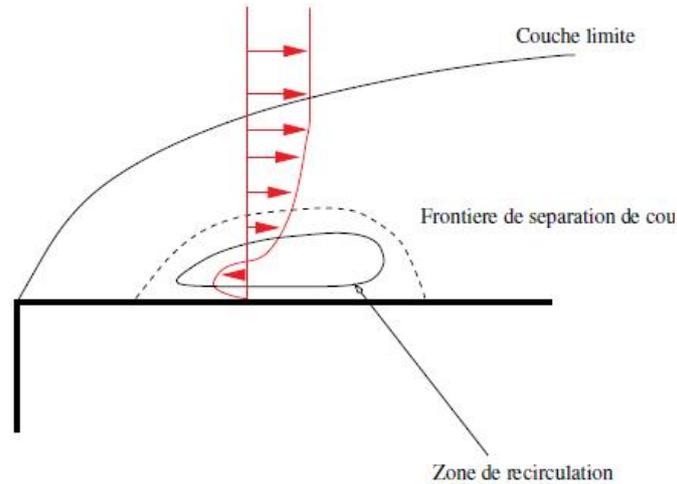


Figure II.12 : Séparation de la couche limite et zone de recirculation [9].

II.4.2.1. Les différents types de la cavitation

- Dans *La cavitation partielle* les poches ou les cavités dont la longueur n'est pas grande, prennent naissance au voisinage des changements vifs de section avant d'être transportés par l'écoulement (fig. II.13) ;

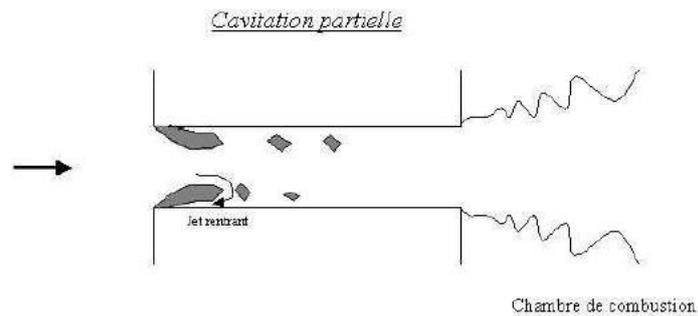


Figure II.13 : Représentation de la cavitation partielle [9].

- Pour des vitesses très élevées la longueur des cavités devient très importante, ce type est appelé *la super-cavitation*, (fig. II.14)

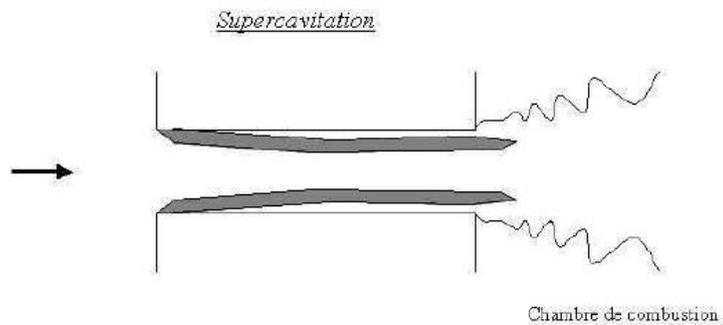


Figure II.14 : Représentation de la super-cavitation [9].

D'un point de vue dynamique ; les poches de cavitation peuvent être transportées par l'écoulement jusqu'à la sortie de la buse. Au niveau de la section de sortie, ces poches font varier totalement le profil de vitesse (fig. II.15).

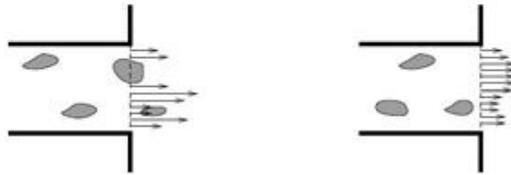


Figure II.15 : Changement du profil de vitesse en effet des poches de cavitation [1].

II.4.2.2. Impact de la cavitation sur l'écoulement

a. Dissymétrie de l'écoulement

D'après notre étude expérimentale pour l'estimation de la dispersion du jet, la dissymétrie des mesures par rapport au centre était remarquable dans le premier instant. Les causes reviennent principalement à l'état d'usinage de la buse de pulvérisation, où les défauts de construction de la pièce (trou mal centré, état de surface mal finie...etc.) provoque une mauvaise distribution de l'écoulement dans la pièce.

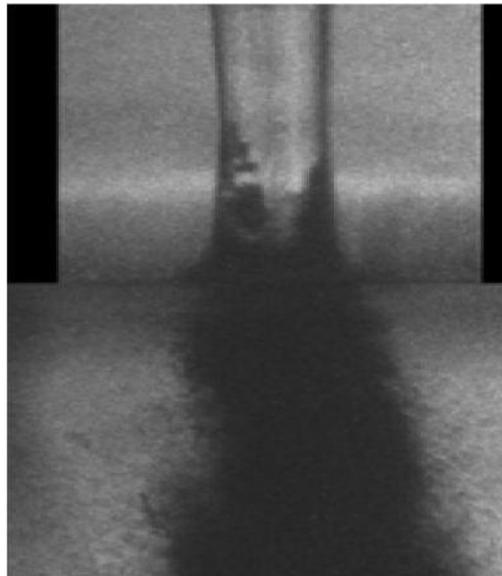


Figure II.16. Dissymétrie causée par la cavitation [3].

b. Limitation du débit dans l'orifice

La formation de bulles ou film de vapeur au niveau des points de changement brusque de section (zone de recirculation) (fig. II.17), contribue fortement au rétrécissement de la section de passage.

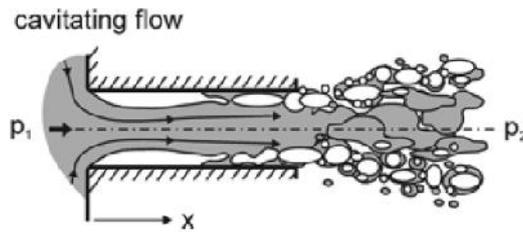


Figure II.17 : Rétrécissement de la section de passage par cavitation [2].

L'équation qui définit la nouvelle section de passage en fonction du coefficient de contraction est :

$$A_c = C_c \times A_{geo} \quad (eq: II. 11)$$

Pour un écoulement incompressible, le débit massique égal :

$$\dot{m} = \rho_l A_c V_c \quad (eq: II. 12)$$

En appliquant la loi de Bernoulli entre le point de contraction, et un point aval d'injection :

$$P_{inj} = P_{sat} + \frac{1}{2} \rho_l V_c^2 = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho_l V_2^2 \quad (eq: II. 13)$$

En combinant les équations II.12 et II.13, on obtient pour le débit l'expression suivante :

$$\dot{m} = A_{geo} C_c \sqrt{2 \rho_l (P_{inj} - P_{sat})} \quad (eq: II. 14)$$

D'après cette équation, la pression d'injection a un effet majeur sur le degré d'intensité du rétrécissement.

Chapitre III :

Description du banc d'essai

III.1. Contexte du travail expérimental

L'estimation de l'efficacité de refroidissement exige une connaissance précise du champ de dispersion du liquide que peut garantir la buse de pulvérisation en fonction des différents paramètres hydrodynamiques de fonctionnement.

Les différents codes de simulation numérique disponibles à notre utilisation n'ont pas permis l'analyse souhaitée, parce qu'ils ne satisfont pas les conditions réellement applicables dans les industries métallurgiques :

- dizaine de centimètre de hauteur de la buse ;
- domaine diphasique (air, liquide) ;
- grandeur du domaine d'étude qui exige un ordinateur très puissant ;

Pour remédier à ces obstacles, la construction d'un banc d'essai était inéluctable,



Figure III.1 : Les différents organes du banc d'essai.

III.2. Déroulement des essais

L'étude expérimentale a pour but de déterminer en premier lieu le champ de dispersion de l'eau ($\text{mm}^3/\text{mm}^2.\text{s}^{-1}$) en plusieurs points sur l'axe du plan pour différentes hauteurs de la buse et différentes pressions statiques d'alimentation, cela permet la compréhension réelle du mécanisme de dispersion, tout en expliquant l'effet de la pression et de la hauteur. La figure III.1 représente les différents organes du banc d'essai utilisé dans notre étude expérimentale.

D'autre part, dans certaines applications métallurgiques, les plaques ciblées par le jet de refroidissement ne sont pas stables, mais avancent par une vitesse et sur une distance bien définies ; le cas du laminage des aciers. Pour cela, on a adopté un système mécanique permet le mouvement du banc dans les deux sens avec une vitesse réglable pour mesurer la dispersion en fonction de la vitesse pour la même pression et la même hauteur.

III.3. Description du banc d'essai

- **La buse de pulvérisation**

Considérée comme la pièce la plus importante, sa construction était très difficile à réaliser à cause des petites dimensions qui exigent des machines et un outillage de haute qualité. Le centrage des trous de la pièce était un défaut major provoquant l'asymétrie du jet (les forets de faible diamètre durant le perçage de la pièce dévient du l'axe du centre), ce qui influe grandement sur l'empreinte du jet ; pour notre cas elle est théoriquement circulaire selon la section de sortie.



Figure III.2 : Buse utilisée dans le travail expérimental.

L'obtention de la pulvérisation du jet était impossible en voyant aux pompes disponibles à notre utilisation, pour cela on a envisagé un nouveau procédé facilitant la désintégration du jet. L'introduction d'une tige sous forme hélicoïdale (fig. III.2) à l'intérieur de la buse a changé totalement l'allure du jet en produisant une pulvérisation très importante (fig. III.3).



Sans intégration de la tige.



Avec intégration de la tige.

Figure III.3 : Effet de l'intégration de la tige hélicoïdale.

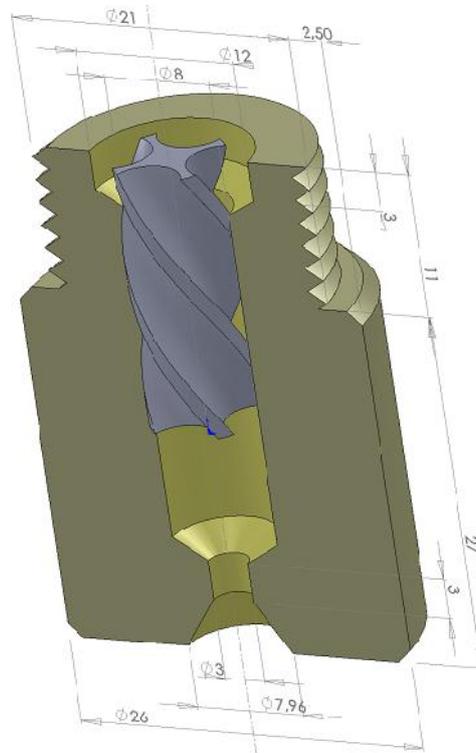


Figure III.4 : Description dimensionnelle de la buse avec la tige hélicoïdale ; buse en demi coupe.

La buse fabriquée en cuivre est dimensionnée sur la figure III.4.

- **Système de collection et de mesure de la dispersion**

L'idée a été inspirée des pluviomètres utilisés par les stations météorologiques, mais pour notre travail le volume collecté a été mesuré pour un intervalle de temps et pour une surface bien connus. La figure III.5 donne une description du système tubulaire et les bouteilles graduées utilisées.

Pour la collecte des gouttes pulvérisées, il est placé 21 tubes de captage de 9 mm de diamètre, la distance entre chaque deux tubes est de 24 mm.

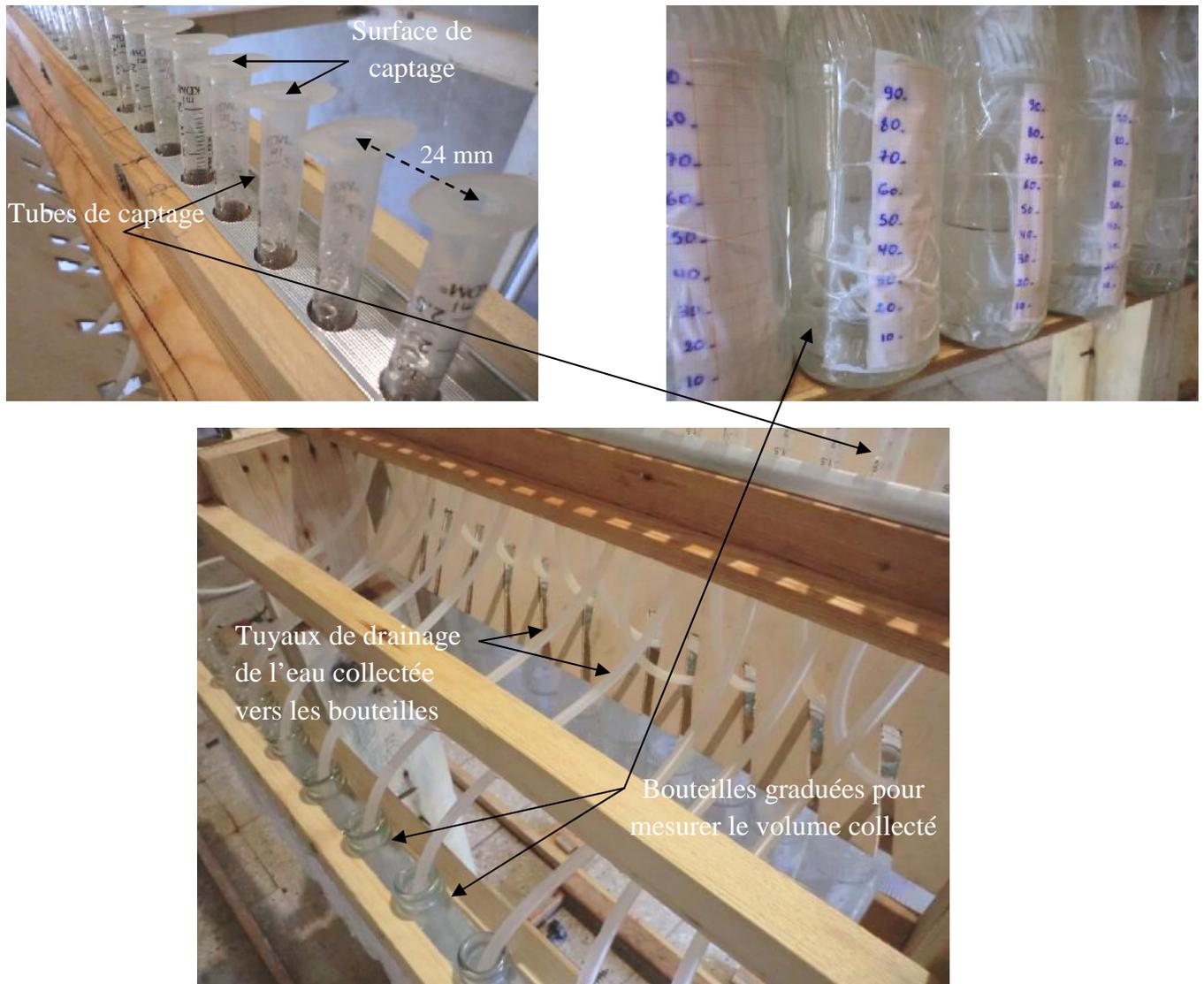


Figure III.5 : Système de captage et de mesure de la dispersion.

- **Système mécanique de déplacement**

Comme il est cité auparavant, la connaissance de la dispersion en fonction de la vitesse de déplacement permet la prédiction des résultats finale souhaités.

Le système mécanique et un système stator-rotor où le stator est un écrou fixé au niveau du dispositif à déplacer, le roto est une tige filetée de deux mètres de longueur.

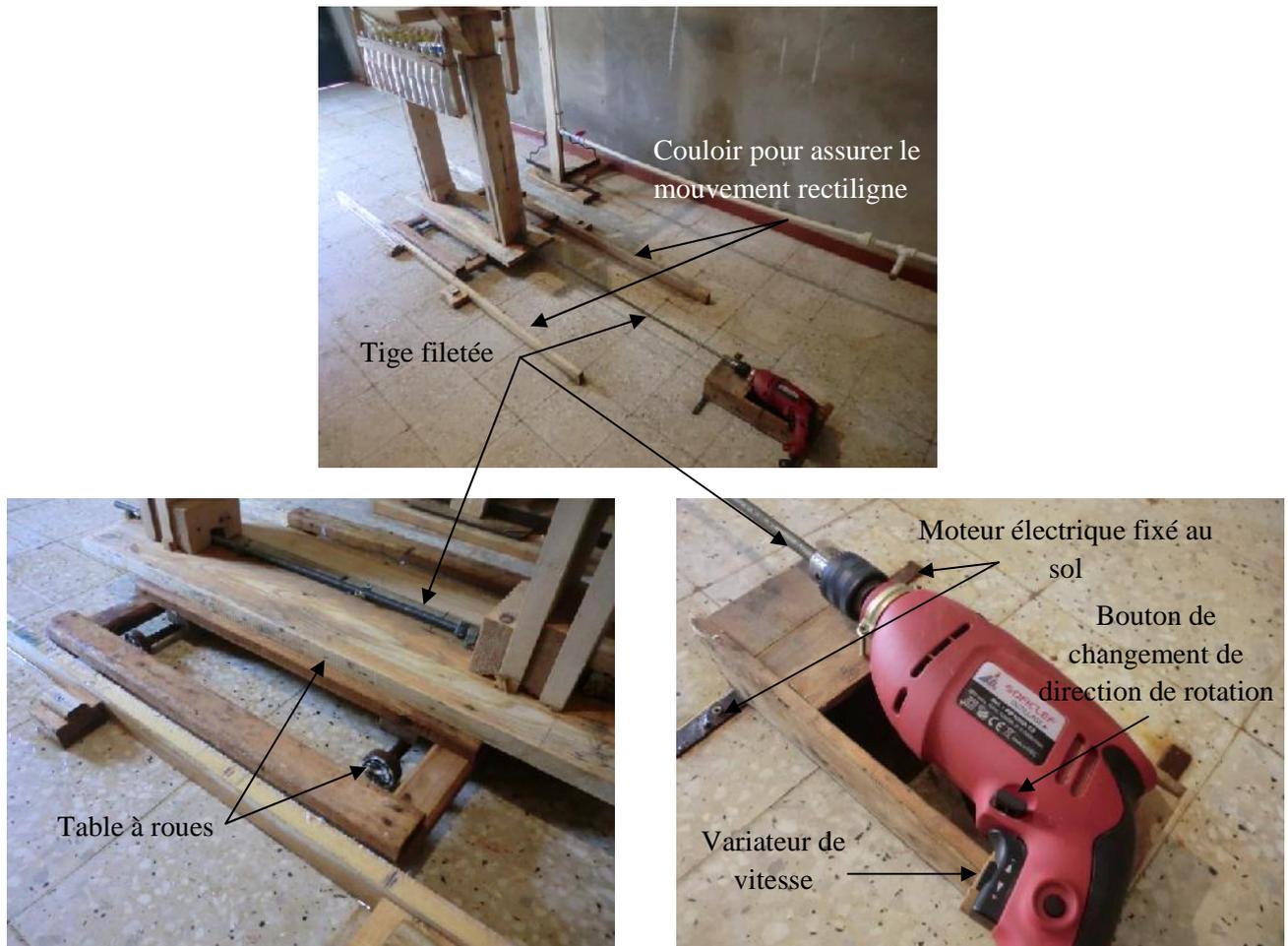


Figure III.6 : Description des différents composants du système de déplacement.

La rotation de la tige est assurée par un moteur électrique de 1050 Watts à vitesse de rotation réglable, qui signifie une vitesse de déplacement du banc variable (fig. III.6).

- **Système d'alimentation en eau**

Notre travail a été effectué pour trois pressions différentes. Afin d'assurer cette variété de pression trois pompes ont été installées en série, deux pareilles et une autre de faible puissance (fig. III.7). Le met en marche des trois pompes ensemble ou séparément est choisi selon la pression souhaitée.



Figure III.7 : Installation des trois pompes.

La pression statique d'alimentation juste avant l'entrée de l'eau dans la buse est lue sur un manomètre permet de mesurer la pression jusqu'à 10 bar, avec des graduations de 0.2 bar (fig. III.8).



Figure III.8 : Le manomètre.

Chapitre IV :

Simulation numérique de l'écoulement à l'intérieur du pulvérisateur

La pulvérisation reste un phénomène très complexe à étudier, dont la buse de pulvérisation joue un rôle très important tout en facilitant la désintégration de la continuité du liquide injecté.

De ce fait, la simulation numérique de l'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation avec l'utilisation des paramètres expérimentaux nous approche de l'aspect réel de l'écoulement interne.

La visualisation des différents profils des vitesses axiales, radiales et tangentielles à la sortie du pulvérisateur en fonction de la pression (condition expérimentale) nous facilite la compréhension et l'explication des résultats du travail expérimental. De notre côté, le code de calcul utilisé est le Fluent.

IV.1. Formulation mathématique

Dans l'approximation des milieux continus, tous les écoulements en mécanique des fluides peuvent être décrits en fonction des **équations de Navier-Stokes**, en posant des hypothèses liées à la nature du fluide utilisé.

IV.1.1. Cas général

En coordonnées cartésiennes (x_1, x_2, x_3) , les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement qui régissent l'écoulement s'écrivent comme suit :

- **Équation de continuité :**

Elle exprime le principe de conservation de masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (eq: IV.01)$$

- **Équation de bilan de la quantité de mouvement ($j = 1, 2, 3$)**

L'équation de quantité de mouvement écrites suivant x_i ($i = 1, 2, 3$) est :

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (eq: IV.02)$$

Remarque :

Dans notre étude numérique, l'écoulement de l'eau à l'intérieur de la buse de pulvérisation est considéré *stationnaire, turbulent et sans transfert de chaleur*. L'eau utilisée lors des travaux expérimentaux et numériques est un fluide *newtonien incompressible*.

- **Fluide newtonien :** Si un fluide à température constante a une viscosité qui reste constante quelque soit la valeur de la contrainte appliquée, on peut dire que ce fluide est newtonien.
- **Fluide non newtonien :** La viscosité varie selon la contrainte appliquée. Par exemple, une boue saturée d'eau diminue de viscosité si elle reçoit une secousse (il se fluidifie) : c'est le cas des glissements de terrain déclenchés par les séismes. Les forces de liaison entre les particules sont modifiées.

IV.1.2. Ecoulement stationnaire et incompressible

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{eq: IV.03})$$

- **Équation de bilan de la quantité de mouvement**

Sur l'hypothèse d'un fluide Newtonien incompressible, on trouve :

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i \quad (\text{eq: IV.04})$$

IV.1.3. Ecoulement turbulent

La turbulence est un phénomène lié à la viscosité, elle se caractérise par l'existence de transferts de matière s'effectuant dans des directions différentes de la direction moyenne d'écoulement.

Les écoulements turbulents sont essentiellement tridimensionnels et rotationnels, dont lequel se superpose au mouvement moyen un mouvement d'agitation aléatoire. Ils sont le siège de très intenses fluctuations dans le champ de vitesse.

Les écoulements hélicoïdaux adoptés dans plusieurs applications industrielles ; tels que notre cas d'étude et surtout pour les mélangeurs hélicoïdaux, sont des écoulements turbulents.

Approche statistique de Reynolds du champ de vitesse

Pour pouvoir modéliser les écoulements turbulents, Reynolds a introduit une description statistique du champ turbulent de vitesse.

Cette approche de Reynolds consiste à décomposer toutes grandeurs scalaires comme la somme de deux parties :

- Le premier représente le mouvement moyen ;
- Le second est le mouvement fluctuant.

D'où on obtient :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{eq: IV.05})$$

▪ **Équation de bilan de la quantité de mouvement**

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + \rho g_i \quad (\text{eq: IV.06})$$

Les termes $\overline{u_i u_j}$ donnent naissance aux tensions de Reynolds. Pour la modélisation de la turbulence, plusieurs contributions ont été présentées. Parmi ces modèles, on peut citer deux modèles les plus utilisés qui sont le modèle (k-ε) et le modèle des contraintes de Reynolds (appelé aussi RSM).

IV.2. Procédure de résolution numérique

La simulation numérique de l'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation a été effectuée par le code de calcul Fluent 6.3.26, sur un PC doté d'un microprocesseur Intel Core 2 Duo 2.20GHz de 3 Go de mémoire vive.

Pour la résolution des équations gouvernant l'écoulement interne, le code de calcul Fluent utilise la méthode des volumes finis. Cette méthode comprend deux étapes principales :

- Génération du maillage : consiste à diviser le domaine de calcul en plusieurs volumes de contrôle. La variable dépendante considérée est calculée en ces points.
- La discrétisation : consiste à intégrer les équations de conservation à travers les volumes de contrôle de chaque nœud.

Cette méthode consiste à effectuer des bilans de masse, de quantité de mouvement et d'énergie pour chaque maille. Elle est très conservative : tout le flux entrant dans un volume donné est égal au flux sortant du volume adjacent, donc parfaitement adaptées à la résolution des lois de conservation.

IV.2.1. Géométrie & Maillage

Le mailleur Gambit utilisé est un pré-processeur offre trois fonctions :

- Construction de la géométrie du problème ou bien l'importer d'un logiciel de CAO (SolidWorks...) si elle est très complexe ;
- Création et vérification du maillage ;
- Définition des conditions aux limites.

Le maillage constitue un point clé dans la modélisation numérique, dont la qualité et le degré d'affinement influent fortement sur la précision des résultats et le temps de calcul. Un maillage plus perfectionné peut donner de bons résultats dans un court temps de calcul.

IV.2.1.1. Différents types de maillage

Sous Gambit 2.3.16 on peut générer les types de maillage suivants :

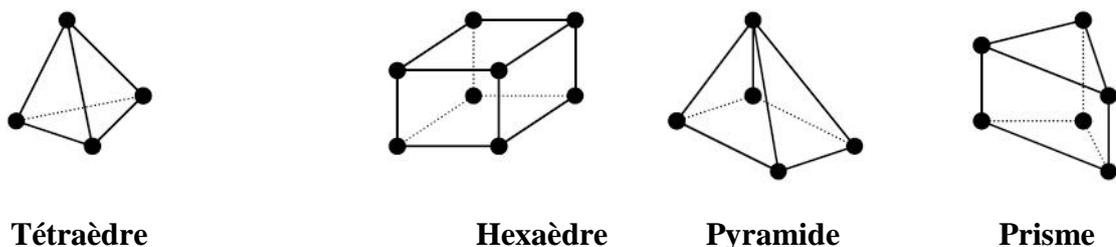


Figure IV.1 : Différents types de mailles. [22]

- **Maillage structuré (quadra/hexa)**

Pour des cas pas très compliqués, la division de la géométrie en plusieurs zones permet d'avoir un maillage structuré. Cela fait accroître la précision des résultats obtenus, et de plus alléger le temps de calcul. Un maillage structuré est généralement composé de mailles quadrilatérales / hexaédriques

- **Maillage non structuré (tri/tétra)**

Il est plus convenable aux géométries complexes. Le choix du type des mailles se fait arbitrairement sans aucune contrainte.

Le nombre total des mailles est assez grand par rapport à un maillage structuré. De ce fait, les erreurs sont très importantes [23].

- **Maillage hybride**

Il crée des mailles hexaèdres au voisinage des parois, et des mailles tétraèdres dans le reste du domaine.

Note : Au voisinage des parois les phénomènes de turbulence sont très importants, cette particularité nous exige d'adopter un maillage plus raffiné dans ces zones.

Technique de création de la géométrie : Lors de la création de notre géométrie, nous n'avons pris en considération que la partie interne ; c'est-à-dire le volume rempli par l'eau en écoulement (volume fluide). Cette technique permet d'éviter l'encombrement de la géométrie (Figure IV.2).

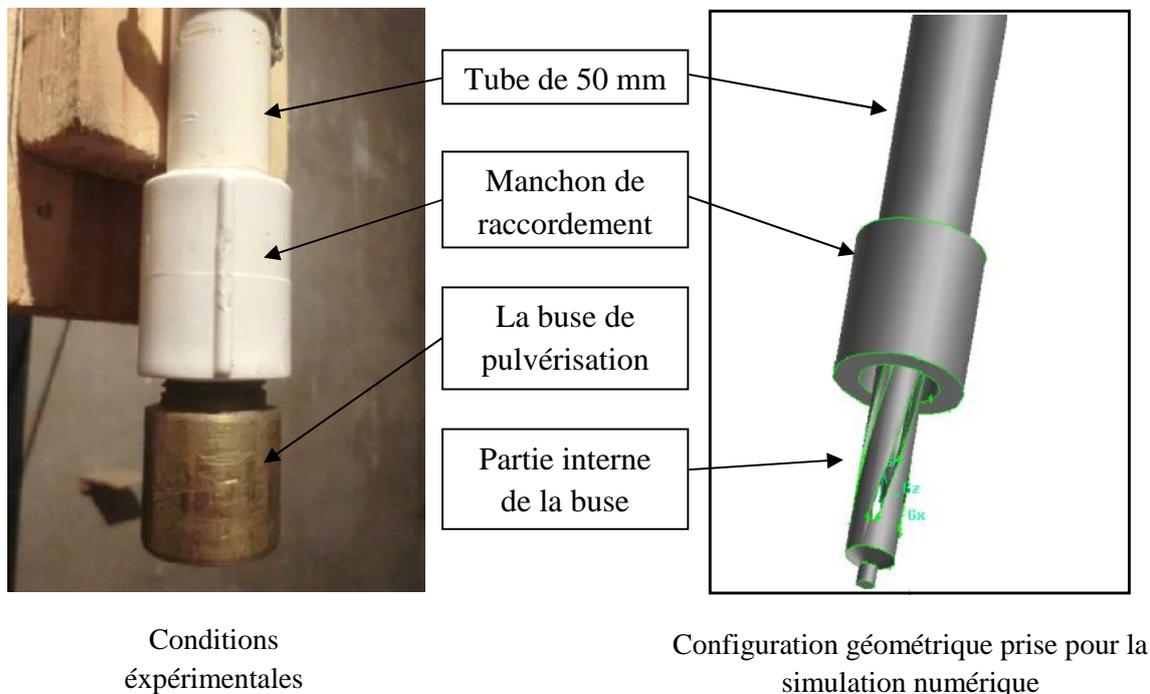
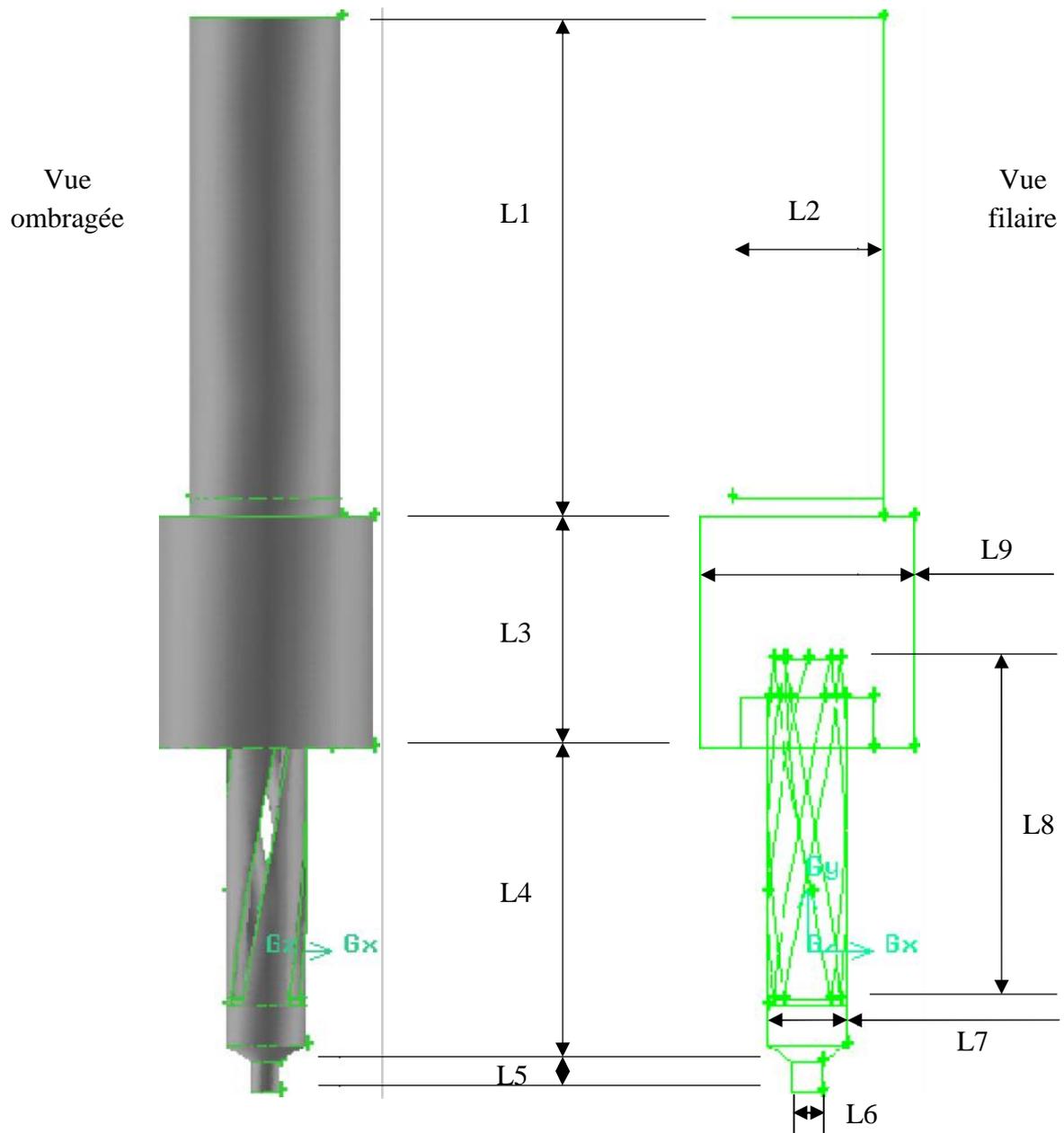


Figure IV.2 : Les conditions de création de la géométrie.



	<i>La signification</i>	<i>La longueur</i>
L1	Tube en plastique 15/21	50.00 mm
L2	Diamètre interne du tube	15.00 mm
L3	Partie interne du manchon	23.00 mm
L4	La longueur du perçage (8 mm)	31.22 mm
L5	La longueur du col	03.00 mm
L6	Diamètre du col	03.00 mm
L7	Diamètre de la tige et du perçage	08.00 mm
L8	La tige hélicoïdale	34.00 mm
L9	Diamètre interne du manchon	21.00 mm

Figure IV.3 : Schéma descriptif de la géométrie créée sur Gambit.

Du fait de la grande complexité de notre géométrie, nous avons divisé le volume de contrôle en plusieurs parties pour pouvoir générer un maillage structuré dans certaines zones et éviter le maillage **tétra/hybride** (figure IV.4). Cette technique permet de mieux perfectionner le maillage et alléger le calcul.

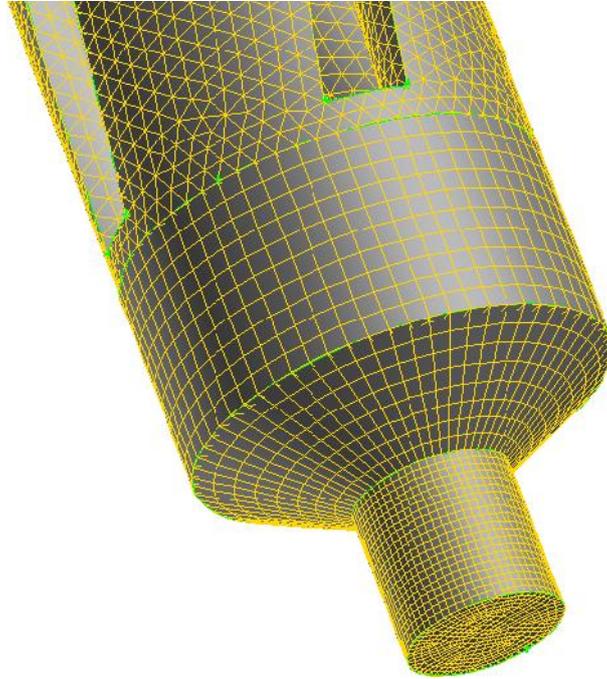


Figure IV.4 : Division du volume et génération du maillage.

IV.2.1.2. Choix des types de frontières

Reflètent les circonstances réelles auxquelles est obéit l'écoulement, elles doivent être choisies d'une manière à concrétiser et satisfaire la réalité en approchant l'aspect théorique de l'aspect expérimental de fonctionnement.

Pour notre cas d'étude, nous avons les spécifié à partir de notre travail expérimental qu'on a mené sur le banc d'essai.

Zones	Type de condition	Valeur
Entrée	Débit massique entrant	8.22 et 5.04 kg/min
sortie	Pression de sortie	1 bar
Paroi solide	mur	
Volume interne	Fluide (l'eau)	

- **L'entrée**

Lors du travail expérimental, on a mesuré le débit massique d'eau pulvérisé en fonction de chaque pression statique d'alimentation.

Débit mesuré :

- **8.22 kg/min pour 3.8 bar**
- **5.04 kg/min pour 2.0 bar**

▪ **La sortie**

L'eau pulvérisée à la sortie du pulvérisateur se détend dans le milieu atmosphérique. De ce fait, on a choisi comme condition au limite **la pression de sortie**, où règne la pression atmosphérique (1 bar = 101325 Pascal).

▪ **Propriétés du fluide**

L'eau utilisée est un fluide Newtonien, incompressible, ses propriétés sont celles offertes par Fluent :

Fluide	Propriétés
Masse volumique	998.2 (kg/m ³)
Viscosité	0.00103 (kg. m ⁻¹ . s ⁻¹)

IV.2.2. Procédure de résolution sur Fluent

Après avoir effectué les différentes étapes de génération et vérification du maillage, on lance la lecture sur Fluent.

Fluent est un logiciel permettant une bonne simulation des écoulements internes dans plusieurs applications industrielles ; tels que les machines tournantes, et ça même pour des géométries très complexes.

Avant le lancement du calcul, il est judicieux de choisir certains paramètres essentiels pour la résolution des équations de continuité et le traitement du problème :

IV.2.2.1. Modélisation

a. Solveur

Fluent contient trois formulations :

Implicite isolé (segregated-implicit) : il est plus approprié pour les écoulements incompressibles ; tels que notre cas d'étude.

- Nécessite moins de mémoire ;
- Donne plus de précision dans les résultats.

Explicite couplé (coupled-explicit) : très préféré pour les écoulements compressibles instationnaires.

Implicite couplé (coupled-implicit) : plus recommandé que l'explicite couplé, il exige deux fois plus la mémoire recommandé par rapport à l'explicit couplé.

- Plus rapide mais exige plus de mémoire que le modèle explicite.

b. Modèle de turbulence

On doit choisir le type d'écoulement à étudier ; laminaire ou turbulent.

Pour la modélisation des écoulements turbulents comme notre cas, Fluent présente les modèles suivants :

- Spalart- Allmaras ;
- k-epsilon ;
- k-omega ;
- Reynolds Stress (RSM);
- Detached Eddy Simulation ;
- Large Eddy Simulation.

Chaque modèle présente des avantages et des inconvénients. Le choix entre ces modèles dépend fortement du type d'écoulement à l'intérieur de la pièce.

Pour notre cas d'étude, nous avons choisi le modèle RSM qui est plus adapté aux écoulements rotationnels et tourbillonnaires. Ce modèle est très utilisé dans la simulation des machines tournantes et surtout pour l'étude des séparateurs d'air où le mouvement rotationnel est le principe du fonctionnement [20].

A partir de plusieurs travaux ont été menés pour l'évaluation des performances des différents modèles, le modèle RSM illustre bien les zones de dépression suscitée par l'écoulement rotationnel. [20], [22].

Le type du maillage et le degré de raffinement influent fortement sur le choix des équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation. La configuration du modèle et le choix des différents paramètres ont été effectués à l'aide de certains travaux concernant la simulation des problèmes liés aux écoulements internes rotationnels [20].

IV.2.2.2. Teste d'indépendance du maillage

Pour plus de précision dans le calcul, il faut mieux atteindre un état où le maillage n'a aucun effet sur le comportement hydrodynamique de l'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation.

La figure IV.5 montre le profil de la vitesse axiale obtenu au niveau de la section de sortie de la buse avec un maillage constitué de 879297, 677523 et 612101 Cellules.

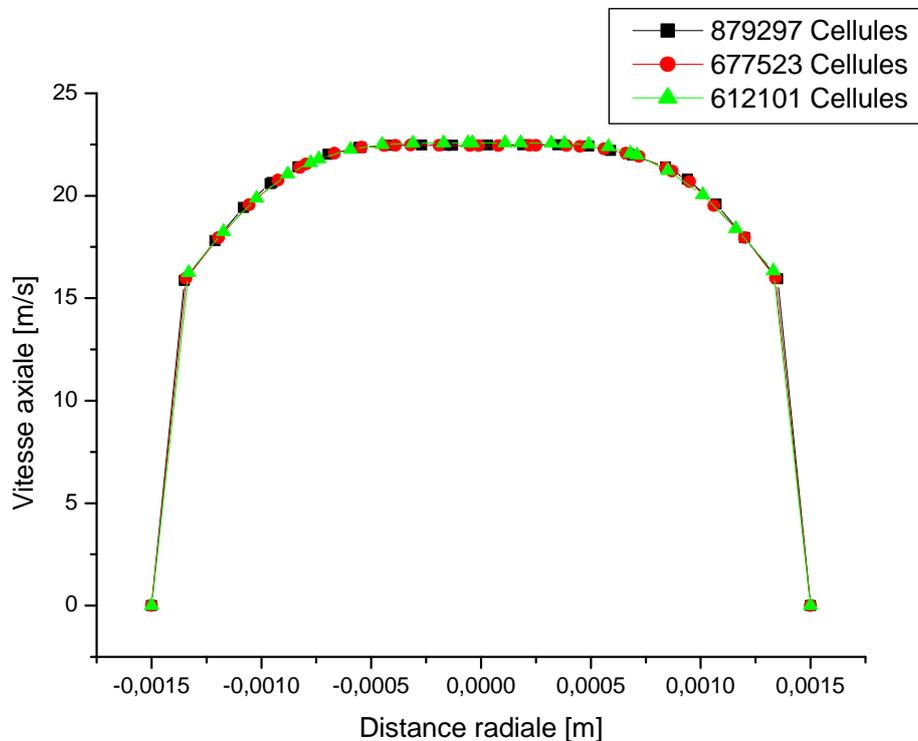


Figure IV.5 : Teste d'indépendance du maillage.

D'après le teste du maillage, la variation des resulats obtenus n'est pas très importante. Par conséquence, le reste du travail a été effectué en utilisant le maillage constitué de **677523** Cellules.

La convergence et l'arret du calcul ont été estimés pour une valeur de 10^{-5} pour epsilon et 10^{-4} pour les autres risidus.

Chapitre V :

Analyse et discussion des résultats

D'un point de vue hydrodynamique, l'évaluation du champ de dispersion réel sur les plaques à refroidir dans les procédés métallurgiques est considérée comme une étape déterminante dans l'ensemble des étapes de l'élaboration des métaux : la connaissance du champ de dispersion ou bien le débit d'eau que va recevoir chaque point de la plaque sert à maîtriser le cycle de refroidissement. Ce dernier présente la clé du traitement thermique, parce qu'il permet la prédiction des propriétés finales de chaque point de la plaque.

Première partie :

V.1. Résultats du travail expérimental

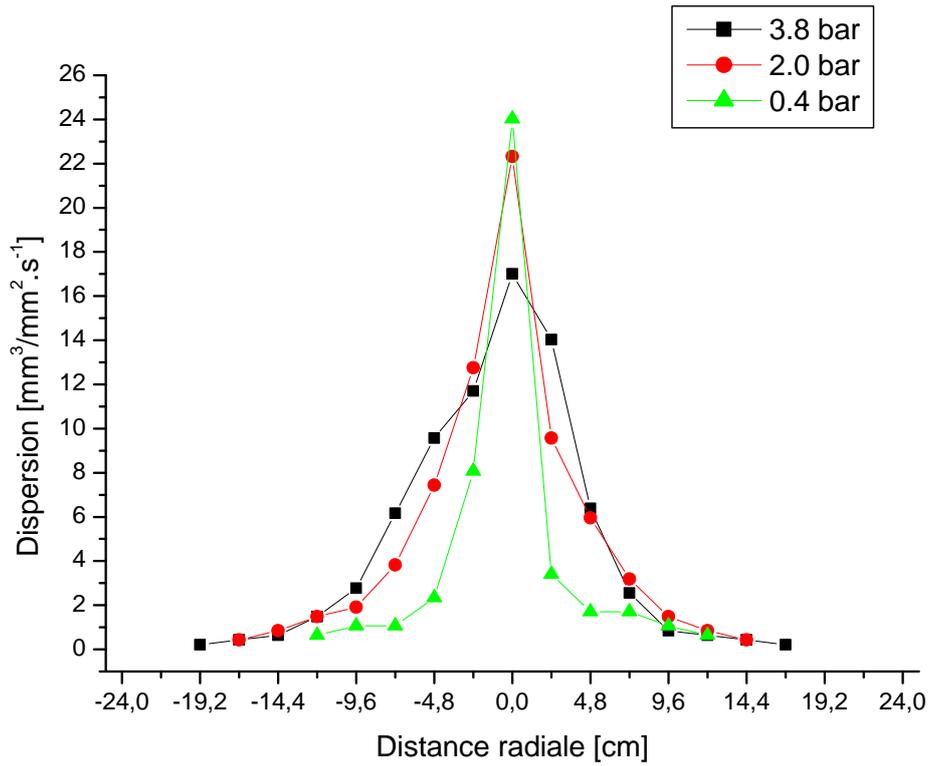


Figure V.1: Champ de dispersion, H = 43 cm.

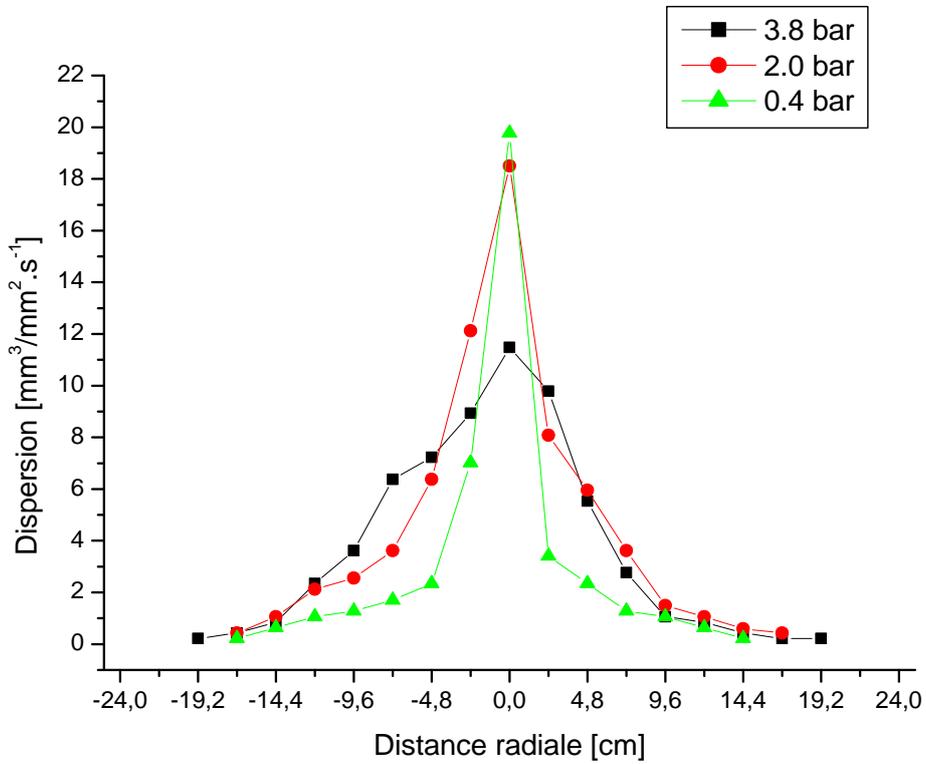


Figure V.2 : Champ de dispersion, H = 53 cm.

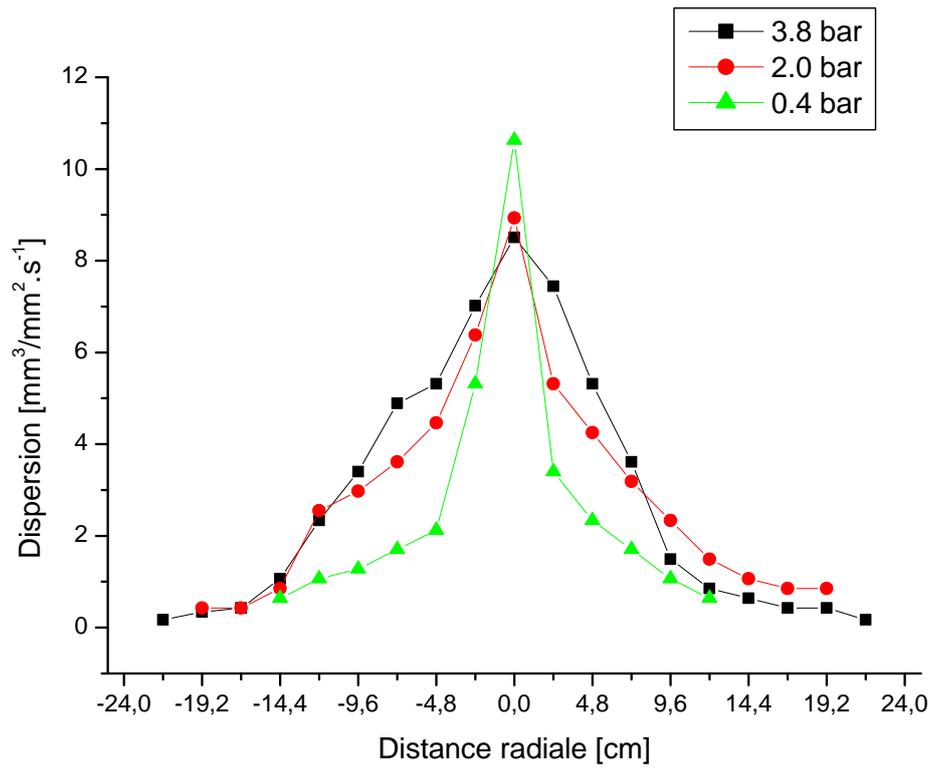


Figure V.3 : Champ de dispersion, H = 63 cm.

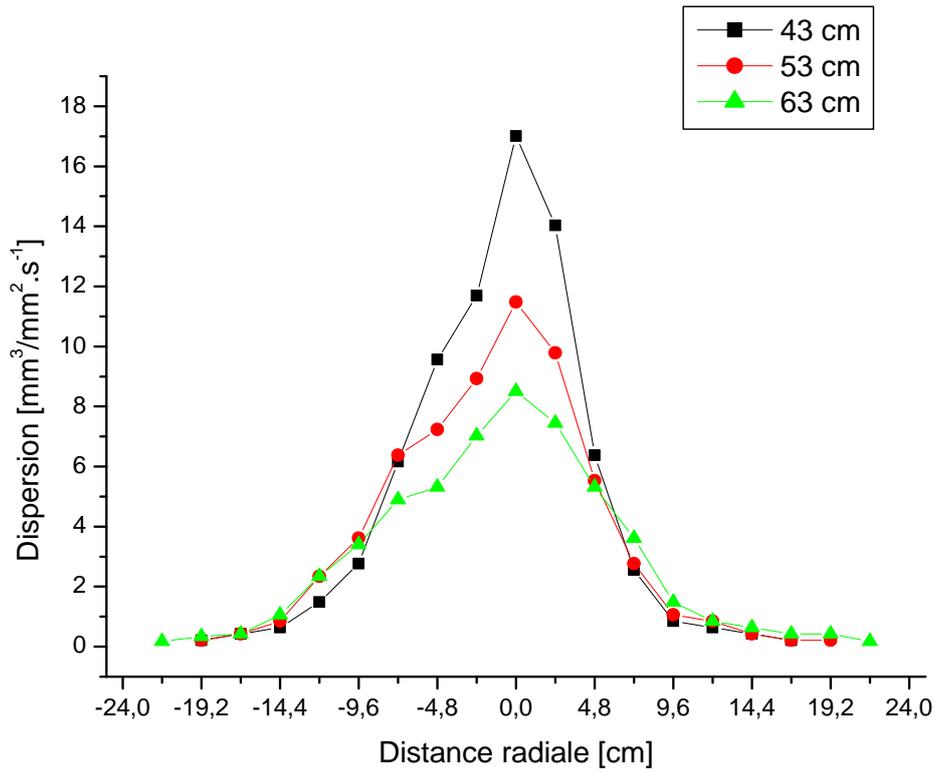


Figure V.4 : Champs de dispersion, Pression = 3.8 bar.

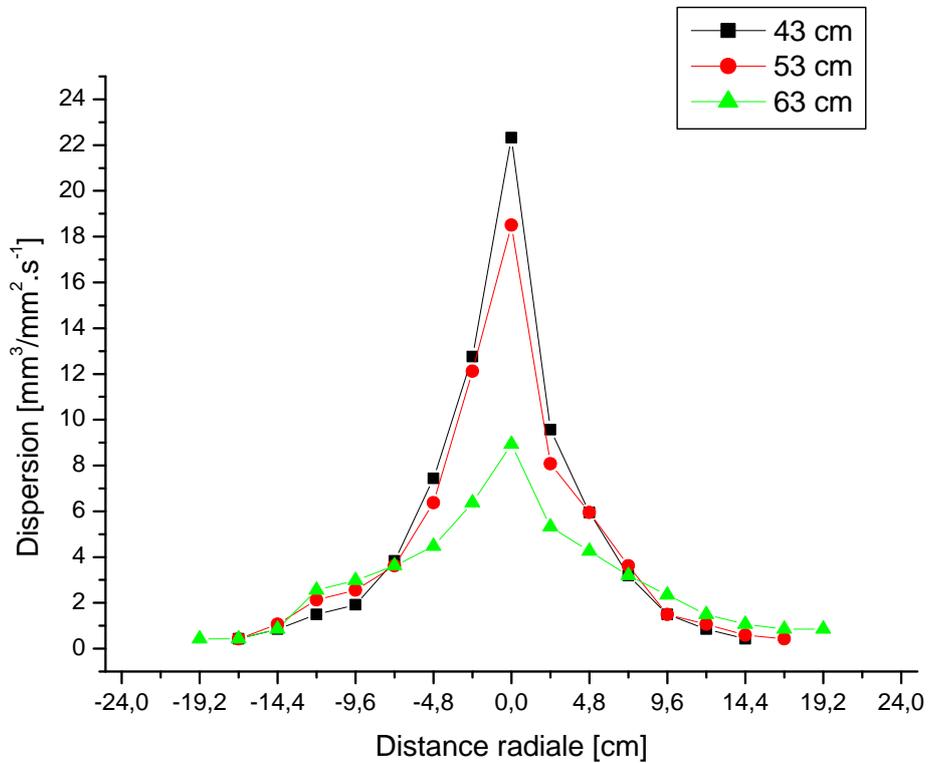


Figure V.5 : Champ de dispersion, Pression = 2.0 bar.

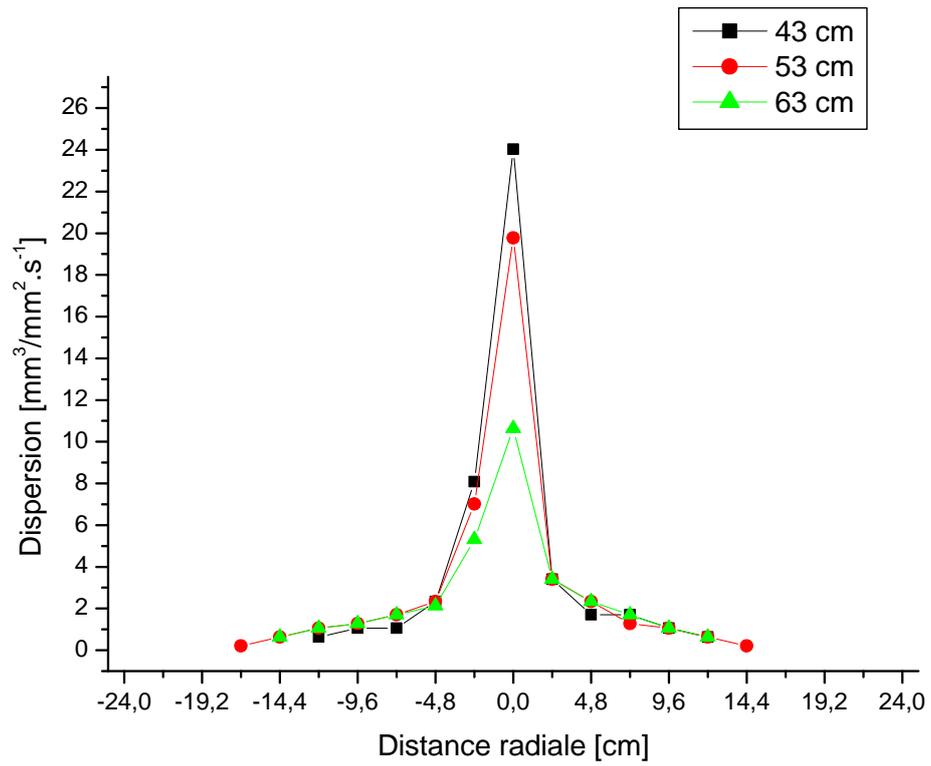
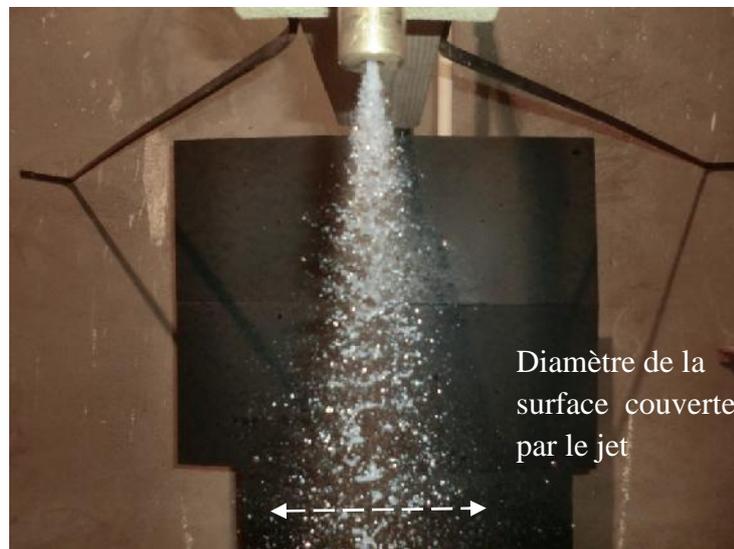


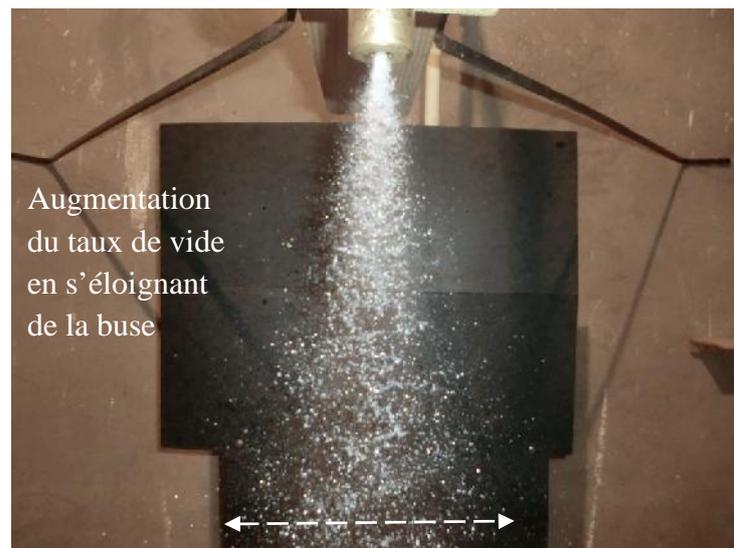
Figure V.6 : Champ de dispersion, Pression = 0.4 bar.



Pression = 0.4 bar



Pression = 2.0 bar



Pression = 3.8 bar

Figure V.7 : Variation de l'allure du jet en fonction de la pression.

V.1.1. Remarques

D'après les figures ci-dessus, montrant le champ de dispersion et l'allure de jet en fonction de la pression et la hauteur, les points qu'on peut tirer sont :

- Au niveau du centre, la dispersion est maximale pour une pression minimale (relation inverse) ;
- L'angle ou bien le diamètre de l'empreinte du jet accroît avec la croissance de la pression (fig. V.7) ;
- Le diamètre des gouttes produites par la pulvérisation diminue quand la pression augmente (fig. V.7) ;
- Augmentation du taux de vide avec l'augmentation de la hauteur.

V.1.2. Explication et analyse

L'ajout de la tige hélicoïdale à l'intérieur de la buse a modifié totalement la nature de l'écoulement pour être un écoulement tourbillonnaire ayant trois directions de mouvement appelé « **écoulement tridimensionnel** » (fig. V.8).

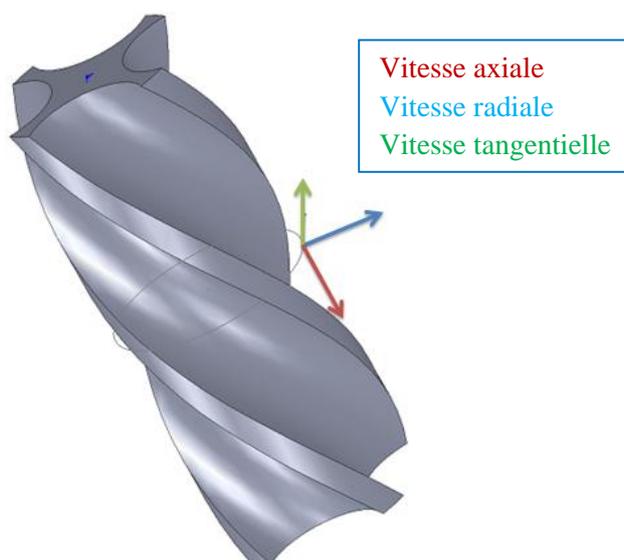


Figure V.8 : Les trois composantes de l'écoulement tourbillonnaire.

L'écoulement tourbillonnaire à l'intérieur de la buse crée une dépression sur le l'axe d'écoulement à cause de la force « centrifuge », qui engendre en conséquence l'augmentation de la pression statique en approchant des parois.

La force radiale et centrifuge à la sortie de la buse joue un rôle très important, tout en cherchant à élargir l'angle du jet. Alors sa croissance du fait de l'augmentation de la pression permet d'agrandir l'angle de pulvérisation, ce qui traduit l'élargissement de la surface couverte par le jet.

V.1.2.1. Comment la tige hélicoïdale facilite la désintégration du jet ??

Il est bien connu que l'augmentation de la pression fait accroître le débit d'eau traversant le couple buse/tige. Du fait de l'augmentation du débit, la vitesse d'entrée devient très importante, ce qui est traduit par trois forces composantes de l'écoulement tridimensionnel très influençant sur l'allure finale du jet.

D'un point de vue physique, et après voir l'allure du jet sans tige hélicoïdale, le mécanisme de la pulvérisation dépend sensiblement du comportement hydrodynamique de l'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation.

Revenant au mécanisme de rupture des jets liquides décrit précédemment, le jet à la sortie de la buse heurte l'air environnant au repos, ce dernier son rôle est de fractionner le jet en désintégrant la continuité liquide. Opposées par les forces de viscosité, ce processus est accéléré par les forces radiales et tangentielles cherchant à tirer le volume liquide vers les cotés latéraux. Ce mécanisme accélère considérablement la désintégration du jet en facilitant l'inter corporation de l'air dans le volume liquide.

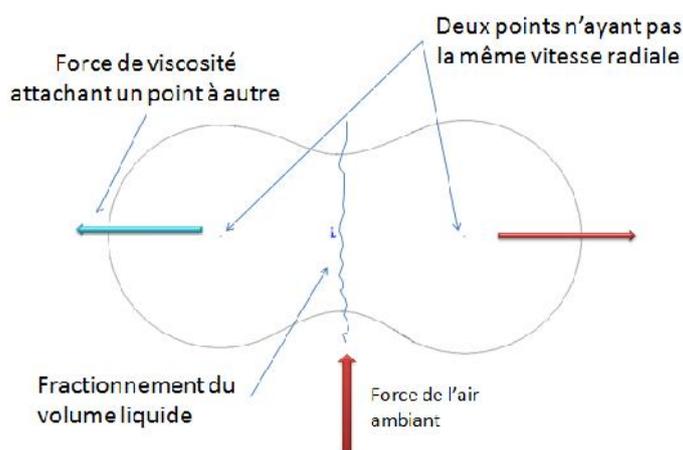


Figure V.9 : Action combinée de la force radiale, de l'air et de la viscosité.

D'autre point, la taille des gouttes produites est fonction de la grandeur des forces aérodynamiques agissant sur l'interface air/liquide. La structure rotationnelle de l'écoulement remarquée juste au voisinage de la sortie de la buse impose sur le jet liquide une excitation ou bien une perturbation produite de trois forces agissant ensemble et de la même importance, ce qui peut être appelé « instabilité tridimensionnel »

Cette instabilité tridimensionnelle aboutisse finalement pour des pressions assez suffisantes à la production de fines gouttelettes.

L'un des paramètres hydrodynamiques qui joue un rôle très important pour la détermination de la courbe de dispersion est la hauteur. Le volume collecté par les tubes de captage diminue très clairement en s'éloignant de la buse, cela se traduit par l'augmentation du taux de vide caractérisé par la fraction surfacique liquide.

Cette dernière est calculée par le rapport entre la surface occupée par le liquide sur celle occupée par l'air.

La chose qui tire l'attention et qu'était très étonnante au début est que l'augmentation de la pression a diminué la pulvérisation au centre pour donner une courbe plus élargie. Cela est expliqué par une croissance excessive des forces centrifuges et tangentielles.

V.1.2.2. Le comportement Gaussien de la dispersion P

Il a été bien remarqué durant l'établissement des courbes de dispersion que avec l'augmentation de la hauteur de jet, la dispersion inscrite pour les différents point subit une diminution, et d'autre coté, les courbes de dispersion tendent à s'aplatir pour élargir la surface couverte par le jet. Ce comportement est nommé **dispersion de Gauss**, elle est constatée de la même manière avec l'augmentation de la pression.

Le mécanisme aboutissant à la dispersion de Gauss avec l'augmentation de la pression ne peut être obtenu que pour les buses à turbulence (buse à écoulement rotationnel interne).

La distribution de gauss avec l'augmentation de la hauteur a été prouvé par certain hauteur [04].

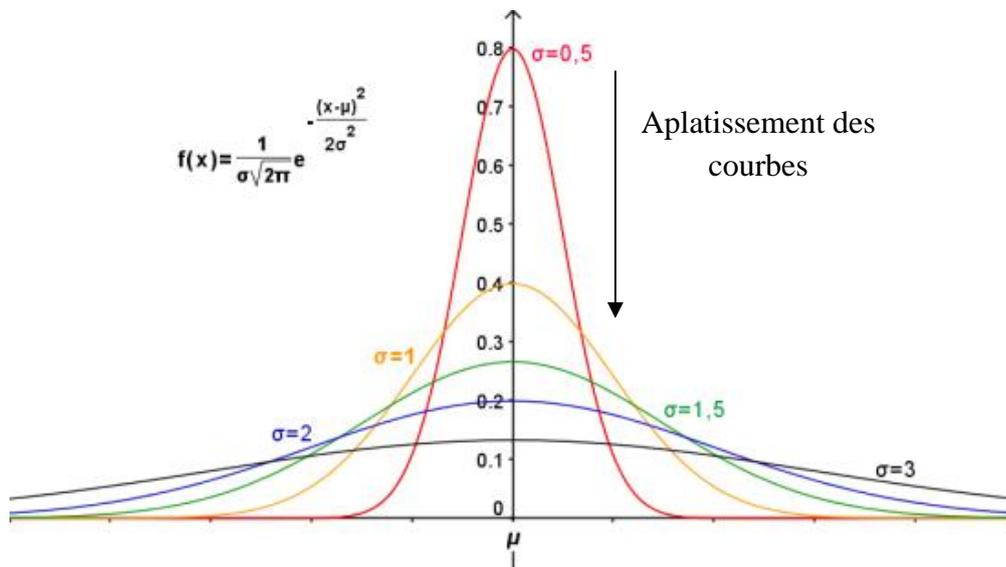


Figure V.10 : Exemples de la fonction de gauss (Loi normale de Gauss).

V.1.2. Variation du volume collecté en fonction de la vitesse

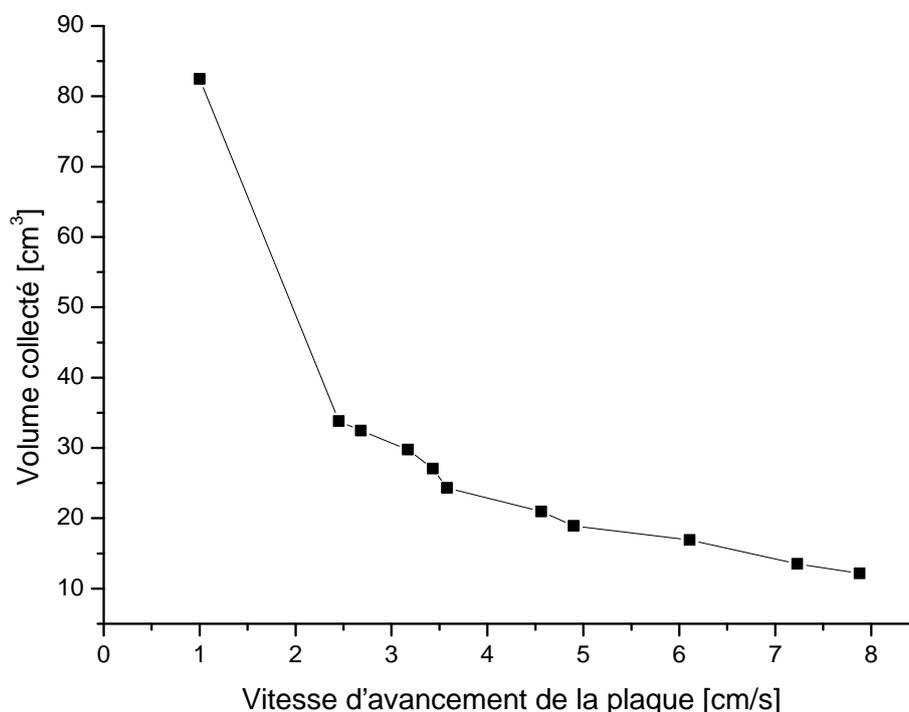


Figure V.11 : Variation du volume collecté en fonction de la vitesse d'avancement pour les points passant du centre de jet.

Discussion de la figure V.11 : elle montre un effet majeur de la vitesse d'avancement sur le cycle de refroidissement : la croissance de la vitesse fait diminuer la quantité d'eau captée par les différents points de la plaque durant le fonctionnement.

En vue d'optimiser les lignes de refroidissement utilisant la pulvérisation des jets liquides, les experts et les ingénieurs ont besoin d'acquérir plus de données expérimentales sur les différents paramètres hydrodynamiques entrant en jeu.

Il est bien connu que dans certaines applications sidérurgiques, le milieu refroidissant est composé de plusieurs pulvérisateurs (réseau de pulvérisation), par conséquent, la quantification du champ de dispersion en fonction de la vitesse d'avancement de la ligne contribue fortement à connaître l'arrangement le plus favorable des pulvérisateurs.

Le fait d'accroître ou diminuer la vitesse n'a aucune signification s'il n'est pas accompagné d'un diagnostic thermique.

Deuxième partie :

V.2. Résultats de la simulation numérique

V.2.1. Description du comportement hydrodynamique de l'écoulement interne

L'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation est l'étape déterminante du mécanisme réel de la désintégration du jet à la sortie. D'un point de vue hydrodynamique, l'analyse de la répartition des champs de pression et de vitesse nous donne une bonne information sur l'effet de l'écoulement rotationnel interne.

Note : Pour plus de commodité en compréhension, Fluent permet de créer des plans sur lesquels on peut afficher les résultats de répartition des différents paramètres (pression, vitesse...etc.).

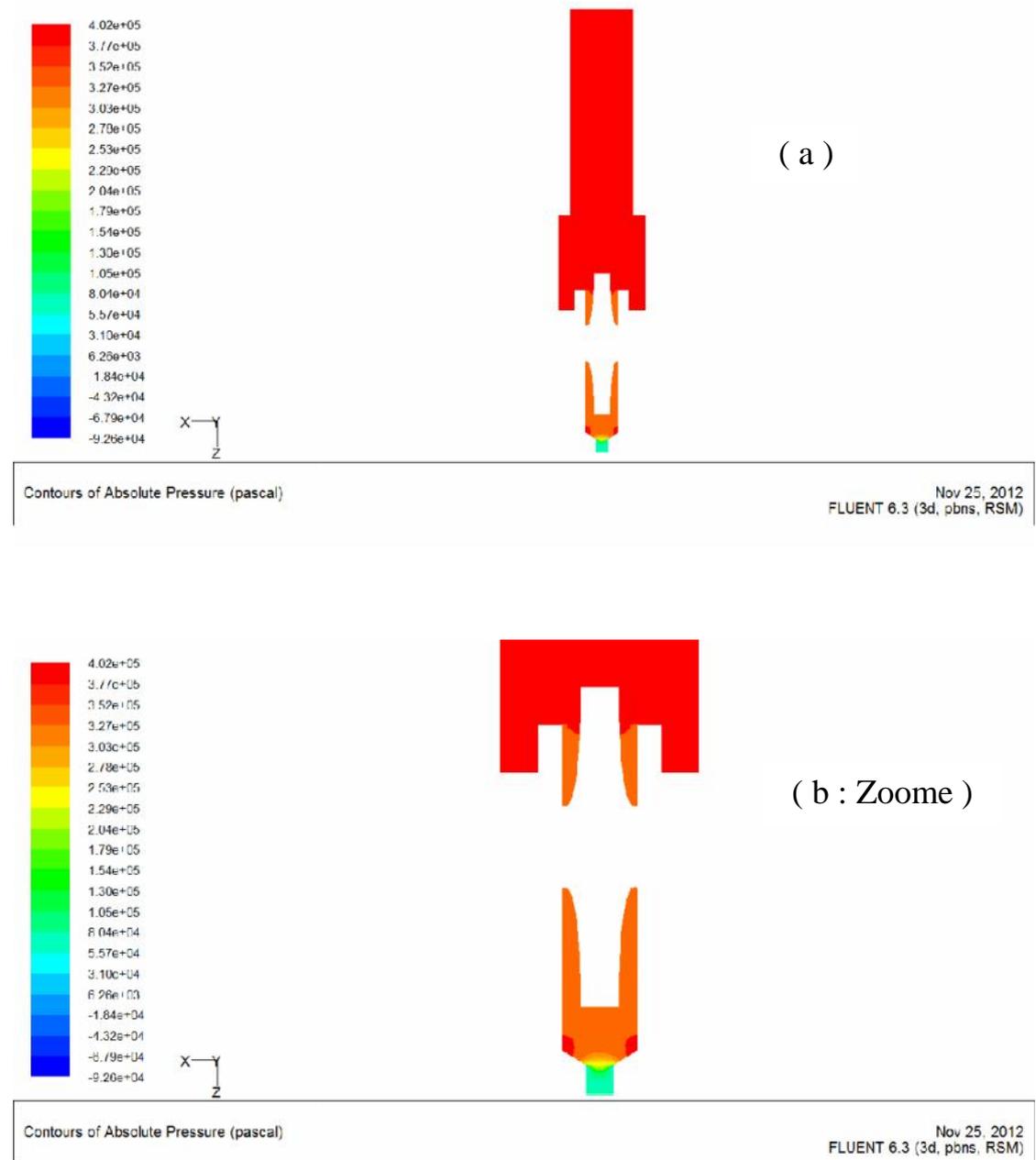


Figure V.12 : Champ de la pression statique (a), (b).

V.2.1.1. Champs et profils de la pression statique

A partir de la représentation du champ de la pression statique absolue sur un plan transversal, on peut tirer les points suivants (fig. V.12) :

- De l'entrée jusqu'à la tige hélicoïdale la pression reste constante, et ça du au changement très faible de section entre le tube de 50 mm et le manchon.
- Ensuite une chute très importante de la pression statique à l'intérieur des rainures hélicoïdales à cause de l'accélération de l'écoulement.
- Après la sortie des rainures hélicoïdales, l'eau entre dans la chambre de formation de l'écoulement tourbillonnaire. Ce type d'écoulement est connu par une répartition radiale de la pression statique : les hautes pressions se situent au voisinage des parois tandis que les basses pressions se concentrent au centre. La dépression au centre de la chambre facilite l'aspiration du fluide vers le fond et ensuite vers le col.
- En entrant dans le col, la chute de pression est très importante : le fluide se détend vers la sortie pour atteindre la pression atmosphérique (la pression à la sortie est la pression atmosphérique). Cette dépression provoque une grande accélération axiale de l'écoulement vers la sortie.

Note : *En ce qui concerne l'affichage des résultats relatifs à la vitesse radiale, Fluent ne donne pas une valeur absolue, mais il donne : un signe négatif si l'écoulement est orienté à l'intérieur du volume de contrôle, et un signe positif dans le cas contraire, cette stratégie facilite plus la compréhension du comportement hydrodynamique de l'écoulement.*

V.2.1.2. Champs et profils de la vitesse

L'analyse des résultats des trois composantes de vitesse (fig. V.13) de l'écoulement interne permet de distinguer les remarques suivantes :

- En amont de la tige hélicoïdale et jusqu'à l'entrée du tube, le comportement hydrodynamique de l'écoulement n'a pas subi de grands changements, sauf une petite accélération radiale vers la tige justifiée par l'orientation de l'eau envers les rainures hélicoïdaux.
- Juste avant l'entrée des rainures, on constate une grande accélération radiale vers l'entrée de la tige pour satisfaire la continuité de débit à cause du rétrécissement de section de passage. La chute de pression à l'intérieur des rainures hélicoïdales crée une accélération axiale remarquable.

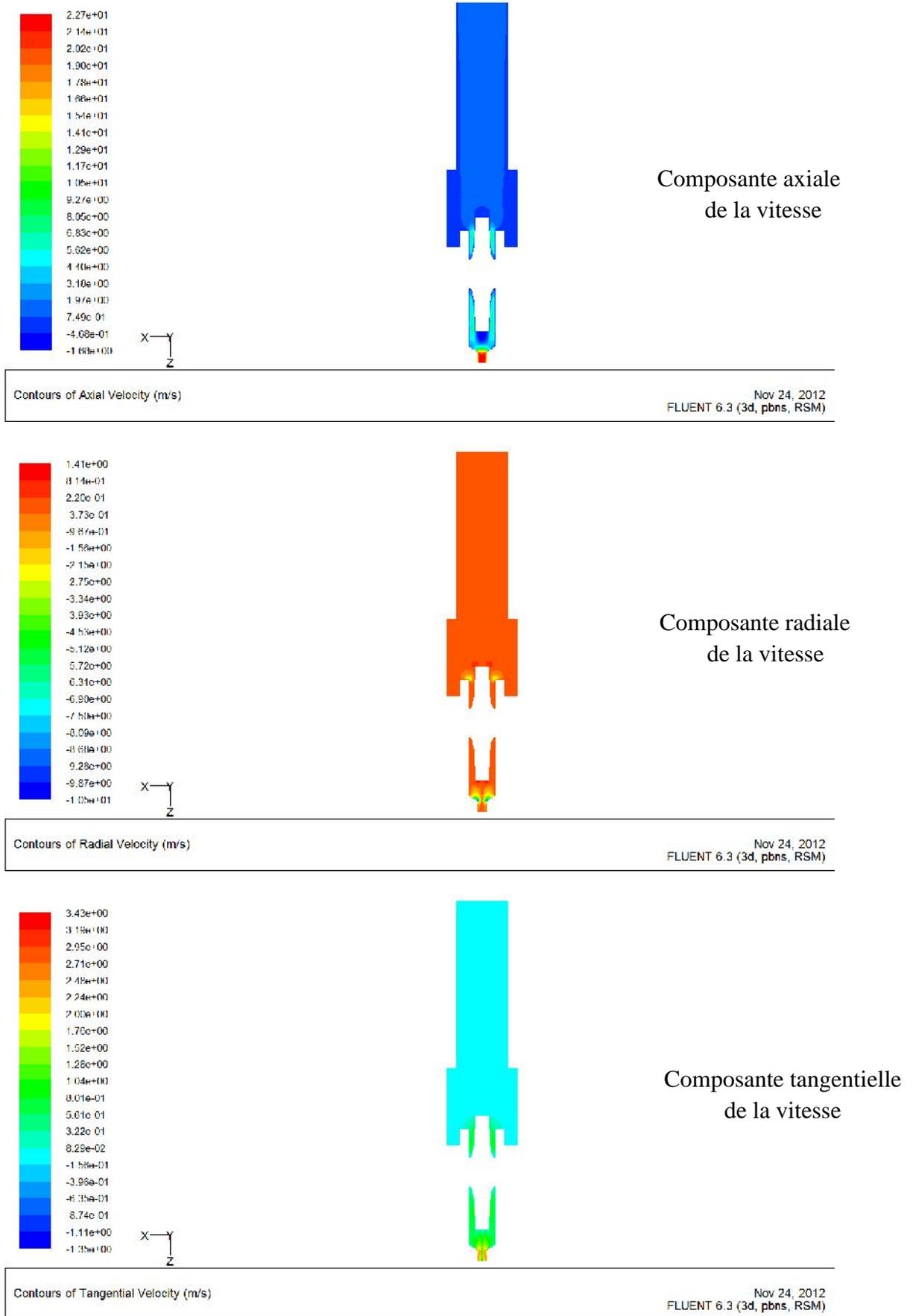


Figure V.13 : Champ des trois composantes de la vitesse : axiale, radiale et tangentielle.

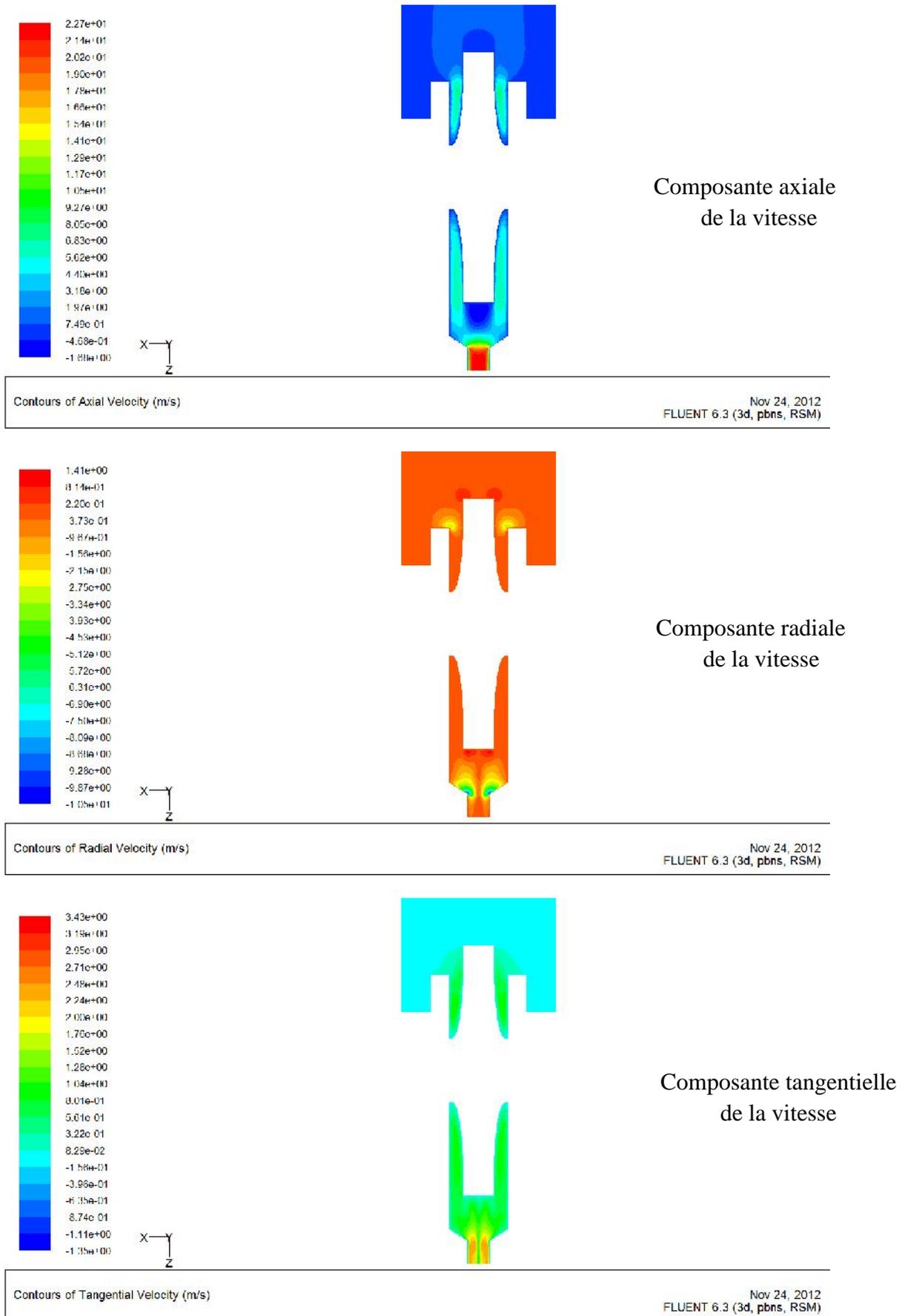
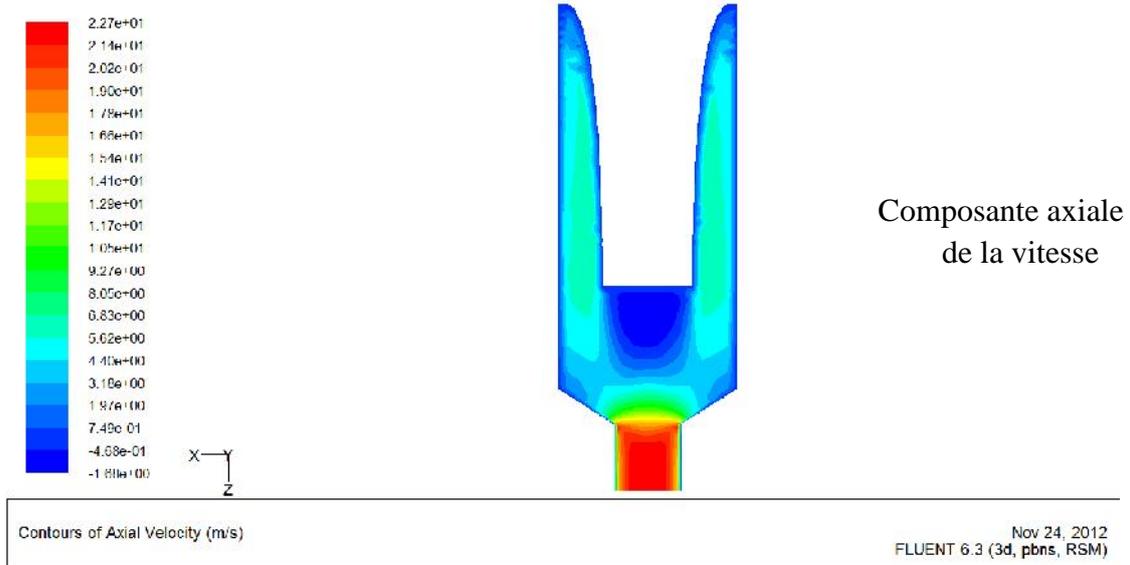
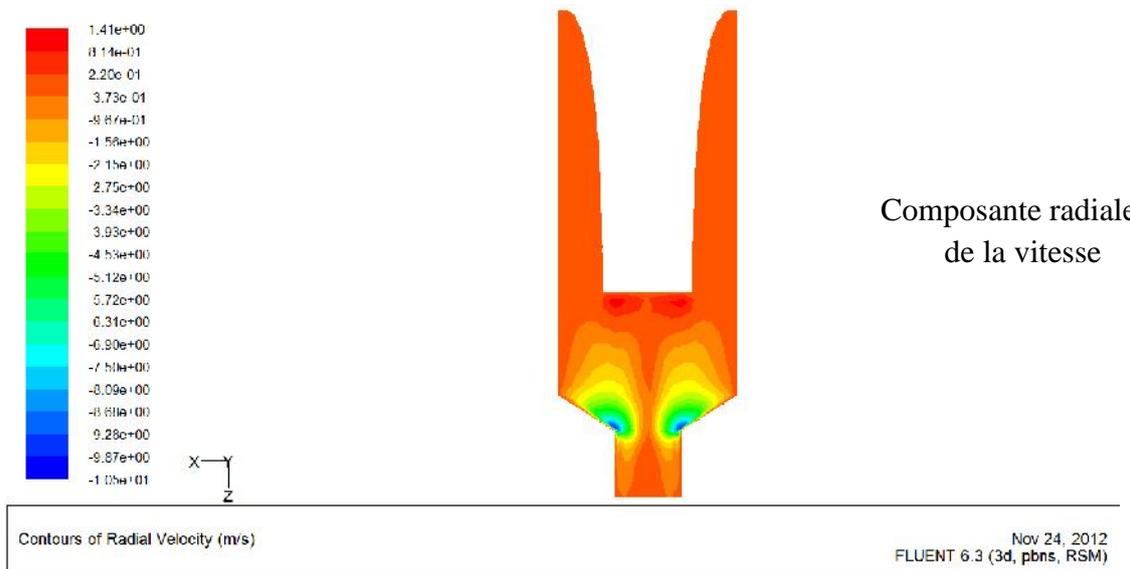


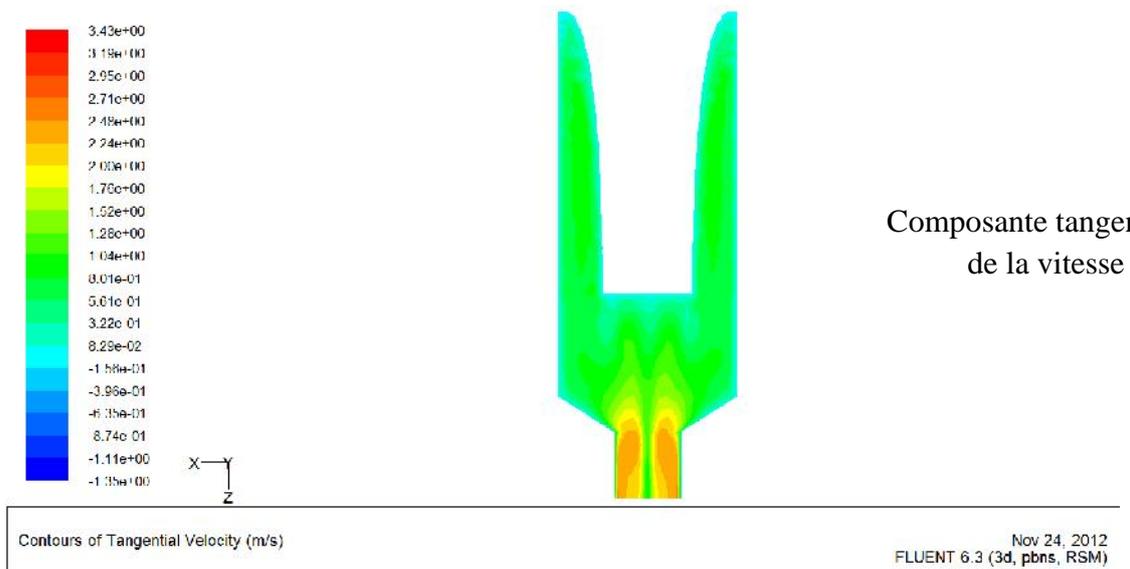
Figure V.13 : Champ des trois composantes de la vitesse : axiale, radiale et tangentielle.



Composante axiale
de la vitesse

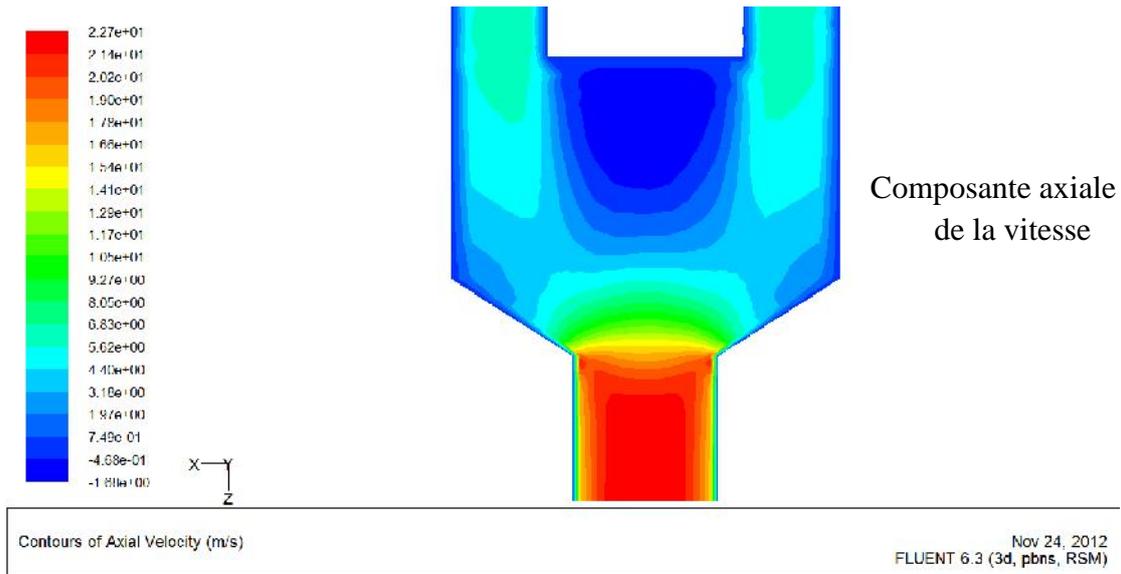


Composante radiale
de la vitesse

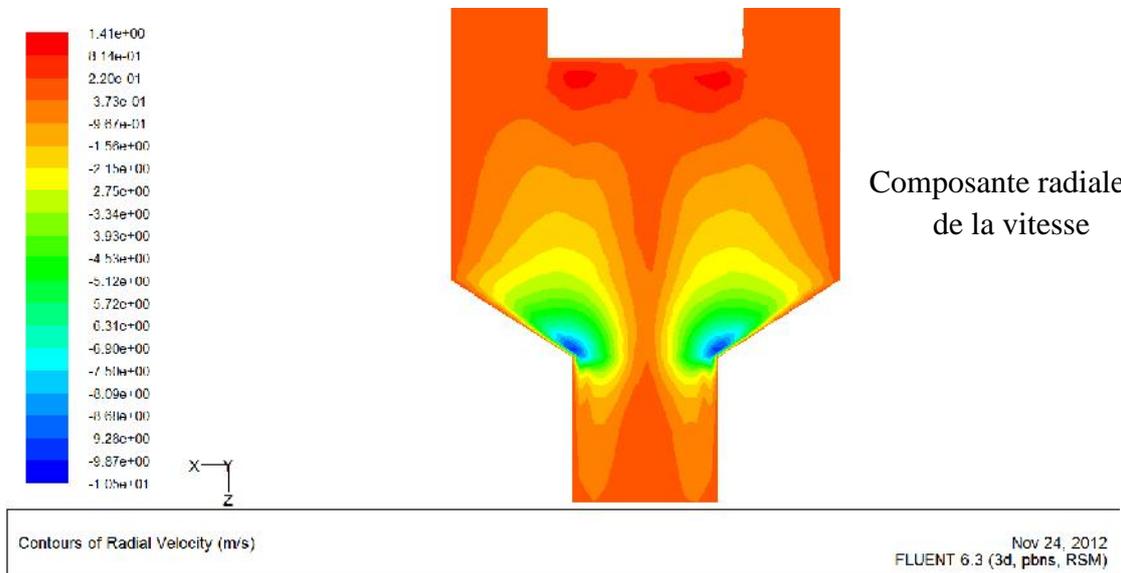


Composante tangentielle
de la vitesse

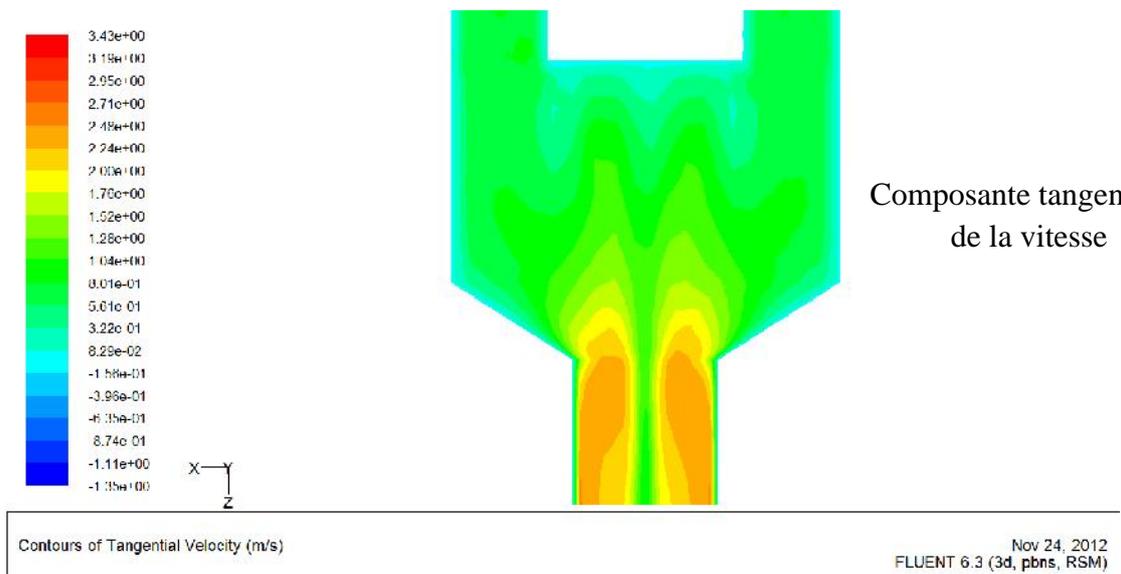
Figure V.13 : Champ des trois composantes de la vitesse : axiale, radiale et tangentielle.



Composante axiale
de la vitesse



Composante radiale
de la vitesse



Composante tangentielle
de la vitesse

Figure V.13 : Champ des trois composantes de la vitesse : axiale, radiale et tangentielle.

- Les résultats montrent qu'à la sortie des rainures l'écoulement subit une décélération axiale et une accélération radiale, cela peut être expliqué par l'inclinaison des lignes de courant du fait de l'orientation vers la section d'entrée du col pour satisfaire la continuité du débit. Le passage à l'intérieur des rainures hélicoïdales font acquérir à l'écoulement une composante tangentielle, cette dernière est traduite par le début de la formation de l'écoulement tourbillonnaire dans cette chambre.
- L'augmentation excessive de la vitesse radiale juste avant l'entrée du col se transforme en vitesse tangentielle très importante à l'intérieur du col. Ce mécanisme est la cause principale de l'aspect tourbillonnaire de l'écoulement vu à la sortie de la buse durant le travail expérimental. La chute de pression au niveau du col fait augmenter la vitesse axiale débutante.

V.2.1.3. Comparaison des trois profils de vitesse à la sortie

Les figures V.14, V.15, V.16 montrent les trois composantes de la vitesse au niveau de la section de sortie de la buse pour les deux pressions 3.8 bar et 2 bar.

Au cours du travail expérimental et d'après la mesure du débit, le fait d'accroître la pression statique de 2.0 bar jusqu'à 3.8 bar par l'installation de deux pompes en série a produit une augmentation du débit d'eau pulvérisé.

Ce constat est bien expliqué sur la figure V.14, qui présente une croissance remarquable de la vitesse axiale ou bien la vitesse débutante.

D'autre coté l'augmentation du débit a provoqué, en plus de l'augmentation de la vitesse axiale, la croissance de la vitesse radiale et tangentielle (fig. V.15 et V.16). Pour le cas de la pression statique égale à 3.8 bar la dépression est plus rapide pour atteindre la pression atmosphérique à la sortie, ce comportement conduit à la formation d'un tourbillon plus fort au niveau du col. Le résultat de ce mécanisme est la production d'un écoulement rotationnel dont les composantes radiales et tangentielles de la vitesse sont très importantes à la sortie.

D'un point de vue analytique et revenant aux résultats expérimentaux tels que ;

- Croissance de la surface couverte par le jet ;
- Diminution remarquable du diamètre des gouttes ;
- Diminution de la dispersion au niveau du centre pour être augmentée sur les cotés ;
- Diminution de la dispersion du fait de l'augmentation de la hauteur du jet.

La structure rotationnelle de l'écoulement à l'intérieur du col, et la détente dans un milieu libre à la pression atmosphérique, constituent un mécanisme réel de la transformation soudaine et rapide de la vitesse tangentielle tourbillonnaire à une vitesse centrifuge radiale à la sortie de la buse.

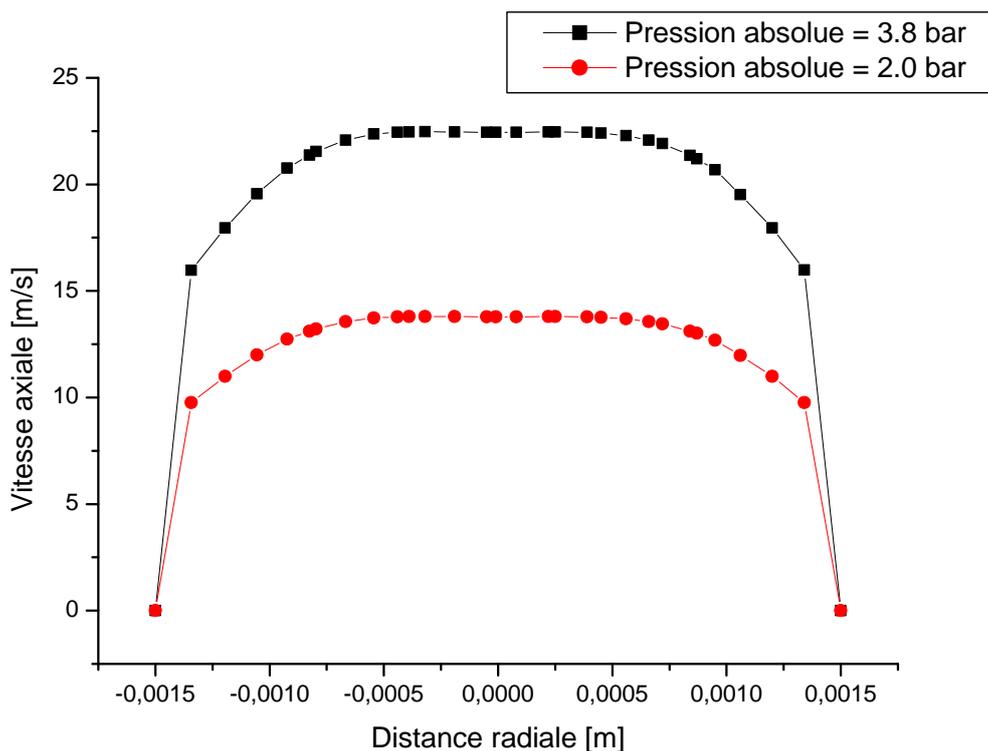


Figure V.14 : Profil de la vitesse axiale à la sortie de la buse.

L'effet de ce comportement qui accroît proportionnellement avec l'augmentation de la pression d'alimentation, tend à susciter la rupture de la continuité liquide du jet (c'est-à-dire la viscosité) à la sortie de la buse. De ce fait, la composante centrifuge multiplie la dispersion radiale de l'eau pour avoir les résultats expérimentaux cités ci-dessus.

A partir de certains travaux relatifs à ce sujet, la croissance de la vitesse axiale influence fortement sur la finesse du jet, la chose qui a été confirmée par la diminution de la taille des gouttes produites de la désintégration du jet.

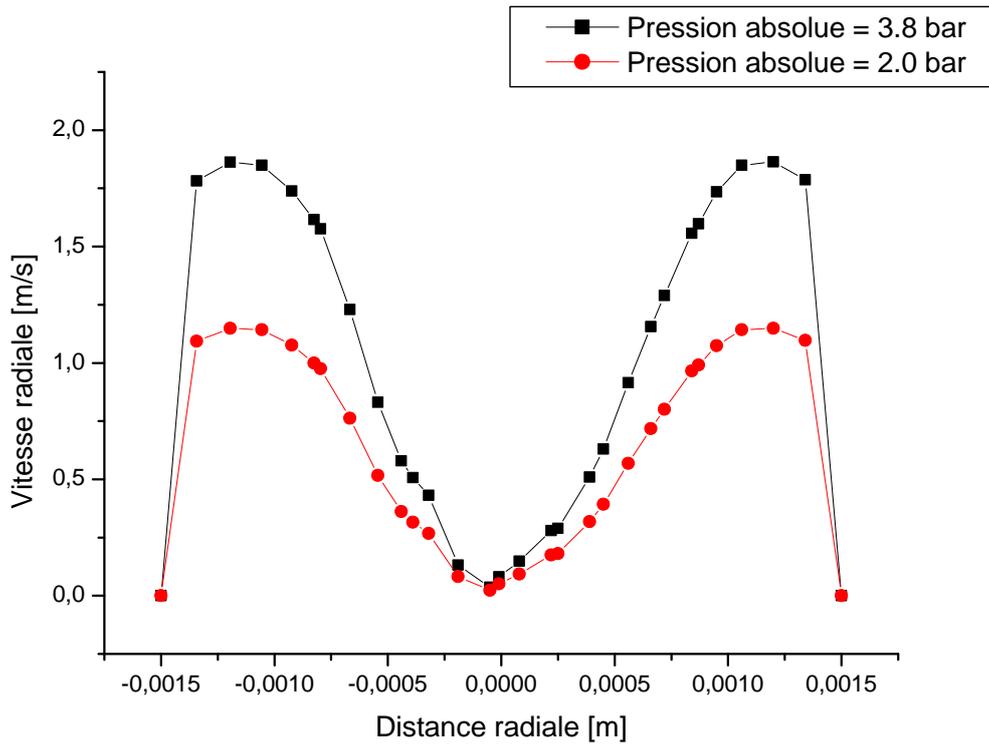


Figure V.15 : Profil de la vitesse radiale à la section de sortie.

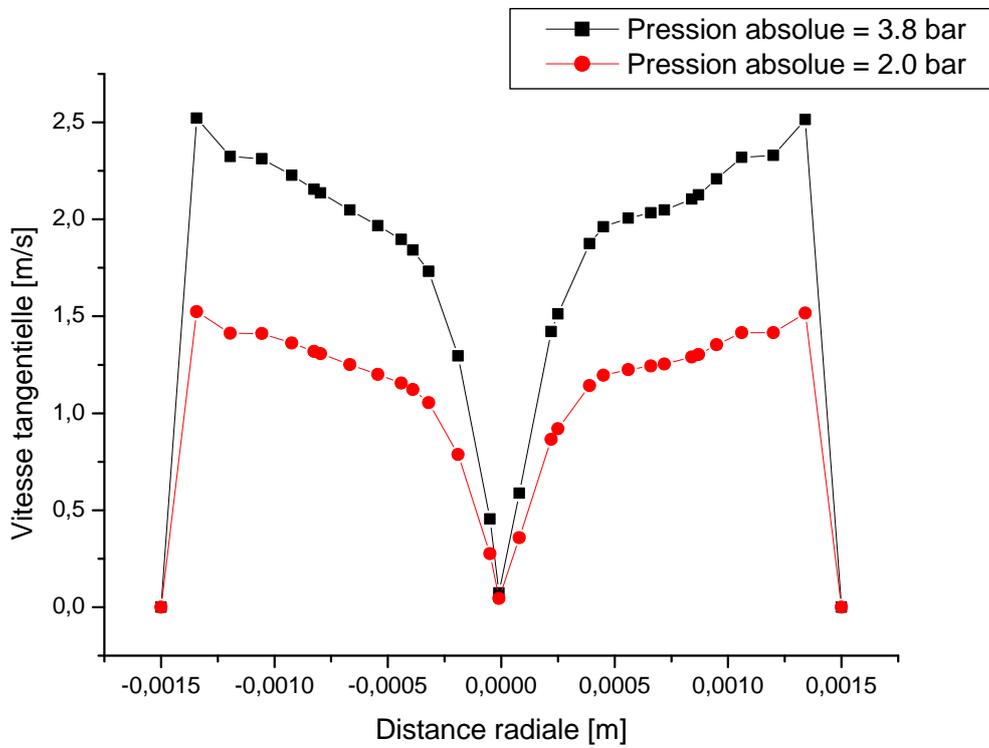


Figure V.16 : Profil de la vitesse tangentielle à la section de sortie.

Conclusion et Perspectives

Conclusion

Moyennant l'effet des différents paramètres, l'analyse hydrodynamique du processus de la pulvérisation de l'eau nous a permis d'expliquer certains phénomènes physiques tels que ; la cavitation et la turbulence à l'intérieur de la buse, ces phénomènes entrent en jeu dans le mécanisme réel de la désintégration du jet.

Au début de nos essais, la désintégration du jet était très difficile à réaliser, cette problématique nous a amené à penser à l'écoulement tourbillonnaire à l'intérieur de la buse. Ce type d'écoulement facilite d'une manière très importante le but souhaité.

D'après les résultats expérimentaux, l'intégration d'une tige hélicoïdale a changé totalement la forme du jet pour être bien pulvérisé sur une surface circulaire de diamètre très important. Cela, nous informe bien sur son rôle majeur pour favoriser un écoulement tourbillonnaire tridimensionnel à l'intérieur de la buse de pulvérisation responsable de ces résultats. Par ce fait, la buse à tige hélicoïdale prend sa place dans les procédés métallurgiques de refroidissement.

L'avantage de l'utilisation d'une tige hélicoïdale avec un choix très convenable des paramètres hydrodynamiques, réside dans l'obtention d'un champ de dispersion uniforme pour tous les points de la plaque, et ça même pour des pressions très élevées, la chose qui était impossible à avoir pour les autres buses de pulvérisation.

Les remarques tirées du présent travail sont :

- En s'éloignant de la buse, la dispersion diminue à cause de l'augmentation du taux de vide traduit par la diminution de la fraction surfacique du liquide ;
- L'augmentation de la pression fait diminuer l'écart en dispersion pour les points avoisinés pour donner une pulvérisation quasi-uniforme ;
- L'augmentation de la pression donne des gouttes de taille très faible, cela est traduit par l'augmentation des forces aérodynamiques du fait de l'augmentation de la vitesse de jet ;
- Pour avoir une pulvérisation symétrique, il faut une bonne qualité d'usinage et de précision ;

L'analyse hydrodynamique des différents résultats a prouvé la distribution de Gauss lors de la dispersion du jet sur la plaque. Par ce comportement, les courbes de dispersion tendent à s'aplatir avec l'augmentation de la pression ou la hauteur, tout en élargissant la surface couverte par le jet.

Pour atteindre la forme de pulvérisation optimale satisfaisant toutes les exigences métallurgiques, il faut une gamme très large des essais avec des formes géométriques très différentes, tant pour la buse que pour la tige hélicoïdale.

La simulation numérique de l'écoulement à l'intérieur de la buse de pulvérisation a servi fortement d'avancer des informations facilitant l'explication du mécanisme réel aboutissant à la désintégration du jet. L'écoulement du caractère rotationnel (composante tangentielle) au niveau du col, se détend à la sortie de la buse dans l'atmosphère pour donner naissance à une composante radiale très importante.

Perspectives

L'élaboration de matériaux fiables suivant les caractéristiques souhaitées exige **un diagnostic thermique bien établi lors du refroidissement par jet d'eau dispersé sous formes de fines gouttelettes des plaques hautement chauffées** [4].: Au cours du traitement thermique des bandes d'aciers, la température subit des variations très rapides, cette cinétique impose des transformations cristallines auxquelles dépendent les propriétés finales [5].

En plus de la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques expérimentales du champ de dispersion pour un tel sprayer, le diagnostic thermique, par le biais de la détermination des courbes de variation de la température de chaque point de la surface en fonction du temps, permet d'estimer le coefficient de convection de chaleur et le flux thermique extrait qui sont étroitement liés à la température dans les conditions de refroidissement industrielles réelles [24]. Enfin, cette stratégie permet une bonne prédiction des propriétés thermiques et mécaniques atteintes.

Les phénomènes physiques d'ébullition accompagnant le refroidissement sous sprayer sont influencés par plusieurs facteurs ; tels que la taille des gouttes, l'angle du jet, l'état de surface du métal, la vitesse d'avancement de la ligne,...etc. L'étude de ces facteurs sert à quantifier l'échange thermique entre le spray et la paroi chaude.

Liste des figures

Figure I.1 :	Schéma descriptif de l'atomisation pneumatique.....	07
Figure I.2 :	Buse de pulvérisation par impact.....	08
Figure I.3 :	Buse à cône plein.....	08
Figure I.4 :	Buse à cône creux.....	09
Figure I.5 :	Buse à jet plat.....	09
Figure I.6 :	Instrument de mesure de la force d'impact.....	10
Figure I.7 :	Processus d'atomisation primaire et secondaire.....	10
Figure I.8 :	Influence de la viscosité sur la désintégration du jet.....	11
Figure I.9 :	Croissance des dépenses d'énergie (la pression) en fonction de la viscosité.....	12
Figure I.10 :	Influence de la croissance de la vitesse de jet.....	12
Figure I.11 :	Mécanisme de l'atomisation secondaire.	13
Figure I.12 :	Apparition de l'atomisation secondaire.....	13
Figure I.13 :	Profil de vitesse des gouttes à différentes hauteurs.....	14
Figure I.14 :	Variation de la vitesse axiale le long du l'axe de jet.....	15
Figure I.15 :	Variation du taux de vide en fonction de la hauteur du jet (H).....	16
Figure I.16 :	Champs de vitesse.....	17
Figure II.1 :	Longueurs caractéristiques du jet : L1 est appelée longueur de surface intacte et L2 longueur de cœur liquide.....	19
Figure II.2 :	Régimes caractéristiques de fractionnement de jet en fonction de la vitesse d'injection.....	22
Figure II.3 :	Classification des régimes de fractionnement d'un jet liquide en fonction de la vitesse d'injection.....	22
Figure II.4 :	Diagramme d'Ohnesorge (régimes de fractionnement).....	23

Liste des figures

Figure II.5 :	Schéma du diagramme incluant l'effet de la masse volumique du milieu gazeux dans le fractionnement des jets.....	24
Figure II.6 :	Fractionnement en sac.....	24
Figure II.7 :	Fractionnement en ligaments.....	25
Figure II.8 :	Fractionnement catastrophique.....	25
Figure II.9 :	Phénomène de turbulence dans les buses.....	25
Figure II.10 :	Sprays obtenus pour le même injecteur et des nombres de Reynolds différents.....	26
Figure II.11 :	Modes de vaporisation d'un liquide, v étant le volume spécifique.....	27
Figure II.12 :	Séparation de la couche limite et zone de recirculation.....	28
Figure II.13 :	Représentation de la cavitation partielle.....	28
Figure II.14 :	Représentation de la super-cavitation.....	28
Figure II.15 :	Changement du profil de vitesse en effet des poches de cavitation.....	29
Figure II.16 :	Dissymétrie causée par la cavitation.....	29
Figure II.17 :	Rétrécissement de la section de passage par cavitation.....	30
Figure III.1 :	Les différents organes du banc d'essai.....	32
Figure III.2 :	Buse utilisée dans le travail.....	33
Figure III.3 :	Effet de l'intégration de la tige hélicoïdale.....	34
Figure III.4 :	Description dimensionnelle de la buse avec la tige hélicoïdale ; buse en demi coupe.....	34
Figure III.5 :	Système de captage et de mesure de la dispersion.....	35
Figure III.6 :	Description des différents composants du système de déplacement.....	36
Figure III.7 :	Installation des trois pompes.....	37
Figure III.8 :	Le manomètre.....	37
Figure IV.1 :	Différents types de mailles.....	42

Liste des figures

Figure IV.2 :	Les conditions de création de la géométrie.....	43
Figure IV.3 :	Schéma descriptif de la géométrie créée sur Gambit.....	44
Figure IV.4 :	Division du volume et génération du maillage.....	45
Figure IV.5 :	Teste d'indépendance du maillage.....	48
Figure V.1:	Champ de dispersion, H = 43 cm.....	52
Figure V.2 :	Champ de dispersion, H = 53 cm.....	52
Figure V.3 :	Champ de dispersion, H = 63 cm.....	53
Figure V.4 :	Champs de dispersion, Pression = 3.8 bar.....	54
Figure V.5 :	Champ de dispersion, Pression = 2.0 bar.....	54
Figure V.6 :	Champ de dispersion, Pression = 0.4 bar.....	55
Figure V.7 :	Variation de l'allure du jet en fonction de la pression.....	56
Figure V.8 :	Les trois composantes de l'écoulement tourbillonnaire.....	57
Figure V.9 :	Action combiné de la force radiale, de l'air et de la viscosité.....	58
Figure V.10 :	Exemples de la fonction de gauss (Loi normale de Gauss)....	59
Figure V.11 :	Variation du volume collecté en fonction de la vitesse d'avancement pour les points passant du centre de jet.....	60
Figure V.12 :	Champs de la pression statique (a), (b).....	62
Figure V.13 :	Champ des trois composantes de la vitesse : axiale, radiale et tangentielle.....	64
Figure V.14 :	Profil de la vitesse axiale à la sortie de la buse.....	69
Figure V.15 :	Profil de la vitesse radiale à la section de sortie.....	70
Figure V.16 :	Profil de la vitesse tangentielle à la section de sortie.....	70

Références bibliographiques

- [01] : Moreau, Jean-Baptiste, Modélisation de l'écoulement polyphasique à l'intérieur et en sortie des injecteurs diesel, Thèse de doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [02] : Baumgarten, Carsten, Mixture formation in internal combustion. Berlin : Springer, 2006.
- [03] : Pierre-Arnaud Beau, Modélisation de l'atomisation d'un jet liquide application aux sprays diesel. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 2007.
- [04] : Hocine M'ZAID, Etude hydrodynamique et thermique lors du refroidissement sous spray d'une surface à haute température, Thèse de doctorat, USTO-MB, Algérie, 2004.
- [05] : Ines Ben Naceur, Mounir Kchaou, Hatem Ksibi, Optimisation de la trempe par jet d'eau impactant des pièces en aciers, Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Sfax (IPEIS), Unité de Mécanique, Modélisation et Production (U2MP) ENIS, 2ème Congrès International CIM, 2010.
- [06] : Magali DE LUCA, Contribution à la modélisation de la pulvérisation d'un liquide phytosanitaire en vue de réduire les pollutions, Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, 2007.
- [07] : Chun Liu, M.S, Modeling of water and lubricant sprays in hot metal working, Ohio State University, 2007
- [08] : C. BEKDEMIR, Numerical Modeling of Diesel Spray Formation and Combustion, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, Conference de combustion, 2009.
- [09] : Nicolas Dumont, Modélisation de l'écoulement diphasique dans les injecteurs Diesel, Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [10] : Marie LALO, Atomisation d'un film liquide mince par action combinée des instabilités de Kelvin-Helmholtz et de Faraday, Application aux injecteurs aérodynamiques des turbomachines aéronautiques, Thèse de doctorat, Grenoble, 2006.

- [11] : KADEM Naima, Atomisation du jet d'un Canon d'irrigation : Modélisation eulérienne et validation, Thèse de doctorat, Université de la méditerrané Aix-Marseille II, 2005.
- [12] : Fabien JOUOT, Étude de la détonation dans un jet diphasique cryogénique GH₂-LO_x : Contribution aux études sur les moteurs à onde de détonation, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2009.
- [13] : Anthony COLLIN, Simulation du transfert de chaleur au sein de pulvérisations gaz-gouttelettes soumises à une intense source radiative, Projet de fin d'étude d'ingénieur, Université Henri Poincaré, 2003.
- [14] : TECSI (industrie spécialisé dans les technologies de pulvérisation), NOZZLES DIVISION, Catalogue révision.
- [15] : LECHLER (industrie spécialisé dans les technologies de pulvérisation), buses à cône plein.
- [16] : Anthony COLLIN, Transferts de chaleur couplés rayonnement -conduction-convection application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy1, 2006.
- [17] : Jérôme Godelle, Analyse non linéaire de dynamiques des jets liquides cylindriques, Thèse de doctorat, Université de paris VII, 1999.
- [18] : Christophe Dumouchel, Module : Mises en application ; Atomisation et sprays-Injection de carburant, Université de Rouen, Master EFE, 2009-2010.
- [19] : LECHLER (industrie spécialisé dans les technologies de pulvérisation), Buses et systèmes de pulvérisation pour l'industrie métallurgique.
- [20] : N. KHAROUA, K. TALBI, Z. NEMOUCHI, M. S. BOULAHLIB, Effet du maillage et des schémas de discrétisation sur les résultats de simulation de l'écoulement dans un cyclone dépoussiéreur, Sciences & Technologie A-N°26, Décembre. (2007), pp. 17-26.
- [21] : CHIBANE Nouara, Modélisation numérique d'un jet diphasique en présence d'un obstacle, Mémoire de magister, Université M'Hamed BOUGARA Boumerdes, 2008.
- [22] : ZEGHBID Ilhem, Simulation numérique en régime turbulent de l'influence du débit et du champ thermique dans un cyclone, Mémoire de magister, Université MENTOURI Constantine, 2009.
- [23] : D. FEDALA, Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent-Application, Octobre 2007.

- [24] : Daniel DURAND, Serge TCHERNIAEFF, Pascal LAMESLE, Pascal CHEVRE, Maîtrise des tapures par contrôle du refroidissement en durcissement superficiel inductif, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, Laboratoire Matériaux Endommagement Fiabilité et Ingénierie des Procédés (LAMEFIP), Bordeaux 2006.