

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة وهران للعلوم و التكنولوجيا مُجَد بوضياف



THÈSE En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat

Présenté par : ELMAHI Abdelbaki

Intitulé Etude hydrodynamique d'un film sur une plaque horizontale-Application dans les systèmes de refroidissement

Faculté	: Génie Mécanique
Département	: Génie Mécanique
Domaine	: Science & Technologie
Filière	: Génie Mécanique
Intitulé de la Formation	: Installations Industrielles & Environnement

Devant le Jury Composé de :

Membres de Jury	Grade	Qualité	Domiciliation
BENZEGUIR Redouane	Prof.	Président	USTO-MB
TEBBAL Mohamed	Prof.	Directeur de thèse	USTO-MB
BAKI Touhami	MCA	Co-directeur de thèse	USTO-MB
ARIS Abdelkader	Prof.	Examinateur	ENPO-MA
SAHEL Djamel	МСА	Examinateur	U. A. T. Laghouat

Année Universitaire : 2022-2023

<u>Dédicaces</u>

Je dédie ce travail a : À mes parents, À ma femme et ma fille, À mes frères et sœurs, À mes amis sans exception, A tout ma famille, À toute personne que j'aime,

À tous ceux quí me sont chers.

Mr. ELMAHI Abdelbakí.

<u>Remercíements</u>

Je remercie mon Dieu « El Kadir », mes chers parents et mon épouse qui m'ont toujours encouragé et donné la volonté et la patience d'accomplir ce travail.

Je tiens à remercie au fond du cœur mon directeur de thèse, Pr. TEBBAL Mohamed, pour la confiance qu'il m a accordée, son aide, ses conseils, ses orientations et ses encouragements.

J'adresse mes remerciements à mon Co-directeur de thèse, Dr. BAKI Touhami, pour la confiance et l'aide qu'il m'a généreusement données, pour sa présence constante, et sa disponibilité.

Je veux remercie chaleureusement, Pr. BENZEGUIR Redouane pour pris l'intérêt de cette thèse et acceptée a témoignée ma soutenance. Mes sincères remerciements au Pr. ARIS Abdelkader, Dr. SAHEL Djamel, d'avoir pris le temps de lire ce mémoire, et pour leur accords pour l'examiner.

Je remercie tous les enseignants qui m'ont enseigné durant les années d'études, chacun par son nom.

Mon remerciement à toute personne m'ayant soutenu pour accomplir cette thèse.

Résumé

L'optimisation des systèmes de refroidissement est d'une importance capitale du fait de l'économie en eau du milieu refroidissant et en énergie dans les installations thermiques en industrie ; L'étude hydrodynamique du film est une condition préalable à l'étude de l'intensité du transfert thermique lors du refroidissement d'une plaque horizontale par un film liquide. Ce travail expérimental a permis de quantifier les paramètres hydrodynamiques par une nouvelle approche, une relation liant l'épaisseur du film à la vitesse a été trouvée en fonction des caractéristiques géométriques et hydrodynamiques du sprayer.

Une nouvelle approche statistique a été développée pour mesurer la vitesse, le liquide arrivant au bord de la plaque et ayant la vitesse V est déversé comme un projectile. La récupération du liquide dans les tubes nous a permis de quantifier les débits pour différentes positions de hauteurs par rapport à la plaque, le traitement statistique nous a permis d'évaluer la vitesse probable avec une marge d'erreur.

Mots-clés: Sprayers, Film liquide, Expérience, Méthode projectile, Loi normale.

Abstract

Optimization of cooling systems is of major importance due to the economy of cooling water and energy in thermal installations in the industry. The hydrodynamic study of the film is a prerequisite for the study of the intensity of the heat transfer during the cooling of a horizontal plate by a liquid film. This experimental work made it possible to quantify the hydrodynamic parameters by a new approach, a relation linking the thickness of the film to the velocity was found as a function of the geometrical and hydrodynamic characteristics of the sprayer.

A new statistical approach has been developed for the measurement of the velocity, the liquid fluid arriving at the edge of the plate and having velocity V is spilled out like a projectile. The recovering of the liquid in tubes allowed us to quantify flow rates for different heights positions relative to the plate, statistical processing permitted us to assess the probable velocity with a margin of error.

Key-words: Sprayer, Liquid film, Experiment, Projectile method, normal law.

ملخص:

يعد تحسين أنظمة التبريد ذا أهمية كبيرة نظرًا لاقتصاد مياه التبريد والطاقة في التركيبات الحرارية في الصناعة. تعتبر الدراسة الهيدروديناميكية للغشاء المائي شرطًا أساسيًا لدراسة شدة انتقال الحرارة أثناء تبريد صفيحة أفقية بواسطة غشاء مائي سائل. جعل هذا العمل التجريبي من الممكن قياس المعلمات الهيدروديناميكية من خلال نهج جديد، تم العثور على علاقة تربط سمك الغشاء المائي بالسرعة بالنسبة للخصائص الهندسية و الهيدروديناميكية للرش.

تم تطوير نهج إحصائي جديد لقياس السرعة، حيث يصل السائل إلى حافة اللوحة وسرعته √ لينطلق مثل القذيفة. سمح لنا استرداد السائل في الأنابيب بتحديد معدلات التدفق لارتفاعات مختلفة بالنسبة إلى اللوحة ، وقد سمحت لنا المعالجة الإحصائية بتقييم السرعة المحتملة بهامش خطأ.

الكلمات المفتاحية: بخاخ الرش، الغشاء المائي، التجربة، طريقة القذيفة، القانون العادي.

Sommaire

Nomenclature	Ι
Liste des figures	III
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1
Chapitre 1	
Analyse du transfert thermique en milieu diphasique	
1 Introduction	3
1.1 Généralités sur les écoulements diphasiques	3
1.1.1 Les configurations d'écoulement	3
1.1.2 Régimes d'écoulements	4
1.1.3 Ecoulement diphasique avec ou sans changement de phase	5
1.2 Phénomène de l'ébullition	6
1.2.1 Classification de l'ébullition	7
1.2.2 Ebullition en vase	7
1.2.3 Régimes et courbe d'ébullition (courbe de Nukiyama)	7
1.2.4 Ébullition convective	10
1.3 Phénomène de la condensation	11
1.3.1 Classification de la condensation	11
1.3.2 La condensation en film	13
1.3.3 Modèle analytique de Nusselt	15
1.3.4 Plaques inclinées	18
1.3.5 Tubes verticaux	19
1.3.6 Tubes et sphères horizontaux	19
1.3.7 Faisceau de tubes horizontal	19
1.3.8 Condensation du film à l'intérieur des tubes horizontaux	20
1.3.9 Condensation de vapeur en présence de gaz non condensables	21
1.3.10 La condensation en goutte	22
1.4 Les pulvérisateurs liquides et les buses de pulvérisation	23
1.4.1 La pulvérisation liquide	23
1.4.2 Les buses de pulvérisation	24
1.4.3 Les différents types des buses de pulvérisations	25
1.4.3.1 Les buses de pression	25
1.4.3.2 Les buses de turbulence	25
1.4.3.3 Les buses d'impact	26
1.4.3.4 Les atomiseurs pneumatiques	26
1.5 Etude du film liquide	30
1.6 Les modèles classiques	30
1.6.1 Epaisseur de film constant et le profil de vitesse	30
1.6.2 Epaisseur de film variable	31
1.7 Laminoirs à chaud et à froid	32
1.7.1 Description du processus	32

1.7.1.1 Laminage à chaud	33
1.7.1.2 Table de sortie	34
1.7.1.3 Décapage, réduction à froid, galvanisation et revêtement	36

Chapitre 2

Analyse bibliographique

2. Introduction	38
2.1 Travaux expérimentaux	39
2.1.1 Epaisseur du film	39
2.1.2 Mesure de vitesse et le profil de vitesse	42
2.2 Analyse des techniques de mesure expérimentales du film liquide	46
2.2.1 Les techniques acoustiques	47
2.2.2 Les techniques électriques	47
2.2.3 Les techniques optiques	56
2.2.3.1 La méthode de détection d'Interface	56
2.2.3.2 La méthode de variation d'intensité lumineuse	58
2.2.3.3 La méthode de réflexion totale de la lumière	60
2.2.3.4 La méthode basée sur les ombres laser à faisceau	63
2.2.3.5 La méthode basée sur la diffusion de faisceau laser	64
2.2.3.6 La méthode d'intensité de fluorescence	64
2.2.3.7 La méthode de Laser Focus Displacement	66
2.2.3.8 La méthode d'interférométrie	69

Chapitre 3

Détermination des paramètres hydrodynamiques par la méthode de la trajectoire

3.1 Etude corrélative d'un film liquide sur une plaque inclinée	70
3.1.1 Etat de l'art des corrélations empiriques	70
3.1.2 Corrélations retenues	71
3.1.3 Analyse des données expérimentales	72
3.1.4 Comparaison des corrélations	74
3.1.5 Elaboration d'une nouvelle corrélation	77
3.1.6 Conclusion	78
3.2 Etude expérimentale d'un film liquide hors impact du jet	79
3.2.1 Dispositif expérimental	79
3.2.2 Résultats et discussions	83
3.2.2.1 Présentation de la méthode projectile	83
3.2.2.2 L'analyse des données	83
3.2.2.3 Modélisation des caractéristiques du film	85
3.2.2.4. Calcul de l'épaisseur du film	87
3.2.3 Conclusion	88
3.3. Simulation du refroidissement d'une plaque hautement chauffée par film liquide	89

3.3.1. Choix du domaine de simulation	89
3.3.2. Simulation thermique	90
3.3.3. Maillage du domaine	90
3.3.4. Conditions aux limites	92
3.3.5. Conditions aux limites appliquées	93
3.3.6. Représentation des résultats	94
3.3.7. Discussions des résultats obtenus	102
3.3.8. Conclusion	103
Conclusion générale	104
Bibliographie	105

Nomenclature

<u>Symbole</u>	Désignation	Unité SI
а	Grand diamètre de l'ouverture du pulvérisation	mm
b	Petit diamètre de l'ouverture du pulvérisation	mm
С	Epaisseur inférieur du pulvérisateur	mm
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
<i>g</i> ′	La dispersion du fluide	$mm^3/mm^2.s$
Н	Hauteur entre la buse et la surface mouillée	mm
h	Profondeur de la fente du pulvérisateur	mm
h_a	Coefficient de l'air ambiant	$W/m^2.K$
h_D	Coefficient de convection diphasique à la surface	$W/m^2.K$
K_1	Paramètre statistique hydrodynamique	$Kg/m^2.s$
K_2	Paramètre statistique géométrique	mm
L	Distance entre la limite de l'éllipse et la frontière de la plaque	mm
ΔP	Variation de pression	MPa
Q_{v}	Débit volumique	m^3/s
R	Rayon interne du canal de pulvérisation	mm
r	Paramètre géométrique	mm
S	La section de l'ouverture du pulvérisateur	mm^2
T_p	Température de la paroi	Κ
$T_{\acute{e}bu}$	Température d'ébullition	Κ
q	Flux de chaleur	W/m^2
q_0	Flux de chaleur initial	W/m^2
t	Temps	S
V_0	La vitesse initiale du film liquide quand il quitte la plaque	m/s
V	La vitesse du film liquide	m/s
Symbole grecques	Désignation	Unité SI
arphi	Angle d'ouverture du pulvérisateur	deg
δ	Epaisseur du film liquide	mm
ρ	Masse volumique	Kg/m^3

μ	La moyenne de la courbe	Sans
σ	Ecart type de la courbe	Sans
σ_x	Variance de l'axe x	Sans
σ_y	Variance de l'axe y	Sans
ξ	Geometrical parameter ($\xi = h - c/2R$)	Sans
Indices	Désignation	Unité SI

mates	Designation	
max	Maximum	Sans
conv	Convection	Sans
rad	Radiation	Sans

Liste des figures

Figure	Désignation	Page
Fig. 1.1	Représentation schématique des différentes topologies d'écoulement	4
Fig. 1.2	Représentation schématique de différents Régimes d'écoulements	5
Fig. 1.3	Modèle de configuration des écoulements co-courants Eau-Air dans une conduite vertical	5
Fig. 1.4	Régimes d'écoulement des fluides et de transfert de chaleur	6
Fig. 1.5	Courbe de l'ébullition	8
Fig. 1.6	Divers régimes d'ébullition du méthanol sur un tube horizontal	10
Fig. 1.7	Ebullition dans un tube vertical	10
Fig. 1.8	Condensation formant des liquides immiscibles	13
Fig. 1.9	Condensation en film sur une plaque vertical	14
Fig. 1.10	Régimes d'écoulement pendant la condensation du film sur une plaque vertical	15
Fig. 1.11	L'élément volumique du condensat sur une plaque verticale considéré dans l'analyse de Nusselt	16
Fig. 1.12	Film de condensation sur une plaque inclinée	19
Fig. 1.13	Film de condensation sur un niveau vertical de tubes horizontaux	20
Fig. 1.14	L'écoulement de condensat dans un tube horizontal à grande vitesse de vapeur	20
Fig. 1.15	La présence des gaz non condensables dans la condensation à vapeur	22
Fig 1 16	La condensation en gouttelettes de la vapeur dans une surface verticale	22
Fig. 1.17	Buse à jet plat	25
Fig. 1.18	Buse à turbulence	26
Fig. 1.19	Buse de pulvérisation par impact	26
Fig. 1.20	Schéma descriptif de l'atomisation pneumatique	27
Fig. 1.21	Buse à cône plein	28
Fig. 1.22	Buse à cône Creux	29
Fig. 1.23	Buse à jet plat	29
Fig. 1.24	Schéma du processus de laminage à chaud	33
Fig. 1.25	Positions des systèmes atomiseurs pulvérisant les rouleaux de travail	34
Fig. 1.26	Tables de sortie avec les bancs de refroidissement (a) et les buses de pulvérisation	35
Fig. 1.27	Tourneur typique à 90 degrés (a) dans un laminoir à froid continu (b)	36
Fig. 2.1	Variation de l'épaisseur de film le long de la conduite d'étude pour une solution d'eau-	44
Fig 22	Construction de la sonde de calibration	49
Fig. 2.2	Signal de la sonde d'épaisseur et la sonde de calibration à deux distances différentes	50
Fig. 2.5	Vue schématique de la sonde de mesure d'énaisseur de film liquide	52
Fig. 2.4	Pointe de la conde à fil	53
Fig. 2.6	Vue latérale du disque rotatif	53
Eia 27	Électrodes circulaires en leiten intégrées à le surface du disque en Dereney	53
Fig. 2.7	Lu schéme d'une conde d'éneisseur de film individuelle	54
Fig. 2.0		55
Fig. 2.9	Un exemple de variation de l'epaisseur de film en fonction du temps	55
F1g. 2.10	Schéma de la configuration optique	50
Fig. 2.11	Schéma de la configuration de mesure de l'épaisseur du film	57
Fig. 2.12	Schéma de la configuration optique utilisée pour les mesures d'épaisseur de film	58
Fig. 2.13	Dispositif expérimental de la technique de mesure	59
Fig. 2.14	Technique de mesure de l'épaisseur du film	60
Fig. 2.15	La disposition des capteurs utilisés pour mesurer la vitesse des ondes	60
Fig. 2.16	Schéma des composants du système de mesure de l'épaisseur du film	61
Fig. 2.17	Dispositif de mesure d'épaisseur de film	62
Fig. 2.18	Colonne de lumière diffusée produite par le faisceau laser	63

Fig. 2.19	Dispositif expérimental de la méthode de mesure	64
Fig. 2.20	Schéma de l'appareil de mesure Laser Focus Displacement	66
Fig. 2.21	Diagramme schématique de l'installation expérimentale	67
Fig. 2.22	Schéma du dispositif expérimental	69
Fig. 2.23	La variation du film liquide en fonction du nombre de Reynolds	69
Fig. 3.1	Les graphes représentatifs des données expérimentales récupérées de l'épaisseur en fonction du nombre de Reynolds	74
Fig. 3.2	Evaluation des corrélations avec les données expérimentales	76
Fig. 3.3	Représentation graphique des données expérimentales en fonction du Re	77
Fig. 3.4	Validation de la nouvelle corrélation avec les données	78
Fig. 3.5	Schéma du dispositif expérimental	80
Fig. 3.6	Schéma montrant la zone d'étude	81
Fig. 3.7	Positionnement de la batterie de collecte	82
Fig. 3.8	Batterie des tubes	82
Fig. 3.9	Données expérimentales pour différentes valeurs de Y	84
Fig. 3.10	Comportement de la vitesse en fonction du débit	85
Fig. 3.11	La fonction de densité de la probabilité de la vitesse	86
Fig. 3.12	La fonction de répartition du débit en fonction de la vitesse	86
Fig. 3.13	Relation entre le débit volumique et l'épaisseur du film	88
Fig. 3.14	Représentation tridimensionnelle de la plaque	90
Fig. 3.15	Représentation tridimensionnelle du maillage	92
Fig. 3.16	État initial de la plaque à sa sortie du four métallurgique à une température de 1100°C	94
Fig. 3.17	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température A- Après 5 secondes, B-Après 10 secondes	95
Fig. 3.18	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 15 secondes	96
Fig. 3.19	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 20 secondes	96
Fig. 3.20	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 25 secondes	96
Fig. 3.21	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 30 secondes	97
Fig. 3.22	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 40 secondes	97
Fig. 3.23	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 50 secondes	97
Fig. 3.24	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 60 secondes	98
Fig. 3.25	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 70 secondes	98
Fig. 3.26	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 80 secondes	98
Fig. 3.27	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 100 secondes	99
Fig. 3.28	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 120 secondes	99
Fig. 3.29	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 130 secondes	99
Fig. 3.30	Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 135 secondes	100
Fig. 3.31	Variation de la température pour un épaisseur de la plaque $\delta = 0.020$ m. $\Delta P=0.32$ MPa, $h_D=10614.917$ w/m ² .K	101
Fig. 3.32	Variation de la température pour différents épaisseurs de la plaque. $\Delta P=0.32$ MPa, $h_D=10614.917$ w/m ² .K	101

Liste des tableaux

Liste	Désignation	Page
Tableau 3.1	Corrélation de prédiction de l'épaisseur du film liquide	71
Tableau 3.2	Données recueillies de la littérature	72
Tableau 3.3	Les paramètres géométriques du sprayer utilisé	82
Tableau 3.4	Propriétés thermo physiques de la plaque	91
Tableau 3.5	Propriétés thermo physiques du fluide de travail	91
Tableau 3.6	Représente la dispersion maximale dans la zone d'impact en fonction des paramètres géométrique et hydrodynamique de spraver.	94
Tableau 3.7	Représentation des conditions aux limites	94

Introduction

Chaque jour la demande en énergie augmente de plus en plus, et touche tous les aspects de la vie humaine. L'utilisation intelligente de l'énergie disponible est la réponse à cette demande. Récemment, le sujet le plus populaire de la recherche est l'utilisation de cette énergie pour optimiser les procédés industriels. L'étude hydrodynamique des films liquides à une importance indéniable. L'application des films liquides se trouve dans divers domaines tels que la mécanique des fluides et les transferts thermiques, avec des approches à la fois théoriques, expérimentales et numériques ; elle se trouve aussi dans le domaine industriel qui apporte un certain nombre d'exigences. Les films d'eau ont un fort intérêt dans les problématiques de refroidissement des tôles hautement chauffées. Dans ce contexte sidérurgique, le mode de refroidissement affecte particulièrement les caractéristiques mécaniques des plaques refroidies, donc une maitrise des lois de l'hydrodynamique du film liquide est fondamentale. Le but de ce travail est d'étudier le comportement hydrodynamique du film liquide, en déterminant principalement sa vitesse et son épaisseur lors de son écoulement sur une plaque horizontale, qui se forme en dehors de la zone du jet impactant, utilisant une approche de la trajectoire du film. Il est évident que l'un des facteurs déterminant l'intensité du transfert thermique lors du refroidissement des plaques hautement chauffées sous sprayer et hors la zone impactée par le jet s'avère la détermination et la quantification de la vitesse et l'épaisseur du film liquide qui s'écoule dans cette même zone.

Un montage expérimental nous a permis de tracer le profil des vitesses du film liquide à la limite de la plaque horizontale, par un traitement statistique nous avons lié le profil des vitesses au débit ; en utilisant les corrélations de la littérature paramétrant le jet impactant une plaque horizontale, nous avons établi à une relation liant l'épaisseur du film aux caractéristiques géométriques et hydrodynamiques du sprayer.

Notre travail de thèse s'articule autour de trois chapitres ; dans le chapitre 1 nous présentons une partie théorique et analysons tous les problèmes du milieu diphasique tels que l'ébullition et en particulier la condensation dans sa globalité, l'étude du film liquide et leurs applications dans le domaine industriel.

Dans le chapitre 2, on présente tout d'abord une analyse bibliographique des principaux travaux concernant l'hydrodynamique de l'écoulement du film liquide, et les différentes techniques expérimentales de mesure de la vitesse et l'épaisseur du film liquide.

On présente dans le chapitre 3, trois axes d'études, en premier lieu une étude corrélative des écoulements de films liquides sur une plaque a été faite, des données expérimentales ont été tirées de la littérature ainsi que des corrélations connues, nous avons alors comparés les données expérimentales aux données trouvées avec les corrélations ; une corrélation donnant

l'épaisseur du film en fonction du nombre de Reynolds et des paramètres hydrodynamiques a été ensuite mise au point donnant des résultats satisfaisants.

En second lieu, une procédure expérimentale a été utilisée avec un banc d'essais, des résultats ont été obtenus avec une présentation de la méthode projectile ainsi que le regroupement des données expérimentales, la projection des gouttelettes d'eau qui forment le film liquide en dehors de la zone du jet a été lié aux différentes données hydrodynamiques et des présentations graphiques ont été faites. On a montré expérimentalement que la distribution du film liquide obéit à la loi normale de GAUSS, et les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphes.

En troisième lieu une simulation d'une plaque hautement chauffée et refroidit par un film liquide a été présentée, montrant la distribution de la température à l'intérieur de la plaque et la variation de la température en fonction du temps.

En conclusion,

- 1. Une étude corrélative nous a permis de trouver une nouvelle corrélation liant l'épaisseur du film aux paramètres hydrodynamiques du film.
- 2. La nouveauté de nos résultats est l'utilisation d'une nouvelle approche, qui nous a permis de mesurer les caractéristiques hydrodynamiques du film liquide.
- On affirme que le profil de la vitesse de l'écoulement du film au bord de la plaque obéit à la loi normale.
- 4. Les paramètres hydrodynamiques ont un impact sur l'épaisseur du film liquide.
- 5. L'épaisseur du film a été déterminée en fonction des paramètres géométriques de sprayer et des paramètres hydrodynamiques.
- L'étude numérique nous a permis de suivre l'évolution de la température en fonction du temps d'une plaque hautement chauffée et refroidit par un film liquide sur une face.

1. Introduction

Le développement récent dans le domaine industriel tels que les transformations des matières à exigé des informations plus détaillées sur le refroidissement, pour dissiper des flux de chaleur plus élevés. L'extraction des flux de chaleur est faite de plusieurs et différentes techniques selon les besoins, on note un jet d'eau impactant une surface hautement chauffée, l'utilisation des spray de refroidissement. Dans le domaine de la sidérurgie où les plaques d'acier sont chauffées à des températures supérieures à 700°C, la technique la plus utilisée est le refroidissement par spray, afin de garantir un refroidissement plus rapide avec une extraction de flux de chaleur plus importante. Le refroidissement efficace permet d'obtenir une qualité meilleure des métaux et aciers, et cela dépend de la vitesse de refroidissement, du flux de chaleur ainsi qu'une bonne homogénéité du refroidissement avec un minimum possible de dépense d'énergie et de ressource en eau.

On montre dans le chapitre de cette thèse, une revue générale sur le transfert thermique en milieu diphasique, on s'intéresse au phénomène de transfert de chaleur lors du changement de phase, à savoir l'ébullition et essentiellement la condensation dans sa globalité, ces modes de transferts de chaleur on fait l'objet d'un grand nombre d'études.

1.1 Généralités sur les écoulements diphasiques

Les écoulements diphasiques réunissent deux phases, qu'elles se rapportent ou non au même constituant. Par exemple un écoulement liquide à bulle dans une conduite horizontale.

1.1.1 Les configurations d'écoulement

On peut classer les écoulements diphasiques, selon les phases existantes et la distribution spatiale des interfaces comme le montre la Figure 1.1 ci-dessous:

• Phases séparées



Écoulement à phases séparées (a)

• Phases dispersées



Écoulement à phases dispersées (b)

• Phases mixtes



Écoulement mixte (c)

Fig. 1.1. Représentation schématique des différentes topologies d'écoulement: Phases séparées (a), Phases dispersées (b) et Mixtes (c) [1].

Les formes d'écoulements sont basées sur la nature des interfaces appelée "régimes d'écoulements", et qu'on peut prédire avec des cartes d'écoulement.

1.1.2 Régimes d'écoulements

On distingue trois régimes principaux illustré dans la Figure 1.2, lors d'un écoulement diphasique gaz-liquide ou la phase continue est liquide.

a) Régime à bulles

Le gaz se trouve sous forme de bulles dispersées dans le liquide, lorsque le taux de vide est faible. Les tailles de ces bulles sont petites en comparaison avec le diamètre de la conduite (pas d'interaction). Pour des faibles vitesses de gaz ce régime s'apparaître pas.

b) Régime à poches ou bouchon

Les bulles coalescent et forment de plus grosses bulles lorsqu'on augment le débit du gaz. Quand la dimension de celles-ci s'approche de la section de la conduite, les grosses bulles appelées "bouchons" s'allongent et prennent une forme plate à la base et courbée au sommet. Les passages successifs de ces bouchons entrecoupés caractérisent l'écoulement de liquide contenant de plus petites bulles. Les bouchons seront détruits si on augmente encore le débit du gaz, et il se forme des poches qui sont un écoulement instable de transition vers l'écoulement annulaire.

c) Régime annulaire

Le gaz occupe le centre de la conduite et circule à grande vitesse et provoque la formation d'un film liquide le long de la paroi, lorsque le taux de vide est très important ; l'écoulement est dit annulaire dispersé, et lorsqu'une partie non négligeable du liquide se trouve sous forme de gouttelettes en suspension dans le cœur de vapeur, à des conditions imposées.



ire (d) Régime annulaire dispersé

Fig. 1.2. Représentation schématique de différents Régimes d'écoulements [1].

1.1.3 Ecoulement diphasique avec ou sans changement de phase

Selon les conditions d'écoulement, on peut classer les écoulements diphasiques en deux grand catégories ; écoulement co-courant (adiabatique) et écoulement à ébullition (diabatique).

L'écoulement diphasique adiabatique, est un écoulement désignant deux phases différentes (liquide/gaz), sans apport de chaleur et sans changement de phase ; par exemple un écoulement "eau-air" circule sous l'effet d'une pompe sans être chauffé.

Les principales configurations d'écoulements peuvent être présentées par la Figure 1.3 ci-dessous :



Fig. 1.3. Modèle de configuration des écoulements co-courants eau-air dans une conduite verticale [2] : (1) Bulles indépendantes; (2) Bulles agglomérées; (3) Bouchons;
(4) Semi-annulaire; (5) Annulaire.

L'écoulement à ébullition est obtenu par une phase liquide et sa vapeur, généralement se produit par chauffage. Cette catégorie à des configurations presque similaires à celle obtenue de façon adiabatique. Avec quelques différences :

- Sur la paroi les bulles se forment, et ont une plus grande densité prés de celle-ci qu'au centre du tube. Dans certaines conditions, elles peuvent provoquer une crise d'ébullition très dangereuse pour le système lorsqu'elle isole thermiquement la paroi du liquide.
- A partir d'un certain point le film liquide s'assèche et entraînant un phénomène appelé flux de chaleur critique : écoulement nouveau comparé à l'écoulement adiabatique.

L'évaporation progressive par un flux de chaleur, d'un liquide en écoulement chauffé donnera des configurations d'écoulement liquide-vapeur comme indiqué ci- dessous :



Fig. 1.4. Régimes d'écoulement des fluides et de transfert de chaleur [3].

Si le flux de chaleur est encore augmenté, le point d'assèchement est propagé en aval représenté dans la Figure 1.4. Pour les conditions de fonctionnement normales dans les réacteurs nucléaires à eau bouillante, le phénomène de dessèchement du film liquide est plus probable. La présentation ci-dessus de l'ébullition dans un canal a été construite sur un certain nombre d'années à partir de preuves provenant d'une grande variété de sources.

1.2 Phénomène de l'ébullition

En thermodynamique le phénomène de l'ébullition se produit lorsque la température d'un liquide à une pression spécifiée et portée à la température de saturation, de même, le phénomène de condensation se produit lorsque la température de vapeur est abaissée à la température de saturation. Bien que des caractéristiques uniques sont présentées par l'ébullition et la condensation, elles sont considérées comme étant des formes de transfert de chaleur par convection puisqu'elles impliquent un mouvement de fluide, telle que la montée des bulles vers le haut.

Les coefficients de transfert de chaleur rencontrés dans d'autres formes de convection en une seule phase sont généralement beaucoup plus bas que celui-ci associé à l'ébullition et la condensation.

1.2.1 Classification de l'ébullition

L'évaporation est un processus de changement de phase, de liquide à vapeur tout comme l'ébullition, mais entre les deux il existe des différences significatives. L'évaporation se produit à l'interface liquide-vapeur lorsque la pression de vapeur est inférieure à la pression de saturation du liquide à une température donnée. À noter que l'évaporation n'implique ni formation de bulles ni mouvement de bulle.

Par contre, l'ébullition se produit à l'interface solide-liquide lorsqu'un liquide est mis en contact avec une surface maintenue à une température suffisante supérieure à la température de saturation du liquide. Le processus d'ébullition est caractérisé par la formation rapide de bulles de vapeur à l'interface solide-liquide qui se détache de la surface lorsqu'elles atteignent certaines dimensions et tenter de monter à la surface libre de liquide.

En fonction de la présence de mouvement de fluide, on distingue habituellement deux types d'ébullition en "vase" et "convective".

L'ébullition en vase apparaît à partir d'un élément chauffant immergé dans un volume statique de liquide, tandis que celui qui se produit dans un canal par lequel le liquide s'écoule, est appelé l'ébullition convective.

En fonction de la température du liquide, l'ébullition en vase et convective sont aussi classées en ébullition sous refroidie ou saturée. L'ébullition est dite sous-refroidie lorsque la température du fluide est inférieure à la température de saturation, dans la surface chaude, les bulles qui apparaissent se détachent et disparaissent en s'élevant. Quand la température du liquide est égale à la température de saturation l'ébullition est dite saturée et les bulles qui se détachent s'élèvent vers la surface du liquide.

1.2.2 Ebullition en vase

En cas d'ébullition en vase, le fluide n'est pas forcé de s'écouler par un moteur tel qu'une pompe, et tout mouvement du fluide est dû aux courants de convection naturels et au mouvement des bulles sous l'influence de la flottabilité.

1.2.3 Régimes et courbe d'ébullition (courbe de Nukiyama)

Nukiyama en 1934 a réalisé un travail de pionnier sur l'ébullition, dans un liquide il a placé des fils chauffés électriquement et les a immergés. Selon la valeur de la différence de température, Nukiyama a observé que l'ébullition prend différentes formes.

Quatre régimes d'ébullition différents sont observés: convection naturelle, l'ébullition nucléée, ébullition transitoire, et l'ébullition en film.

Les différents régimes sont illustrés sur la courbe d'ébullition de la Figure 1.5. Elle donne la différence de température entre la paroi et le liquide en fonction de flux de chaleur surfacique. La courbe d'ébullition obtenue pour l'eau à la pression atmosphérique.



Fig. 1.5. Courbe de l'ébullition.

a) Ebullition par convection naturelle (jusqu'au point A de la courbe d'ébullition)

A la surface chauffante, le transfert se fait par conduction et convection, ensuite un transfert convectif transporte l'énergie jusqu'à la surface libre ou à lieu l'évaporation. La naissance de l'ébullition au point A à lieu lorsque les premières bulles se forment à la surface chauffante ; ces bulles quittent la paroi pour atteindre la surface libre.

b) Ebullition nucléée (entre les points A et C)

La phase d'ébullition nucléée se décompose en deux étapes :

Phase AB : à faible flux, les bulles se forment à la paroi sur la plupart des sites existants et sont bien individualisées et sans interaction ; cette phase et aussi appelée phase d'ébullition nucléée partielle.

Phase BC : à flux plus élevés, la vitesse de génération de la vapeur est importante on voit apparaître des colonnes de vapeur avec une forte interaction entre site voisins puisque leur nombre est plus important, cette étape est assimilée à la phase ou l'ébullition nucléée est pleinement développée.

Dans la pratique, l'ébullition nucléée est le régime le plus souhaitable ; car ils peuvent atteindre des taux de transfert de chaleur élevés.

c) Ebullition transitoire (entre les points C et D)

Cette zone instable ne peut être obtenue que par le contrôle de la température de surface. Le film de vapeur collapse et se reforme sous l'action des courants de convection naturelle.

A mesure que la température de paroi augmente, l'aire mouillée diminue induisant à son tour une diminution de la chaleur transférée.

Dans la pratique, l'ébullition de transition est le régime indésirable et se produit sur la plage de températures d'environ 30 °C à 120 °C.

d) Ebullition en film (au-delà du point D)

Un film de vapeur s'installe de façon continue à la surface chauffée et l'interface liquidevapeur à une forme constamment variable due au départ ordonné de bulles vers la surface libre.

Dans le point D le manteau de vapeur isole complètement la paroi et la chaleur ne peut plus se transmettre que par l'intermédiaire de la convection thermique s'effectuant dans la vapeur, ainsi que par le rayonnement thermique à travers la nappe de vapeur en ce moment le flux de chaleur devient minimal.

Remarquons après le point D une augmentation très rapide de flux de chaleur en fonction de l'écart de température à cause de la destruction de la couche pelliculaire. Le point E de la courbe correspond à la température maximale de la paroi que l'on peut atteindre en raison de la fusion du matériau constituant le filament chauffant de l'expérience de Nukiyama. Ce point est particulièrement surveillé dans les systèmes industriels mettent en jeu des phénomènes d'ébullition afin d'éviter l'endommagement des équipements.



a) ébullition nucléée



b) ébullition de transition



c) ébullition en film

Fig. 1.6. Divers régimes d'ébullition du méthanol sur un tube horizontal (d=1 cm)

[4].

1.2.4 Ébullition convective

Le transfert de chaleur lors de l'ébullition est utilisé dans l'industrie dans les générateurs de vapeur (chaudières, réacteurs thermo-nucléaires, etc.) où elle s'effectue dans les tubes à convection forcée. A l'aide d'une source externe, comme une pompe le liquide est forcé à se déplacer dans l'ébullition convective. Des effets combinés de la convection et l'ébullition en vase est présenté dans ce cas d'ébullition.

A titre d'exemple, examinons le cas le plus simple d'un écoulement vertical ascendant dans un tube circulaire et dont la paroi est chauffée de manière uniforme [5], l'eau est supposée en sous-saturation à l'extrémité inférieure du tube (Figure 1.7). Plusieurs zones d'écoulement vont apparaître ; leur longueur dépendra de l'écart de température paroi-fluide et le débit massique de l'eau à l'entrée.

La zone A : Dans cette zone des bulles de dégazage sont éventuellement produites, la convection forcée.

La zone B : Au sein du liquide, la bulle de vapeur se condense tant qu'il n'a pas atteint la température de saturation, l'ébullition locale.

La zone C : on à de l'ébullition nucléée dans cette zone, ou le liquide étant à température de saturation, à cause de l'effet d'arrachement des bulles par la vitesse ; le coefficient de transfert thermique et meilleur que pour l'ébullition en vase.

La zone D : un phénomène dit de coalescence apparaître, lorsque les bulles devenant nombreuses et s'agglomèrent, rassemblant au centre de tube ils forment des bouchons de vapeur (écoulement à bouchons). *Fig.*





La zone E : au centre du tube, un manchon de vapeur se forme grâce aux bouchons qui étaient à la queue se rejoignent les uns les autres. Un mince film liquide baigne la paroi (écoulement annulaire). La surface du film liquide en contact avec le noyau central de vapeur est extrêmement agitée, il s'y produit un arrachement de gouttelettes liquides ainsi qu'une évaporation intense.

La zone F : peu à peu le film liquide annulaire s'épuise, et un contact direct entre la vapeur et la paroi chauffante se fait. On à risque de destruction de la paroi chauffante, si le flux de chaleur est élevé. Les gouttelettes liquides en suspension dans la vapeur s'évaporent lorsqu'elles se déposent sur la paroi chauffante, ce phénomène est appelé échauffement critique par assèchement.

La zone G : Dans cette zone, on à une disparition complète du film liquide ; un brouillard formé de microscopique gouttelettes en suspension reste dans la vapeur (écoulement brouillard).

La zone H : La phase liquide a complètement disparue, on à un écoulement composé d'une seule phase de vapeur ou s'appliquent les lois de la convection forcée en gaz.

On appelle un tube vaporisateur, lorsque l'eau entre sous forme liquide est sort en vapeur.

La description des phénomènes aurait été pratiquement la même dans un tube horizontal, avec une différence à l'emplacement de la vapeur qui se trouve dans la partie supérieure du tube ou elle se rassemble (effet de stratification).

1.3 Phénomène de la condensation

La condensation est un processus par lequel l'extraction de la chaleur d'un système entraîne la transformation d'une vapeur en liquide. La condensation joue un rôle important dans la nature, et dans l'industrie. Les processus de condensation sont nombreux et se déroulent dans une multitude de situations.

La condensation se produit lorsque la température d'une vapeur est inférieure à la température de saturation. Cela se fait généralement en mettant la vapeur en contact avec une surface dont la température est inférieure à la température de saturation de la vapeur. La condensation peut aussi se produire sur une surface libre d'un liquide ou même d'un gaz lorsque la température du liquide ou du gaz auquel la vapeur est exposée est inférieure à la température de saturation. Dans ce dernier cas, les gouttelettes liquides en suspension dans le gaz forment un brouillard.

1.3.1 Classification de la condensation

Compte tenu de leur diversité, une classification des processus de condensation est utile.

- Mode de condensation : homogène, gouttelettes, film ou contact direct.
- Géométrie du système : surface plane, externe, interne, etc.

La classification basée sur le mode de condensation est probablement la plus utile, et les modes de condensation sont détaillés ci-dessous.

1. La condensation en film où le condensat mouille la surface et forme un film liquide sur la surface qui glisse sous l'influence de la gravité. L'épaisseur du film liquide augmente dans la direction de l'écoulement à mesure que plus de vapeur se condense sur le film. C'est ainsi que la condensation se produit normalement dans la pratique.

Dans la condensation en film, la surface est recouverte d'une pellicule liquide de plus en plus épaisse, et cette paroi-liquide entre la surface solide et la vapeur sert de résistance au transfert de chaleur. La chaleur de la vaporisation libérée comme la vapeur condensée doit passer par cette résistance avant qu'elle n'atteigne la surface solide et transférée vers le milieu.

2. La condensation homogène peut se produire lorsque la vapeur est suffisamment refroidie sous sa température de saturation pour induire la nucléation de gouttelettes, elle peut être causée par le mélange de deux courants de vapeur à des températures différentes, le condensat apparaît sous forme de gouttelettes qui restent en suspension dans l'écoulement gazeux, ce qui constitue alors un brouillard.

3. La condensation en goutte à lieu lorsque la vapeur condensée forme de gouttelettes sur la surface au lieu d'un film continu, et la surface et couverte par innombrable gouttelettes de diamètres différents.

Dans la condensation en goutte, les gouttelettes glissent vers le bas quand elles atteignent une certaine taille, dégageant la surface et l'exposer à la vapeur. Il n'y a pas de film liquide dans ce cas pour résister au transfert de chaleur. Au point de vue de transfert de chaleur la condensation en gouttes est 10 à 15 fois plus efficace que celle en film.

4. La condensation par contact direct se produit lorsqu'un liquide froid se trouve en contact direct avec la vapeur à condenser. Par exemple la condensation sur les sprays liquides sous-refroidis. La condensation par contact direct est très efficace, l'efficacité n'est pas seulement due à l'élimination de la résistance des parois, mais surtout au fait que les deux flux peuvent être mélangés, donnant de grandes surfaces interfaciales. Cependant, les condenseurs à contact direct ne sont utilisés que dans des applications spéciales, car le condensat et le liquide de refroidissement finissent mélangés. Dans la plupart des applications, il est nécessaire de séparer le condensat et le liquide de refroidissement secondaire.

5. La condensation de mélange de vapeur d'eau et d'hydrocarbures formant des liquides immiscibles. Ce mode de condensation complique la compréhension et le calcul du coefficient d'échange, représenté dans la Figure 1.8.



Fig. 1.8. Condensation formant des liquides immiscibles.

1.3.2 La Condensation en film

La condensation en film, comme la montre la Figure 1.9 dans une plaque verticale ou le film liquide commence à se former au sommet de la plaque et s'écoule sous l'influence de la gravité. L'épaisseur du film augmente dans la direction de l'écoulement x en raison de la condensation continue à l'interface liquide-vapeur. La quantité de chaleur C_L (la chaleur latente de vaporisation) est libérée pendant la condensation est transférée à travers le film à la surface de la plaque à température T_S . Noter que la T_S doit être inférieurs à la température de saturation T_{Sat} de la vapeur pour que la condensation se produise.

Le profil de vitesse et la température typiques du condensat est donnée dans la Figure 1.9. Noter que la vitesse du condensat au niveau de la paroi est nulle en raison de la condition " pas de glissement " et atteint un maximum à l'interface liquide-vapeur. La température du condensat est la T_{Sat} à l'interface diminue progressivement à la température T_S de la paroi.



Fig. 1.9. Condensation en film sur une plaque vertical.

Le transfert de chaleur dans la condensation dépend également de la nature d'écoulement de condensat laminaire ou turbulent. Le critère pour le régime d'écoulement est fourni par le nombre de Reynolds, qui est défini comme :

$$\mathsf{Re} = \frac{4m}{\mu_l} \tag{1.1}$$

Avec :

 \dot{m} : Débit massique de liquide par unité de largeur de la plaque.

 μ_l : Viscosité du liquide, kg/m.s

Le nombre de Reynolds pour la condensation sur les surfaces extérieures des tubes ou des plaques verticales augmente dans la direction de l'écoulement en raison de l'augmentation de l'épaisseur du film liquide δ . L'écoulement de film liquide présente différents régimes, en fonction de la valeur du nombre de Reynolds. On observe que la surface extérieure de film liquide reste lisse et sans vague pour environ Re \leq 30, comme la Figure 1.10 montre, donc l'écoulement est laminaire. Des ondulations ou des vagues apparaissent sur la surface libre de l'écoulement du condensat à mesure que le nombre de Reynolds augmente, et l'écoulement de condensat devient complètement turbulent vers Re \approx 1800. L'écoulement est dit ondulé-laminaire lorsqu'il est entre 450 < Re < 1800 et turbulent pour Re > 1800.



Fig. 1.10. Régimes d'écoulement pendant la condensation du film sur une plaque vertical [4].

1.3.3 Modèle analytique de Nusselt

Considérons une plaque verticale de hauteur L et de largeur b maintenue à une température constante T_S qui est exposée à la vapeur à la température de saturation T_{Sat} . La direction vers le bas est considérée comme la direction x positive, l'origine étant placée au sommet de la plaque où la condensation commence, comme le montre la Figure 1.11. La température de surface est inférieure à la température de saturation ($T_S < T_{Sat}$) et donc la vapeur se condense sur la surface. Le film liquide s'écoule vers le bas sous l'influence de la gravité. L'épaisseur du film δ et le débit massique du condensat augmente suivant l'axe x en raison de la condensation continue sur le film existant. Ensuite, le transfert de chaleur de la vapeur à la plaque doit se produire à travers le film, qui offre une résistance au transfert de chaleur. Évidemment, plus l'épaisseur du film augmente, plus sa résistance thermique est grande et donc plus le taux de transfert de chaleur est faible.

La relation analytique pour le coefficient de transfert de chaleur dans la condensation de film sur une plaque verticale décrite ci-dessous a été développée pour la première fois par Nusselt [7] en 1916 selon les hypothèses simplificatrices suivantes :



Fig. 1.11. L'élément volumique du condensat sur une plaque verticale considéré dans l'analyse de Nusselt.

1. La plaque et la vapeur sont maintenues à des températures constantes de T_S et de T_{Sat} , respectivement, et la température à travers le film liquide varie linéairement.

2. Le transfert de chaleur à travers le film liquide se fait par conduction pure (pas de courants de convection dans le film liquide).

3. La vitesse de la vapeur est faible (ou nulle) de sorte qu'elle n'exerce aucune traînée sur le condensat (pas de cisaillement visqueux sur l'interface liquide-vapeur).

4. Le film liquide en écoulement laminaire lisse, et les propriétés du liquide sont constantes.

5. L'accélération de la couche de condensat est négligeable.

Les équations sont écrites dans le repère (Oxy), les axes x et y étant respectivement dirigés suivant la normale à la plaque et suivant le sens de l'écoulement. L'équation de mouvement du liquide se simplifie alors considérablement :

$$\mu_{L} \frac{\partial^{2} U}{\partial y^{2}} + \rho_{L} g = 0$$
(1.2)

Avec les conditions aux limites suivantes :

- à la paroi (y = 0): $U_L = 0$ (1.3)

- à l'interface liquide-vapeur:
$$(y = \delta)$$
: $\frac{\partial U_{L}}{\partial y} = 0$ (1.4)

 δ_x étant l'épaisseur du film liquide (variable selon x)

La résolution analytique de cette équation conduit à un profil parabolique de vitesse liquide :

$$U_{L}(x, y) = \frac{g}{2v_{L}} (2\delta y - y^{2})$$
(1.5)

Le débit massique par unité de largeur de la plaque à la côte x s'écrit alors:

$$\dot{m}_L = \frac{\rho_L \cdot g \cdot \delta^3}{3 \cdot v_L} \tag{1.6}$$

Par ailleurs, l'élimination des termes de convection dans l'équation de l'énergie du liquide conduit à un profil de température $T_L(y)$ linéaire :

$$T_{L} = (x, y) = (T_{Sat} - T_{S})\frac{y}{\delta} + T_{S}$$
(1.7)

L'épaisseur de film liquide δ est calculée par bilan thermique, en écrivant que la chaleur dégagée libérée par condensation de vapeur à l'interface est transmise à la paroi par conduction à travers le film liquide :

$$\varphi_P = \frac{\lambda_L}{\delta} (T_{Sat} - T_S) = L_C^* \cdot \frac{d \dot{m}}{dx}$$
(1.8)

Rohsenow [8] a montré en 1956 que le refroidissement du liquide en dessous de la température de saturation peut être pris en compte en remplaçant L_C par la chaleur latente de condensation modifiée L^*_{C} , définie comme suite :

$$L_{C}^{*} = L_{C} + 0.68C_{pl}(T_{Sat} - T_{S})$$
(1.9)

Où C_{pl} est la chaleur spécifique du liquide à la température moyenne du film. Par intégration entre 0 et y, en déduit l'énsisseur du condenset :

Par intégration entre 0 et x, on déduit l'épaisseur du condensat :

$$\delta(x) = \left(\frac{4\lambda_L \cdot \mu_L (T_{Sat} - T_S)}{L_C^* \cdot g \cdot \rho_L^2}\right)^{1/4}$$
(1.10)

La densité de flux pariétale peut être exprimée comme suit :

$$\varphi_P = h_x (T_{Sat} - T_S) \tag{1.11}$$

Le coefficient de transfert local h_x s'écrit alors :

$$h_{x} = \left(\frac{\lambda_{L}^{3} L_{C}^{*} g \cdot \rho_{L}(\rho_{L} - \rho_{v})}{4\mu_{L}(T_{sat} - T_{s})x}\right)^{1/4}$$
(1.12)

Le coefficient de transfert thermique moyen s'obtient par intégration sur toute la longueur L de la plaque:

$$h_{vert} = 0.943 \left(\frac{\lambda_L^3 L_C^* g \cdot \rho_L (\rho_L - \rho_v)}{\mu_L (T_{Sat} - T_S) L} \right)^{1/4}$$
(1.13)

Toutes les propriétés du liquide doivent être évaluées à la température du film $T_f = (T_{Sat} + T_S) / 2$, Le L_C et ρ_v doivent être évalués à la température de saturation T_{Sat} .

L'écoulement de condensat est laminaire lisse à Re \leq 30, et laminaire ondulé lorsque 30 < Re < 1800 et turbulent pour Re > 1800.

Le coefficient de transfert de chaleur pour le régime laminaire ondulé et turbulent est déterminé par les équations suivants :

$$h_{vert,ondul\acute{e}} = \frac{\text{Re}\,\lambda_L}{1.08\,\text{Re}^{1.22} - 5.2} \left(\frac{g}{v_L^2}\right)^{1/3}$$
(1.14)

$$h_{vert,turbulent} = \frac{\text{Re}\,\lambda_L}{8750 + 58\text{Pr}^{-0.5}(\text{Re}^{0.75} - 253)} \left(\frac{g}{v_L^2}\right)^{1/3}$$
(1.15)

1.3.4 Plaques inclinées

Les équations utilisées dans une plaque verticale, restent valables pour des plaques qui sont inclinées par un angle θ à partir de la verticale, en remplaçant g dans cette équation par g cos θ (Figure 1.12). Cette approximation donne des résultats satisfaisants surtout pour $\theta \le 60^{\circ}$. Noter que les coefficients de transfert de chaleur de condensation sur les plaques verticales et inclinées sont liés les uns aux autres par :

$$h_{inclinée} = h_{vert} (\cos\theta)^{1/4}$$
(1.16)

L'équation (1.16) est développée pour un écoulement laminaire de condensat, mais il peut également être utilisé pour les écoulements laminaires ondulés comme approximation.



Fig. 1.12. Film de condensation sur une plaque inclinée [4].

1.3.5 Tubes verticaux

L'équation (1.13) pour les plaques verticales peut également être utilisée pour calculer le coefficient de transfert de chaleur moyen pour la condensation de film laminaire sur des surfaces extérieures des tubes verticaux à condition que le diamètre du tube soit grand par rapport à l'épaisseur du film liquide.

1.3.6 Tubes et sphères horizontaux

L'analyse de Nusselt de la condensation de film sur des plaques verticales peut également être étendue aux tubes et aux sphères horizontaux. Le coefficient de transfert de chaleur moyen pour la condensation de film sur les surfaces extérieures d'un tube horizontal est déterminé par :

$$h_{horiz} = 0.729 \left(\frac{L_C^* g \cdot \lambda_L^3 \cdot \rho_L (\rho_L - \rho_v)}{\mu_L (T_{Sat} - T_S) D} \right)^{1/4}$$
(1.17)

Où D est le diamètre du tube horizontal. L'équation (1.17) peut facilement être modifiée pour une sphère en remplaçant la constante 0.729 par 0.815.

1.3.7 Faisceau de tubes horizontaux

Les tubes horizontaux rangés les uns sur les autres comme indiqué sur la Figure 1.13 sont couramment utilisés dans la conception des condenseurs. L'épaisseur moyenne de film liquide dans les tubes inférieurs, est beaucoup plus grande en raison de la chute de condensat sur eux des tubes directement au-dessus. Par conséquent, le coefficient de transfert de chaleur moyen aux tubes inférieurs dans de tels arrangements est plus petit. En supposant que le condensat des tubes ci-dessus à ceux ci-dessous s'écoule en douceur, le coefficient moyen de transfert

de chaleur de condensation du film pour tous les tubes dans un niveau vertical peut être exprimé comme suit :



Fig. 1.13. Film de condensation sur un niveau vertical de tubes horizontaux [4].

$$h_{horiz,Ntubes} = 0.729 \left(\frac{L_C^* g. \rho_L^2 . \lambda_L^3}{\mu_L (T_{Sat} - T_S) ND} \right) = \frac{1}{N^{1/4}} h_{horiz,1tube}$$
(1.18)

Notez que l'équation (1.18) peut être obtenue à partir de la relation du coefficient de transfert de chaleur pour un tube horizontal en remplaçant *D* dans cette relation par *ND*.

1.3.8 Condensation du film à l'intérieur des tubes horizontaux

Jusqu'à présent, nous avons discuté de la condensation de film sur les surfaces extérieures des tubes et d'autres géométries, qui se caractérise par une vitesse de vapeur négligeable et sans restriction de l'écoulement du condensat. La plupart des processus de condensation rencontrés dans les applications de réfrigération et de climatisation, cependant, la condensation se trouve aussi sur les surfaces intérieures des tubes horizontaux ou verticaux. L'analyse du transfert de chaleur de la condensation à l'intérieur des tubes est très compliquée par le fait qu'elle est fortement influencée par la vitesse de vapeur et le taux d'accumulation de liquide sur les parois des tubes (Figure 1.14).



Fig. 1.14. L'écoulement de condensat dans un tube horizontal à grande vitesse de vapeur [4].

Pour une faible vitesse de vapeur, Chato [9] à proposé cette équation pour la condensation :

$$h_{\text{intérieure}} = 0.555 \left[\frac{g \cdot \lambda_L^3 \cdot \rho_L (\rho_L - \rho_v)}{\mu_L (T_{Sat} - T_S)} \left(L_C^* + \frac{3}{8} C_{pl} (T_{Sat} - T_S) \right) \right]^{1/4}$$
(1.19)

Pour :

$$\operatorname{Re}_{vapeur} = \left(\frac{\rho_{v} v_{v} D}{\mu_{v}}\right)_{entrée} < 35,000$$
(1.20)

Où le nombre de Reynolds de la vapeur doit être évalué à l'entrée du tube en utilisant le diamètre interne du tube comme une longueur caractéristique. Les corrélations du coefficient de transfert de chaleur pour des vitesses de vapeur plus élevées sont données par Rohsenow [8].

1.3.9 Condensation de vapeur en présence de gaz non condensables

La plupart des condenseurs utilisés dans les centrales à vapeur fonctionnent à des pressions bien inférieures à la pression atmosphérique (habituellement inférieures à 0,1 atm) pour augmenter l'efficacité de cycle thermique. Et le fonctionnement à basse pression, augmente la possibilité de présence d'air (un gaz non condensable) dans les condenseurs. Les études expérimentales montrent que la présence des gaz non condensables dans la vapeur à un effet néfaste sur le transfert de chaleur par condensation. Ils contribuent à réduire de manière significative le taux de condensation et le coefficient de transfert de chaleur entre le mélange gaz et la paroi froide [10].

Par exemple, la présence de moins de 1 % (en masse) d'air dans la vapeur peut réduire le coefficient de transfert de chaleur de condensation plus de la moitié.

Par conséquent, il est nécessaire d'évacuer périodiquement les gaz non condensables qui s'accumulent dans les condenseurs pour assurer un bon fonctionnement.

La réduction du coefficient de transfert de chaleur de condensation en présence d'un gaz non condensable peut s'expliquer comme suit : Quand la vapeur se mélange avec un gaz non condensable se condense, seul le gaz non condensable reste à proximité de la surface (Figure 1.15). Cette couche de gaz forme une barrière entre la vapeur et la surface, et la vapeur atteigne difficilement la surface. La vapeur doit maintenant se propager à travers le gaz non condensable avant d'atteindre la surface, ce qui réduit l'efficacité du processus de condensation.



Fig. 1.15. La présence des gaz non condensables dans la condensation à vapeur [4].

Les études expérimentales montrent que le transfert de chaleur en présence d'un gaz non condensable dépend fortement de la nature d'écoulement de vapeur et de la vitesse d'écoulement. La vitesse élevée de l'écoulement est plus susceptible d'éliminer le gaz non condensable stagnant à proximité de la surface et d'améliorer ainsi le transfert de chaleur.

1.3.10 La condensation en goutte

La condensation en gouttelette, est caractérisée par nombreuses gouttelettes de diamètre variable sur la surface de condensation au lieu d'un film liquide continu, ceci est l'un des mécanismes les plus efficaces de transfert de chaleur, et des coefficients de transfert de chaleur extrêmement importants peuvent être obtenus avec ce mécanisme, Figure 1.16.



Fig. 1.16. La condensation en gouttelettes de la vapeur dans une surface verticale [11].

Dans la condensation en goutte, les petites gouttelettes qui se forment aux sites de nucléation à la surface se développent en raison de la condensation continue, coalescence en grosses gouttelettes, et glissent vers le bas quand ils atteignent une certaine taille, dégagent la surface et l'exposent à la vapeur. Il n'y a pas de film liquide dans ce cas pour résister le transfert de chaleur. Par conséquent, la condensation en goutte peut obtenir des coefficients de transfert de chaleur 10 à 15 fois plus grands que ceux associés à la condensation en film. La condensation en goutte est le mode de condensation préféré dans les applications de transfert de chaleur.

La condensation en goutte à été étudiée expérimentalement pour un certain nombre de combinaisons surface-fluide. Parmi celles-ci, les études sur la condensation de vapeur pour les surfaces en cuivre ont attiré l'attention en raison de leur utilisation généralisée dans les centrales à vapeur. Griffith [12], à proposé ces corrélations pour la condensation en goutte de la vapeur sur une surface de cuivre :

$$h_{goutte} = \begin{cases} 51,104 + 2044T_{Sat} \\ 255,310 \end{cases}, \qquad 22^{\circ}\mathrm{C} < T_{Sat} < 100^{\circ}\mathrm{C} \tag{1.21}$$

$$T_{Sat} > 100^{\circ} \text{C} \tag{1.22}$$

Où T_{sat} est en °C et le coefficient de transfert de chaleur h_{goutte} est en W/m² °C. Les coefficients de transfert de chaleur très élevés que l'on peut obtenir avec la condensation en gouttelettes sont peu d'importance si le matériau de la surface de condensation n'est pas un bon conducteur comme le cuivre ou si la résistance thermique de l'autre côté de la surface est trop grande.

1.4 Les pulvérisateurs liquides et les buses de pulvérisation

L'utilisation des fluides dispersés sous sprayers [13-14-15] s'avère un moyen très efficace, quand l'objectif consiste à refroidir une surface hautement chauffée. Dans le domaine industriel, lors de l'élaboration des produits sidérurgiques, et pour répondre à ces exigences spéciales et avoir finalement les propriétés souhaitées, la technique de refroidissement joue un rôle prépondérant. Citons comme exemple le laminage des aciers.

Une buse est un dispositif qui convertit l'énergie d'un liquide en gouttelettes de pulvérisation rapides. Leurs applications dans de nombreux procédés industriels sont innombrables, est très souvent un élément critique dans la détermination de la qualité finale du produit ou de l'efficacité du processus.

1.4.1 La pulvérisation liquide

Le processus de pulvérisation liquide peut être décrit en deux phases :

- 1. Décomposer le liquide en gouttes séparées.
- 2. Diriger les gouttes liquides sur une surface ou un objet, pour obtenir le résultat souhaité.

Les deux phases ci-dessus sont normalement réalisées, par les types de buses utilisés dans les procédés industriels, en même temps, différentes techniques sont illustrées ci-après.
Le progrès continu des techniques de fabrication au cours des dernières années a demandé au fabricant de buse de mettre à disposition à l'industrie une gamme toujours plus complète de types de buses de pulvérisation pour effectuer les différents processus d'une manière plus efficace.

C'est l'intérêt de l'ingénieur qui utilise des buses de pulvérisation dans les processus de fabrication, de se familiariser avec les différents types de buses qui sont disponibles aujourd'hui et avec leurs caractéristiques individuelles, afin de pouvoir choisir la buse qui fonctionne avec la plus grande efficacité possible sur une application donnée.

La pulvérisation d'un liquide à travers une buse de pulvérisation peut servir à différentes fins, parmi lesquelles les plus importantes sont:

- 1. Refroidissement, par transfert de chaleur entre le produit lui-même et le liquide qui s'écoule à sa surface.
- 2. Lavage, où l'eau dirigée sur le produit enlève la saleté ou les substances indésirables de la surface du produit.
- 3. Humidification, avec pulvérisations transportant très peu de liquides à la surface du produit, dans une chambre ou dans une pièce.
- 4. Mesurer la quantité de liquide désirée en une unité de temps dans le produit manipulé.
- 5. Application d'un produit sur une surface, comme dans le cas de peinture par pulvérisation ou de prétraitement de surface avant la peinture.
- 6. Augmenter la surface du liquide pour accélérer les processus de transfert de chaleur ou les réactions chimiques et bien d'autres dans de nombreuses applications dans l'industrie moderne.

Il est évident que les meilleurs résultats pour chaque application ne sont obtenus que lorsque les bons choix en termes de type de buse, valeur du débit, l'angle de pulvérisation, les dimensions de la goutte et le matériel de fabrication des buses.

1.4.2 Les buses de pulvérisation

Une buse de pulvérisation est un dispositif qui utilise l'énergie de pression d'un liquide pour augmenter sa vitesse à travers un orifice et le briser en gouttelettes. Ces performances peuvent être identifiées et décrites avec précision, afin que le concepteur puisse spécifier exactement la buse de pulvérisation requise pour un processus donné.

Les caractéristiques qui déterminent les performances de la buse sont les suivantes :

- 1. Le débit de liquide fourni en fonction de la pression d'alimentation de la buse.
- 2. L'angle d'ouverture de la pulvérisation produite.
- 3. L'efficacité de la buse, comme un rapport entre l'énergie de pulvérisation et l'énergie utilisée par la buse.
- 4. L'uniformité de la distribution du débit sur la cible.
- 5. La distribution de la taille des gouttelettes de pulvérisation.
- 6. L'impact du jet de la pulvérisation.

1.4.3 Les différents types des buses de pulvérisation

Plusieurs et différentes techniques sont utilisées pour produire un jet pulvérisé (Spray), et la plupart d'entre eux utilise les buses pour les appliquer dans les processus industriels. Basé sur les différentes techniques, les types de buses suivants peuvent être utilisés dans des applications industrielles pour générer un jet liquide.

1.4.3.1 Les buses de pression

C'est le type de buses le plus simple, où un orifice est ouvert dans une chambre où le liquide à pulvériser est alimenté sous pression. Un jet pulvérisé est produit à travers l'orifice avec un motif de pulvérisation, le débit et l'angle de pulvérisation en fonction du profil de bord de l'orifice et la conception de la chambre de pression intérieure.

Les buses de pression typiques sont les buses à jet plat ou la section du jet est elliptique (Figure 1.17).



Fig. 1.17. Buse à jet plat [16].

1.4.3.2 Les buses de turbulence

Dans ces buses, le liquide déplaçant vers la chambre avant que l'orifice reçoit un composant de vitesse de rotation, afin de s'ouvrir dans une forme conique dès qu'il quitte le bord de l'orifice en raison de la force centrifuge. Sur la base de la conception de la buse et de la technique utilisée pour générer la vitesse de rotation, les gouttes produites peuvent être confinées à la surface extérieure du cône (jet à cône creux) ou être réparti uniformément pour remplir tout le volume du cône (jet à cône plein).



Fig. 1.18. Buse à turbulence [17].

1.4.3.3 Les buses d'impact

Ici, la forme de pulvérisation désirée est obtenue produisant un impact du jet liquide sur une surface correctement conçue. Le jet liquide est par la suite transformé en une couche liquide, puis brisé en gouttes avec le motif de pulvérisation souhaité après avoir quitté le bord de la buse.



Fig. 1.19. Buse de pulvérisation par impact [18].

1.4.3.4 Les atomiseurs pneumatiques

Des pulvérisations fines et très fines peuvent être obtenues au moyen d'atomiseurs à air comprimé, fonctionnant selon différents principes. Pour produire un nuage de fines gouttelettes, il faut mélanger de l'air comprimé et un débit de liquide. Ce type des buses possèdent une importante vitesse relative.



Fig. 1.20. Schéma descriptif de l'atomisation pneumatique [19].

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

1. Jet à cône plein

Dans un jet à cône plein, les gouttelettes sont distribuées dans un volume limité par un cône, ayant son point d'origine à l'orifice de la buse. Un tel modèle de pulvérisation est couramment utilisé dans une grande variété de processus industriels, puisque c'est elle qui permet de répartir de façon uniforme l'eau qui s'écoule sur une surface.

Donc le jet à cône plein est utile, par exemple, pour pulvériser uniformément le liquide de refroidissement sur une surface immobile. Une autre utilisation est de distribuer des gouttelettes liquides dans volume, comme la distribution de gouttelettes d'eau dans le volume intérieur d'une tour de refroidissement.

1.1. Jet à cône plein standard (Buse de turbulence)

Ces buses utilisent une aube de forme spéciale placée à l'entrée de la buse, pour donner une vitesse de rotation au fluide s'écoulant à travers la buse.

En raison de la vitesse de rotation du fluide, l'eau sortant de l'orifice de la buse est soumise à une force centrifuge et s'ouvre en forme de cône plein.

L'étendue de l'angle du cône est en fonction de la vitesse de sortie (créée à partir de la pression d'entrée) et la conception interne de la buse. Elle peut varier en pratique de 30° à 120°.

Ces buses peuvent également être produites sous forme de buses carrées à cône plein, où la forme carrée du jet pyramidal est obtenue par une conception spéciale de l'orifice de sortie. Deux détails importants doivent être notés par le concepteur du système lors de l'utilisation de ce type de buses :

- 1. L'angle du jet est mesuré sur le côté de la section carrée.
- 2. La section carrée du jet tourne dans la distance entre l'orifice de la buse et la zone cible.

1.2. Jet à cône plein multiple

Ce modèle de pulvérisation est utilisé dans deux cas, c'est-à-dire :

1. Lorsqu'un grand angle de pulvérisation doit être atteint avec ces buses, où dans les cas des gouttelettes de petite taille et des capacités plutôt élevées sont nécessaires.

Par conséquent, plusieurs buses sont regroupées avec différentes directions de pulvérisation : le motif de pulvérisation résultant provient du groupe supplémentaire de pulvérisations à une seule buse et la taille des gouttelettes de la pulvérisation reste la même que celle d'une seule buse.

2. Lorsqu'il est nécessaire d'obtenir un jet à grand angle à l'aide des buses qui délivrent par nature un angle de pulvérisation limité. Dans le cas d'un atomiseur d'air à grand angle.





Fig. 1.21. Buse à cône plein [18].

2. Jet à cône creux

Un jet de cône creux se compose de gouttelettes concentrées sur la surface extérieure d'un volume de forme conique, sans gouttelettes contenues à l'intérieur de la forme du jet conique. Ces buses sont normalement utilisées pour le lavage de la fumée ou le refroidissement des gaz dans plusieurs procédés industriels.

Ces buses utilisent une injection tangentielle de liquide dans une chambre de tourbillonnement pour générer des forces centrifuges qui brisent la veine liquide dès sa sortie de l'orifice. Le profil d'orifice conçus avec précision, permet d'obtenir de très grands angles de pulvérisation.





Fig. 1.22. Buse à cône creux [18].

3. Jet plat

Dans un jet plat, les gouttelettes liquides sont pulvérisées sous la forme d'une couche liquide plate, avec des épaisseurs différentes selon le principe utilisé pour générer le jet pulvérisé. Une buse de pulvérisation à jet plat a pour but de pulvériser sur une surface ou un objet se déplaçant dans une direction transversale par rapport à celle de la surface de jet, un exemple typique étant les buses dans un tunnel de lavage de voitures. La grande majorité des buses à jet plat utilisées dans l'industrie fonctionnent selon l'un des principes suivants :

3.1. Jet plat en ligne

C'est une buse à jet plat utilisée en générales, où le liquide pénètre dans la buse en ligne avec la longueur de l'axe et l'alimenté à une chambre de pression, d'où il est éjecté par l'orifice de la buse. La valeur du débit et l'angle de pulvérisation sont déterminés respectivement à partir de la section transversale de l'orifice et le profil du bord de l'orifice.

3.2. Jet droit en ligne

Ces buses peuvent être considérées comme un type spécial de buse à jet plat, avec un angle de pulvérisation nulle. Ils sont conçus pour produire un courant sec et stable, avec un impact puissant sur un point donné, et servent normalement à effectuer des processus de nettoyage ou à couper des matériaux mous.





Fig. 1.23. Buse à jet plat [18].

1.5 Etude du film liquide

Les films liquides en écoulement sur une surface sont observés dans une grande variété de phénomènes naturels et sont également utilisés dans les procédés industriels pour leur grande efficacité thermique. Les films liquides trouvent leurs applications, en chute sur des surfaces verticales ou inclinées sous l'influence de la gravité dans les condenseurs, les évaporateurs, les réacteurs chimiques et les absorbeurs ; ainsi que dans le refroidissement des plaques horizontales hautement chauffées dans le domaine de production des aciers.

1.6 Les modèles classiques

1.6.1 Épaisseur de film constant et le profil de vitesse

La première étude sur la chute des films liquides a été menée par Nusselt [7] 1916. Il a fait plusieurs hypothèses, y compris un système d'état stable (Stationnaire), une région interfaciale plate, et écoulement rectiligne, et créé un élan, ou par une force, équilibre sur une fine couche de fluide. Alors, l'épaisseur de cette couche s'approchait de zéro, comme la définition fondamentale d'une dérivée est utilisée pour générer une équation différentielle, exprimé en termes de gradient de flux de quantité de mouvement, qui pourrait être intégré pour donner le flux de quantité de mouvement. L'équation différentielle résultante, reliant le flux de quantité de mouvement au gradient de vitesse, a été intégrée pour donner le profil de vitesse du fluide. Les conditions aux limites utilisées pour résoudre ces équations pour les chutes de films liquides étaient :

- a. La vitesse du fluide à la paroi doit être nulle par rapport à la vitesse de la paroi.
- b. Et le flux de quantité de mouvement, la contrainte de cisaillement, et le gradient de vitesse doit être égal à zéro à l'interface liquide-gaz. Bird et al. [20] ont donnée une analyse détaillée de ces aspects.

En suivant les étapes indiquées ci-dessus, pour un film tombant sur un canal rectangulaire incliné, l'équation décrivant le profil de vitesse u(y), contrainte de cisaillement de paroi τ_p , et l'épaisseur de film δ , peut être dérivé comme suit :

$$u(y) = \frac{\rho g \delta^2 \cos \theta}{2\mu} \Big[1 - (y/\delta)^2 \Big]$$
(1.23)

$$\tau_p = \rho g \delta \cos \theta \tag{1.24}$$

$$\delta = \left[\frac{3\mu u_{moy}}{\rho g \cos \theta}\right]^{(1/2)} \tag{1.25}$$

Avec, g est l'accélération gravitationnelle vers le bas, ρ est la masse volumique, μ est la viscosité du liquide, et θ est l'angle d'inclinaison de la plaque par rapport à l'horizontale. Afin de calculer la prédiction de Nusselt [7] (1916) de l'épaisseur du film en termes de variables déterminées expérimentalement, la vitesse moyenne u_{moy} dans l'équation (1.25) peut être remplacée par le débit volumétrique par unité de largeur de canal, si l'exposant est remplacé par une valeur de (1/3).

Pour faire une analyse significative, il est nécessaire de définir la vitesse moyenne et maximale du film. Par rapport à la largeur du canal et à l'épaisseur du film, en divisant cette valeur par la surface transversale du film. La vitesse moyenne peut être obtenue en intégrant l'équation (1.23).

$$u_{moy} = \frac{\rho g \delta^2 \cos \theta}{3\mu} \tag{1.26}$$

En évaluant l'équation (1.23) avec une valeur de y = 0, la vitesse maximale peut être obtenue.

$$u_{\rm max} = \frac{\rho g \delta^2 \cos \theta}{2\mu} \tag{1.27}$$

Le profil de vitesse prédit par l'analyse de l'équilibre des forces directe d'après l'équation (1.23), est de forme parabolique.

1.6.2 Épaisseur de film variable

Des études expérimentales des films liquides laminaires ont montré que l'interface gazliquide n'est pas constante, dans une surface plane, mais présentait une structure ondulée aux nombres de Reynolds aussi bas que 20.

Kapitsa [21] 1965, a analysé les chutes de films, l'écoulement ondulatoire observé, prise en compte des effets de la tension superficielle. L'argument de Kapitsa indique que la tension superficielle joue un rôle significatif dans l'hydrodynamique des films en chute libre, car l'ampleur relative de la force de tension superficielle est comparable aux forces visqueuses agissant dans les films liquides minces.

La prédiction de l'épaisseur du film liquide dans l'équation (1.28) bien en accord avec les données expérimentales obtenues, et était d'une forme similaire, mais toujours inférieure à celle de Nusselt (1916).

$$\delta = \left[\frac{2.4\nu Q_{\nu}}{gW\cos\theta}\right]^{(1/3)} \tag{1.28}$$

Ou, Q_v est le débit volumique, v est la viscosité cinématique et W est la largeur du canal. La théorie de Kapitsa (1965) explique la nature ondulée des films tombants uniquement si la longueur d'onde soit inférieure à 13,7 fois l'épaisseur du film, ce qui correspond à un nombre de Reynolds de 50 pour un film d'eau tombant verticalement.

1.7 Laminoirs à chaud et à froid

Le laminage à chaud et à froid fait partie du processus moderne de fabrication de l'acier et exige une amélioration continue des coûts, qualité, nuance et rendement des aciers produits et réduction de l'impact environnemental. Des pulvérisateurs d'eau sont utilisés pour obtenir des vitesses de refroidissement rapides et uniformes, qui sont nécessaires pour s'assurer que chaque étape de la fabrication permet d'obtenir la microstructure et les propriétés mécaniques uniformes correctes de l'acier. Chaque usine a sa propre personnalité et présente différentes solutions d'ingénierie. Dans les laminoirs à chaud, le refroidissement des produits, tels que le rond à béton et les tôles en acier, est primordial. La forme et la planéité des produits nécessitent également l'utilisation précise des bons systèmes de refroidissement par pulvérisation dans le laminoir à froid.

1.7.1 Description du processus

La fonction du laminoir à chaud est de réduire l'épaisseur de la brame entrante de la coulée continue à l'épaisseur requise pour différents produits, qui sont des barres, des billettes. Les produits finis sont soit transférés au laminoir à froid pour un traitement ultérieur, soit utilisés directement, comme dans l'ingénierie de la construction.

Le chemin de processus de base du laminoir à chaud est illustré schématiquement à la Figure 1.24, et il est constitué d'un four de réchauffage pour chauffer la brame à environ 1100 °C, suivi d'un détartrage, laminage de dégrossissage et finition. Le processus final est le refroidissement de la table de sortie, où la température de la bande est réduite à environ 500 °C avant que la bande ne soit enroulée en rouleaux.

Après le laminage à chaud, de nombreux produits en acier subissent un traitement supplémentaire à froid, la température de l'acier se situant autour de la température ambiante. Cette étape de traitement ne modifie pas la forme du produit en acier, mais elle réduit son épaisseur, jusqu'à 0,15 mm d'épaisseur, cela dépend de l'application finale des produits, et améliorer considérablement ses performances caractéristiques.



Fig. 1.24. Schéma du processus de laminage à chaud [22].

1.7.1.1 Laminoirs réversibles d'ébauche et de finition (Laminage à chaud)

Une fois que la brame d'acier est soumise au processus de détartrage, il passe ensuite dans le dégrossisseur inversé environ cinq fois et les cages de finition afin de réduire l'épaisseur de la brame à l'épaisseur finale de bobine laminée à chaud.

À des températures de bande d'acier allant jusqu'à 1200 ° C, la grande quantité de travail déjà effectuée par les rouleaux dans les usines de dégrossissage et de finition, la température des rouleaux augmente considérablement. Le refroidissement des rouleaux est une tâche critique, de nombreuses recherches et développements ont été menés pour comprendre la physique impliquée dans les mécanismes de transfert de chaleur et de dynamique des fluides. Les principales raisons d'utiliser des sprayers dans cette partie du procédé sont, d'une part, prolonger la durée de vie des rouleaux en limitant leur température de surface à environ 80°C. Ensuite pour mieux contrôler le profil de bande en contrôlant la dilatation thermique des rouleaux. Le profil et la planéité des bandes sont des mesures importantes de la qualité du produit qui doivent être contrôlées.

En général, le refroidissement s'effectue sur les deux côtés des rouleaux de travail supérieurs et inférieurs, couvrant toute la surface du rouleau dans le sens longitudinal, illustré schématiquement dans la Figure 1.25.



Fig. 1.25. Positions des systèmes atomiseurs pulvérisant les rouleaux de travail [16].

1.7.1.2 Table de sortie (Laminar cooling).

Il s'agit de la dernière étape du processus de laminage à chaud et se situe entre la cage de finition finale et l'enrouleur et sert à refroidir la bande jusqu'à la température de bobinage requise, typiquement 500°C. Le refroidissement est obtenu par une combinaison de refroidissement air/eau.



Fig. 1.26. Tables de sortie avec les bancs de refroidissement (a) et les buses de pulvérisation (b)

[16].

En général, le but de la table de sortie est de fournir des moyens pour accélérer le refroidissement de la bande et de permettre de contrôler la vitesse de refroidissement de la bande.

Un refroidissement contrôlé est nécessaire pour plusieurs raisons : modification de la structure, la réduction de la formation de tartre superficiel, la prévention de la déformation ultérieure des bandes, facilité de manipulation, la protection des installations et des machines et la réduction de la longueur du laminoir à bandes à chaud. Sur une table typique, il y a 20 bancs de refroidissement laminaire sur les surfaces supérieure et inférieure de la table, comme illustré à la Figure 1.26 (a).

Sur le côté de certaines tables de sortie, il y a aussi ce qu'on appelle des sprayers soufflants, comme la Figure 1.26 montre (b), Il s'agit de retirer l'eau de surface du haut de la bande entre les bancs collecteurs de refroidissement de l'eau.

Les pulvérisateurs de soufflage ayant généralement deux avantages :

- 1. l'efficacité des batteries de collecteurs de refroidissement est augmentée.
- 2. l'évacuation de l'eau de surface permet, dans des cas précis, de surveiller la température d'enroulement.

Dans le cas de produits plats, l'étape suivante du processus est la réduction à froid de l'épaisseur du produit.

1.7.1.3 Décapage, réduction à froid, galvanisation et revêtement.

Avant d'envoyer les produits laminés à chaud au laminoir à froid, la bobine dite laminée à chaud est déroulée et poussée automatiquement dans le bain d'acide pour décapage, afin de nettoyer la surface de la bande à l'aide d'acide chlorhydrique puis enduite d'huile avant laminage à froid. Pour le rinçage final et le nettoyage de la surface, il existe des buses de pulvérisation à jet plat successivement utilisées. Après que la bande quitte le bain acide, de nos jours, le processus restant est essentiellement continu, comme la Figure 1.27 (b) montre. En fonctionnement continu, la bande tourne à travers plusieurs machines à tourner à 90 degrés Figure 1.27 (a) et va directement aux laminoirs de réduction à froid.



(a)

(b)

Fig. 1.27. Tourneur typique à 90 degrés (a) dans un laminoir à froid continu (b) [16].

L'acier réduit à froid est rendu ductile à nouveau dans les fours de recuit et reçoit une finition de surface finale dans n'importe lequel des laminoirs à revenu.

Une partie de l'acier réduit à froid est envoyée à la ligne de galvanisation, ce qui donne à l'acier une couche protectrice de zinc, utilisé pour différentes applications telles que dans les industries de la construction. Tout au long de ces processus continus, les buses de

pulvérisation sont largement utilisées soit pour le nettoyage de la surface de la bande, même dans les fours de recuit, ou pour le refroidissement des rouleaux et le contrôle de la planéité des produits laminés.

2. Introduction

Les films liquides en écoulement sur une surface sont observés dans une grande variété de phénomènes naturels et sont également utilisés dans les procédés industriels pour leur grande efficacité thermique. Les films liquides trouvent leurs applications, en chute sur des surfaces verticales ou inclinées sous l'influence de la gravité dans les condenseurs, les évaporateurs, les réacteurs chimiques et les absorbeurs ; ainsi que dans le refroidissement des plaques horizontales hautement chauffées dans le domaine de production des aciers.

Le refroidissement par jet impactant à connu une évolution importante durant ces dernières décennies, puisqu'il permet la prédiction du flux thermique local et moyen sur la surface chauffée, ayant un impact important sur la formation de la structure des matériaux. Le refroidissement par pulvérisation avec des sprayers est très répandu dans le domaine de la préparation des aciers, Abassi [23] dans ses travaux a conclu que le transfert de chaleur dépend du flux massique de pulvérisation locale ; et que des fluides dispersés sous sprayer jouent un rôle très important pour obtenir des métaux et des aciers avec des caractéristiques spécifiques d'après Bratuta et Zanotchkine [24]. La dispersion du fluide est l'un des principaux facteurs déterminant l'intensité du transfert thermique pendant le refroidissement avec toute sa complexité, à savoir la quantification du volume dispersé V par unité de surface S et l'unité de temps (s) selon Tebbal [25].

Nombreuses études expérimentales ont été menées dans le domaine du refroidissement par sprayer, Bolle et Moureau [26] ont étudié expérimentalement et théoriquement la sensibilité de l'effet de refroidissement par pulvérisation d'une plaque chauffée de 600 à 1100 °C, ou le débit massique du liquide à une influence prédominante sur l'intensité du transfert de chaleur. Choi et Yao [27] ont étudié expérimentalement la pulvérisation à impact horizontal, et ont trouvé que le transfert thermique par ébullition en film est principalement gouverné par le débit massique du liquide et que le sens d'impact du jet influe sur le transfert de chaleur. L'étude de l'hydrodynamique des films liquides est très présente dans la littérature, Nusselt [7] a été l'un des premiers à proposer un modèle laminaire pour l'écoulement d'un film

liquide, il a analysé théoriquement la chute des films liquides, en supposant un écoulement rectiligne régulier avec une interface gaz-liquide plane, lisse et sans cisaillement.

Depuis le travail de Kapitsa [28] en 1949, en vue d'applications industrielles et sa richesse fondamentale, plusieurs investigations ont été conduites quant à la mesure des paramètres hydrodynamiques du film liquide tels que la vitesse et son épaisseur.

L'objet du deuxième chapitre, est de présenté nécessairement une analyse fine des divers travaux existants et montrant les diverses techniques de mesures.

2.1. Travaux expérimentaux

2.1.1. Épaisseur du film

Kirkbride [29] en 1933, est l'un des premiers à mesurer l'épaisseur du film liquide en chute, utilisant un micromètre, il a trouvé que Nusselt [7] à sous-estimé l'épaisseur du film moyen. Plusieurs et différents techniques ont été utilisées pour mesurer les caractéristiques du film liquide, notamment l'extinction du faisceau lumineux, les sondes de contact physique, et les techniques de traceur radioactif utilisé par Fulford [30] 1964.

Dukler et Bergelin [31] 1952, ont développé une nouvelle théorie basée sur le profil de vitesse. Ils ont mesuré l'épaisseur du film liquide et le profil de vague sur une plaque verticale par des sondes capacitives, leurs résultats, à faible nombre de Reynolds bien en accord avec la nouvelle théorie ainsi que ceux de Nusselt [7].

Portalski [32] 1963, à mesuré l'épaisseur de film liquide d'eau-glycérine tombants sur une plaque verticale lisse, la technique de mesure consiste à collecter un volume dans un récipient à l'extrémité, connaissant la surface de la plaque et le volume collecté, l'épaisseur moyenne du film peut être calculée, l'expérience a été faite pour de faibles nombres de Reynolds, inférieurs à 400.

Telles et Dukler [33] 1970, ont effectué une étude expérimentale sur la chute d'eau dans des canaux rectangulaires parallèles utilisant des électrodes montées au mur pour mesurer l'épaisseur du film au nombre de Reynolds de 900-6000, leurs résultats ont indiqué qu'à faibles nombres de Reynolds, environ 40 % de la masse liquide était transportée par les vagues.

Nakoryakov et al. [34-35] 1976-1977, ont mesuré l'épaisseur du film liquide artificiellement oscillé à l'extérieur d'un tube vertical, à des nombres de Reynolds allant de 20 à 50, par les

méthodes de l'oscillogramme et shadowgraph. Les mesures d'épaisseur de film concordent avec celles de Nusselt [7], sur la base des profils de vitesse calculés.

Salazar et Marschall [36] 1978, ont mesuré l'épaisseur de film liquide tombant sur une plaque verticale, utilisant une technique de dispersion de la lumière, à l'aide des particules de latex dans le fluide en détectant des changements de la longueur d'une colonne de lumière dispersée. À des nombres de Reynolds allant de 145-4030, une comparaison importante avec les mesures précédentes, qui ont donné une bonne concordance avec ceux de Portalski [32].

Takahama et Kato [37] 1980, ont mesuré l'épaisseur d'un film « minimum et maximum » d'eau tombant sur la face extérieure d'un tube de laiton, à l'aide d'une capacité électrique. Une formule pour l'épaisseur moyenne du film a été présentée, basée sur l'équation (1.25) de Nusselt [7]. Leurs résultats indiquent que l'épaisseur minimale du film est indépendante du nombre de Reynolds. Cependant, l'épaisseur maximale du film dépend fortement de nombre de Reynolds, tout comme l'épaisseur moyenne du film.

Karapantsios et al. [38] 1989, à étudié la chute du film d'eau, et a mesuré l'épaisseur du film par l'addition de fils parallèles. Leurs résultats étaient conformes aux résultats révélés par Telles et Dukler [33], et de nouvelles données ont été fournies concernant la nature des fluctuations d'épaisseur de film jusqu'à un nombre de Reynolds d'environ 500.

Karapantsios et Karabellas [39-40] 1990-1995, ont utilisé les mêmes appareils, fluides de fonctionnement, et technique de mesure que Karapantsios et al. [38] et ont fourni des comparaisons utiles des mesures d'épaisseur de film à ceux prévus par Nusselt [7] à un nombre de Reynolds aussi bas que 370, et ont présentés de nouveaux ajustements à l'équation proposée par Takahama et Kato [37].

Karimi et Kawaji [41] 1996, à l'aide d'une sonde de déplacement de laser, dans laquelle un faisceau a été émis, reflété outre de la surface de film, et détecté avec une tension correspondant à l'épaisseur de film, a donné des résultats similaires que ceux des enregistrements visuels à grande vitesse de l'épaisseur de film en fonction du nombre de Reynolds. Une nouvelle corrélation semblable à celle proposée par Takahama et Kato [37] a été présentée.

Takamasa et Hazuku [42] 2000, ont présenté expérimentalement une nouvelle façon de mesurer les ondes interfaciales, épaisseur, et la vitesse du film s'écoulant le long d'une plaque

verticale dans une région d'entrée, utilisant la méthode de mesure LFD (Laser Focus Displacement meter). Les résultats de la vitesse des ondes et de l'épaisseur maximale du film montrent un bon accord avec les études expérimentales et théoriques précédentes.

Moran et al. [43] 2002, ont appliqué une technique d'activation de colorant photochromique et la photographie vidéo à haute vitesse, Des mesures ont été effectuées pour déterminer l'épaisseur du film, avec les caractéristiques de films laminaires d'huile de silicone sur une plaque inclinée, avec un nombre de Reynolds variant entre 11 et 220. Ils ont trouvé que les données de vitesse moyenne et maximale sont considérablement surestimées par la théorie de Nusselt [7], tandis que les données sur l'épaisseur du film sont légèrement sous-estimées.

Tebbal et Mzad [13] 2004, ont étudié expérimentalement le profil d'un jet d'eau sous pulvérisateurs liquides sur une surface plane comprenant les paramètres déterminants, tels que les caractéristiques géométriques de la buse et la pression, et des corrélations ont été établis et comparées aux données expérimentales.

Mzad et Tebbal [44] 2009, ont effectué la simulation pour huit pulvérisateurs différents, dans la gamme de pression de fluide éjectée entre 1 bar et 3 bars. Les données expérimentales sont utilisées pour étudier l'influence de la fonction g(x, y), de dispersion de l'eau, sur les variations de transfert de chaleur sur une surface à la température de 600 ° C. Des courbes ont été générées l'historique de la température de l'acier pour l'extraction d'un flux de chaleur élevée de l'ordre de 300 W/cm². Aussi, il a été observé que pour des températures plus basses, le coefficient de transfert de chaleur local a considérablement augmenté.

Benilov et al. [45] 2010, analysé deux problèmes du film liquide sur une plaque incliné, la couche liquide s'écoule le long d'une plaque, et la condition d'entraînement des films. De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la vitesse et l'épaisseur du film liquide.

Tibiriça et al. [46] 2010, utilisé deux méthodes pour mesurer l'épaisseur du film liquide pendant la condensation et l'évaporation dans des conditions macro et micro-échelle. Ils ont découvert que la méthode à micro-échelle était capable de mesurer des films minces.

Mzad et Elguerri [47] 2012, ont réalisé une étude hydrodynamique à l'aide d'un programme de simulation basée sur les corrélations expérimentales de l'eau pulvérisée dans la zone d'intersection des jets.

Huang et al. [48] 2014, ont construit un système expérimental pour étudier l'écoulement à contre-courant de l'eau-air dans un canal rotatif rectangulaire à grande échelle. Les résultats de leurs expériences montrent que l'entraînement des gouttelettes, entraîné par le flux d'air à grande vitesse à un impact sur les grandes ondes de surface réduirait considérablement l'épaisseur moyenne du film, particulièrement pour l'état d'une plaque verticale ; l'augmentation du nombre de Reynolds entraîne l'apparition d'une onde qui contient beaucoup de masse liquide.

Choual et Tebbal [15] 2017, ont montré expérimentalement que la dispersion du fluide dans la zone d'intersection des deux jets est différente de la dispersion obtenue par sommation des deux jets pour différents atomiseurs hydrauliques.

Du et al. [49] 2018, ont réalisé une analyse expérimentale pour étudier l'écoulement du film d'eau tombant sur une surface ellipsoïdale à grande échelle sous un nombre de Reynolds variant entre 360 et 2175. Ils ont proposé une nouvelle corrélation empirique de l'épaisseur du film sur la surface du dôme ellipsoïde qui donne un bon accord avec d'autres corrélations de l'épaisseur du film rapportées dans la littérature.

Ouldrebaï et al. [50] 2019, proposé une nouvelle méthode basée sur la réflexion de la lumière pour mesurer l'épaisseur d'un film liquide s'écoulant sur un plan incliné dans plusieurs positions. D'un autre côté, Cai et Zhuo [51] 2020, ont étudié numériquement l'hydrodynamique de l'écoulement du film liquide sur une plaque inclinée. Leurs résultats montrent que lorsque l'angle d'inclinaison de la plaque augmente, la mouillabilité du film liquide se détériore, ce qui peut entraîner des éclaboussures de gouttelettes.

2.1.2. Mesure de vitesse et le profil de vitesse

Expérimentalement dans la chute du film liquide, les profils de vitesse sont très difficiles à mesurer, en raison de la nature mince qui représente des millimètres.

Grimley [52] 1945, l'un des premiers à réalisé des mesures de profil de vitesse pour la chute d'un film d'eau. Une technique de mesure ultramicroscope à été effectuée pour suivre les particules colloïdales en suspension dans le film.

Clayton [53] 1958, à utilisé une technique chronophotographique, et à mesuré la vitesse de la chute des films dans le régime laminaire lisse leurs résultats étaient en accord avec ceux de Nusselt [7].

Wilkes et Nedderman [54] 1962, a utilisé une méthode de photographie stéréoscopique de petites bulles qui se déplaçaient avec le liquide, pour obtenir des profils de vitesse au sein d'un film ondulé. Leurs résultats montrent que dans le cas d'un film ondulé le profil restait approximativement parabolique comme dans le cas d'un film plat avec une déviation maximale d'environ 20%.

Une nouvelle technique électrochimique, a été signalée pour la première fois par Reiss et Hanratty [55] 1962-1963, appliqué à la chute de films liquides pour obtenir des profils de vitesse. Similaires à celles utilisées pour les mesures d'épaisseur de film.

Portalski [56] 1964, a pu établir une méthode expérimentale permettant de mesurer directement la vitesse de chute des films liquides, pour un domaine étendu de vitesses d'écoulement, des mesures de vitesse donnant la vitesse superficielle du film ont été comparées avec la vitesse moyenne de l'écoulement, un rapport a été établi valant 1,5. Il a retrouvé que le profil de vitesse n'était pas beaucoup modifié comparativement à celui du film plat.

Cook et Clark [57] 1971, ont utilisé une technique stéréoscopique, à l'aide d'une télémicroscope et d'une caméra à grande vitesse. La méthode impliquait la photographie de particules d'oxyde d'aluminium de la taille d'un micron dispersées dans un film d'eau tombant sur une plaque verticale. Leurs résultats en accord avec plusieurs études précédentes, le profil de vitesse est parabolique.

Portalski et Clegg [58] 1972, ont utilisé trois différents fluides, l'eau et deux solutions d'eau-glycérine, et ont fait varier le nombre de Reynolds entre 17.7 et 375 pour un cas instable. Ce travail concernant la transition des ondes vers l'état solitaire dans lequel l'amplitude s'amplifie et l'épaisseur moyenne du film devient plus petite. A l'aide d'une caméra qui leur a permis de capturer une grande partie du canal d'étude 30 cm, ils ont prélevé des photographies de l'écoulement et ils ont montré qu'avec des très faibles amplitudes, les instabilités interfaciales ont toujours existé et la précision des appareils de mesure utilisés joue le rôle de détection. Les images ont été traitées par un ordinateur, le profil est présenté par la Figure 2.1.



Fig.2.1. Variation de l'épaisseur de film le long de la conduite d'étude pour une solution d'eau-glycérine [58].

Nakoryakov et al. [59] 1977, ont développé une nouvelle technique, impliquant deux méthodes synchronisées, qui a permis la mesure instantanée des profils de vitesse dans les films liquides tombants. La méthode du shadow-graph, pour déterminer l'épaisseur du film liquide et les profils de vitesse, d'une manière similaire à celle décrite par Cook et Clark [57] 1971, des particules sphériques d'aluminium ont été photographiées, et la trace temporelle enregistrée sur un film photographique a permis de calculer les profils de vitesse.

Alekseenko et al. [60] 1985, sur une surface extérieure d'un tube en acier inoxydable poli en stainless steel avec Re allant de 20 à 50, ont étudié un film d'eau qui tombe verticalement. Leurs résultats indiquent que dans les régions entourant immédiatement les vagues, les fluctuations du profil de vitesse étaient très importantes, et aucun ajustement parabolique n'a été présenté pour les données de cette région.

Koziol et al. [61] 1981, ont étudié la chute des films liquides dans des canaux rectangulaires inclinés et ont calculé la vitesse moyenne à partir des données. Le canal incliné à un angle de 20° à l'horizontale, sur une plage de débit de Re = 500-3000 l'eau a été utilisée comme fluide de travail. Aux débits volumétriques connus, la quantité de liquide sur la surface solide a été déterminée, à partir de laquelle l'épaisseur du film a pu être calculée. En divisant le débit massique par unité de largeur par l'épaisseur et la densité du film, et on déterminé la vitesse volumétrique moyenne.

Mudawar and Houpt [62] 1993, utilisant la méthode de mesure Laser Doppler Velocimetry, l'écoulement à film tombant a également été étudié à l'extérieur d'un tube vertical avec un mélange des films très visqueux de propylène-glycol tombant, dans la plage d'écoulement de

Re = 209-5000, de petites bulles d'air sont utilisé pour faciliter le fonctionnement de l'appareil LDV. Un grand degré de fluctuation été observé, avec des profils de vitesse parabolique ont été obtenus. Les profils de vitesse sans dimension donnent un bon accord avec les données rapportées par Cook et Clark [57] 1971.

Adomeit et Renz [63] 2000, ont observé la morphologie des vagues de l'écoulement du film. Ils ont constaté des changements remarquables dans le comportement de l'écoulement et la structure des vagues lorsque le nombre de Reynolds est proche d'un certain point de transition, et ils ont utilisé la méthode PIV (Particle Image Velocity) pour mesurer la vitesse du film liquide.

Fábio S. de Oliveira et al [64] 2006, ont développé une technique de mesure de l'épaisseur et de la vitesse du film en utilisant la mesure d'intensité laser dans l'écoulement du film liquide. Un modèle théorique a été proposé pour les phénomènes optiques présents dans la mesure de l'épaisseur du film et ses résultats ont été comparés aux résultats expérimentaux. Les résultats expérimentaux pour l'épaisseur du film présentaient un bon accord avec l'épaisseur de référence à partir des données photographiques. Les vitesses de propagation des ondes d'interface ont été mesurées avec une bonne précision, montrant un bon accord avec les données théoriques.

Alekseenko et al [65] 2007, A l'aide de la technique PIV, les champs de vitesse instantanée sont mesurés dans un film liquide s'écoulant dans un tube incliné. Les régimes d'ondes régulières ainsi que les régimes avec une amplitude d'ondes extrêmement grande, correspondant au début du détachement de goutte, sont étudiés. Des profils de vitesse du liquide sont obtenus pour différentes sections transversales d'ondes non linéaires développées. Il est montré que l'augmentation de l'amplitude des ondes modifie légèrement l'emplacement du centre du vortex. La modification du caractère de mouvement du vortex est due aux conditions d'écoulement ondulé, telles que l'angle d'inclinaison du tube, le nombre de Reynolds du film, la fréquence d'excitation d'onde.

Yu et Cheng [66] 2014, ont réalisé une étude expérimentale de l'écoulement d'un film liquide en chute libre sur une plaque verticale et inclinée avec un nombre de Reynolds différent (50-3600). Les résultats montrent qu'avec l'augmentation du nombre de Reynolds, les ondes solitaires de l'écoulement du film se développent à partir d'ondes à faible vitesse de haute fréquence et de courte longueur d'onde vers des ondes à haute vitesse de basse fréquence et de longue longueur d'onde.

Charogiannis et al. [67] 2015, ont décrit une technique de mesure simultanée basée sur l'imagerie par fluorescence induite par laser planaire (PLIF) et la vélocimétrie d'image de suivi de particules (PIV/PTV) pour l'étude des caractéristiques hydrodynamiques des écoulements de couches minces liquides. Des données d'épaisseur de film liquide et de champ de vitesse résolues spatio-temporellement ont été générées. Ainsi des profils de vitesse locaux instantanés le long de la structure d'onde solitaire sont fournis.

Wang et al. [68] 2021, ont réalisé une expérience d'écoulement de film, la méthode expérimentale a été validée par une comparaison avec les résultats expérimentaux de vélocimétrie par images de particules et de fluorescence induite par laser planaire (PIV/PLIF). Le champ de vitesse instantanée et la structure de film liquides tombants perturbés ont été mesurés simultanément à l'aide de la technique PIV/PLIF pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques d'écoulements de film mince.

Expérimentalement, les caractéristiques hydrodynamiques des films liquides ont été étudiées profondément dans le passé, en particulier l'épaisseur et la vitesse du film liquide, qui indique l'état des écoulements de film.

Diverses expériences ont tenté de mesurer les vitesses dans la chute des films liquides depuis les années 1950, et les techniques appliquées comprennent l'anémométrie à fil chaud [69], photographie stéréoscopique [70], anémométrie laser Doppler (LDA) [71-72], photographie vidéo à grande vitesse [73-74], vélocimétrie par images de particules (PIV) [65-75], Mesure de la vitesse de suivi des particules (PTV) [67].

2.2. Analyse des techniques de mesures expérimentales du film liquide

Une nouvelle classification proposée par Tibiriça et al. [46] 2010, basée sur le principe de mesure et la nature de signal afin de regrouper les méthodes qui ont une base similaire et les décrire de manière organisée. Les méthodes ont été classées comme suit :

- 1. Acoustique.
- 2. Electrique.
- 3. Optique.
- 4. L'absorption par le fluide d'un rayonnement.

2.2.1. Les techniques acoustiques

Les méthodes acoustiques sont basées sur les ondes ultrasoniques et ont été un outil puissant pour caractériser les écoulements diphasiques et mesurer l'épaisseur du film liquide. Les ondes ultrasonores sont atténuées et réfléchies lorsqu'elles traversent des discontinuités d'un milieu à l'interface liquide-gaz.

Lu et al. [76] 1993, dans une conduite rectangulaire de 40 mm de longueur et 25 mm de largeur, ont réalisé des mesures d'épaisseur de film liquide sur deux liquides expérimentaux le R113 et le FC-72. Cinq capteurs ultrasonores été fixés à des endroits différents le long du tube avec une fréquence d'émission de 20 MHz pour obtenir une mesure d'épaisseur inférieur à 0.3 mm. La méthode utilisée par Lu et al. Ne convenait pas à des films fortement ondulés, comme le rapportent les chercheurs d'après.

Pedersen et al. [77] 2000, une technique ultrasonore a été développé et utilisée pour mesurer l'épaisseur de film liquide s'écoulait sur un plan incliné pendant sa condensation. Des fréquences allant jusqu'à 10 MHz sont utilisé pour mesurer l'épaisseur du film liquide de 50 à 500 μ m, des ondes périodiques sont introduite à l'interface liquide-gaz et ils ont fait une analyse spectrale des ondes réfléchies.

Carvalho et al. [78] 2008, ont utilisé la même technique ultrasonore pour caractériser l'écoulement vertical ascendant de bulles d'air et d'eau. Des résultats satisfaisants ont été obtenus à travers le spectre d'intensité des ondes ultrasonores.

2.2.2. Les techniques électriques

Les méthodes basées sur la conductance électrique, cette technique est simple et largement utilisées par les chercheurs pour quantifier l'épaisseur du film liquide.

La méthode consiste à imposer une différence de potentiel électrique entre l'électrode et à mesurer le courant résultant.

Özgü et al. [79] 1973, les premiers qui ont utilisé les méthodes basées sur la variation de la capacité électrique, une sonde de mesure en laiton à été développé et installé entre deux plaques chargées lors du passage d'un liquide entre eux basée sur la variation de la capacité.

Coney et al. [80] 1973, ont conçus des électrodes à base de bandes métalliques séparées par un isolateur afin de mesurer les épaisseurs de film liquide jusqu'à 2.5 mm. La fréquence choisie pour les mesures d'épaisseur de film était de 50 KHz.

Thwaites et al. [81] 1976, afin de mesurer l'épaisseur du film liquide, la fréquence et la vitesse des ondes dans un tube vertical d'un écoulement diphasique eau-air ont utilisé cette technique pour atteindre des épaisseurs de film jusqu'à 0,1 mm.

Laurinat et al. [82] 1984, ont utilisées différentes configurations de sondes pour mesurer l'épaisseur du film liquide autour de la circonférence du tube pour les écoulements annulaires air-eau dans des tubes horizontaux. Deux fils parallèles pour les films plus épais et des plaques encastrées dans le cas de films plus fins. Des sondes espacées à 45° intervalles autour du tuyau ont été utilisées.

Lyu et Mudawar [83] 1991, une nouvelle sonde a été développée pour la mesure de l'épaisseur du film. La technique de mesure réalisée sur un mur vertical chauffé ou le film liquide ondulé s'écoule, l'adaptation de la sonde d'épaisseur dans les expériences impliquant des mesures simultanées de l'épaisseur et du profil de température à travers le film. La sonde de mesure est sous forme d'un fil électrique de très faible diamètre 0.0254 mm partiellement immergé à la vertical dans le film basant sur la différence entre la partie sèche lors du passage d'un courant à intensité constante et la résistance électrique de la partie mouillé. La sonde d'épaisseur a été construite à partir d'un fil de platinum-rhodium qui a été étiré à travers le film.

Un schéma représentatif de la sonde utilisée pour la mesure de l'épaisseur du film liquide dans la Figure 2.2.



Fig. 2.2. Construction de la sonde de calibration [83].

Une corrélation entre l'épaisseur du film liquide et le voltage imposé par les hypothèses de Lyu et Mudawar.

La Figure 2.3 montre des exemples de la façon dont les données de calibrage sont obtenues en comparant les valeurs de signal de la sonde d'épaisseur aux courant correspondantes détectées par la sonde de calibration à des distances connues de la sonde de calibration par rapport au mur.





Fig. 2.3. Signal de la sonde d'épaisseur et la sonde de calibration à deux distances différentes [83].

Cette nouvelle technique offre de nombreux avantages par rapport aux autres techniques de mesure de l'épaisseur. Les principaux avantages sont les suivants:

1- Contrairement à tous les types de sonde d'épaisseur d'admission électrique, la nouvelle sonde ne nécessite pas la dissolution d'un électrolyte dans le liquide. Cela rend la nouvelle sonde adaptable aux expériences impliquant le chauffage d'un film qui est en contact direct avec une paroi conductrice de courant.

2- La nouvelle sonde produit un enregistrement continu de l'épaisseur du film.

3- Les effets du bruit externe sont négligeables par rapport aux grandes variations du signal détecté.

4- La nouvelle sonde est montée à l'extérieur du mur et peut être facilement déplacée pour mesurer l'épaisseur du film à différents emplacements longitudinal. Montage externe facilite l'adaptation de la sonde dans les expériences de transfert de chaleur qui empêchent toute alternance mécanique au mur et nécessitent l'utilisation d'autres instruments pour la mesure de la température dans le film.

Klausner et al. [84] 1992, ont développé une sonde d'épaisseur de film basée sur des mesures de capacité électrique, utilisée pour mesurer l'épaisseur du film liquide sur la surface supérieure et inférieure d'un tube horizontal dans un milieu diphasique. Le capteur peut être utilisé dans des champs d'écoulement dépendant de la température. La sonde d'épaisseur de

film liquide a été calibrée à température ambiante et testée dans une installation d'ébullition du réfrigérant R113 sur une plage de température de 60°C. Les mesures effectuées sur une plage d'épaisseur de film de 1 à 25 mm à l'aide de la sonde capacitive sont en accord avec les mesures optiques effectuées avec une caméra.

Kang et Kim [85] 1992, pour améliorer la résolution spatiale pour la mesure continue des épaisseurs de film liquide, ont proposé une nouvelle sonde de conductance, appelée sonde à fil affleurant. La technique est basée sur deux procédures pour un débit fixe. Ils ont d'abord mis la sonde en mode contact et faire scannée jusqu'à ce que la sonde touche le film liquide. Ensuite la sonde a été mise en mode conductivité et insérée dans le film. L'histogramme de conductivité généré a été utilisé pour calibrer le système avec l'épaisseur mesurée par le mode de contact. Ils ont pu à mesurer l'épaisseur du film dans la plage de 50 à 350 µm.

Les problèmes associés à cette méthode sont les suivants : la nécessité d'insérer une sonde dans l'écoulement affectant la fiabilité de la mesure, le vieillissement de la sonde et le dépôt de sédiments sur les sondes, qui peuvent également affecter les résultats. Thorncroft et Klausner [86] 1997, ont utilisé une méthode pour mesurer l'épaisseur du film liquide pour les écoulements diphasiques horizontaux, vertical ascendant et vertical descendant à l'aide de plaques parallèles. A l'aide d'un appareil commercial, les mesures de capacité ont été prises et la valeur totale présente une erreur de 0.1%. Des courbes de températures pour les capacités électriques du liquide et de la vapeur ont été obtenues. Une technique de photographie par une caméra CCD été utilisée pour valider les résultats obtenues pour l'épaisseur dans la phase liquide.

Les erreurs estimées pour le cas descendant est de ± 0.25 mm et pour le cas ascendant ± 0.53 mm. L'écart type entre les deux techniques était de l'ordre 0.173 mm.

Fukano [87] 1998, a développé une nouvelle technique pour mesurer des épaisseurs du film liquide ondulatoire, de l'ordre de 0.12 mm. Une bulle d'air est suivie pendant son déplacement, une comparaison entre des photographies prises à l'aide d'une caméra et les variations du voltage aux bornes des électrodes.

La nouvelle technique (CECM) Constant Electric Current Method, permet de mesurer l'épaisseur de la phase liquide dans un milieu diphasique.

Cette technique présente des propriétés plus importantes :

- Application d'une source de courant électrique continu.
- L'existence de deux types d'électrodes : pour fournir le courant électrique une première paire est utilisée et la deuxième paire joue le rôle d'une sonde de détection de l'épaisseur du film liquide dans une conduite.

La Figure 2.4 représente deux configurations de sondes :

- 1. Les couronnes concentriques.
- 2. Alignées.

Le problème lié à cette méthode est le fait que le signal donné par les électrodes est saturée, si la distance entre les électrodes du capteur est petite par rapport à l'épaisseur du film.



(1) Concentriques



(2) Alignées

Fig. 2.4. Vue schématique de la sonde de mesure d'épaisseur de film liquide [86].

Kumar et al. [88] 2002, ont utilisé deux sondes de conductivité à fil avec des diamètres de fil de 50 μ m, pour mesurer l'épaisseur du film liquide et la vitesse d'onde dans un canal rectangulaire de (6,35 mm de hauteur et 63,5 mm de largeur) pour des écoulements annulaires verticaux ascendants. La conductivité a été mesurée par l'application d'un signal de 100 KHz pour éviter une réaction ionique au niveau des électrodes et pour permettre une réponse temporelle rapide. L'analyse statistique montre que l'écart type de l'épaisseur du film est une bonne mesure de la rugosité du film.



Fig. 2.5. Pointe de la sonde à fil [88].

Burns et al. [89] 2003, ont présentée une méthode de mesure de l'épaisseur du film liquide sur une surface de disque tournant. Les concepts utilisés sont basés sur l'analyse de la résistance électrique du film liquide et sa relation avec l'épaisseur du film lorsque des tensions à haute fréquence sont appliquées. Une sonde de mesure a été développée sous forme de 12 électrodes circulaires concentriques en laiton intégrées dans un disque tournant représentée dans la Figure. 2.6.

Quatre liquides différents ont été utilisés avec un signal carré de 6 V d'amplitude et 850 Hz de fréquence dans cette expérience.





Le disque rotatif utilisé pour l'analyse de l'épaisseur du film a été construit à partir de Perspex et avait un diamètre de 30 cm présenté dans la Figure. 2.7.



Fig. 2.7. Électrodes circulaires en laiton intégrées à la surface du disque en Perspex [89].

Une comparaison avec le modèle de Nusselt est faite pour une large gamme de conditions de fonctionnement.

Jong et Gabriel [90] 2003, ont utilisée une technique constituée de deux paires de fils en acier inoxydable de 40 µm espacés de 2 mm et tendus sur la section transversale du tube verticale de 0.95 cm de diamètre interne dans les cas de la microgravité et de la gravité ordinaire. Ensuite, la conductance électrique entre les fils a été mesurée. Une sonde à aiguille micrométrique a été utilisée pour calibrer le capteur. L'objectif est de mesurer l'épaisseur du film liquide moyen, et la vitesse, les amplitudes maximale et minimale et la fréquence des ondes interfaciales au sein d'un écoulement diphasique. Les valeurs d'épaisseur de film jusqu'à 0,2 mm ont été mesurées avec une erreur de 0,045 mm.

La technique utilisée pour mesurer l'épaisseur du film liquide, est représenté dans un schéma de la section transversale dans la sonde illustrée dans la Figure. 2.8.

L'un des résultats obtenus montre qu'à partir des traces d'épaisseur de film, la hauteur minimale moyenne des amplitudes, l'épaisseur moyenne du film et la hauteur moyenne des ondes ont été calculées. La vitesse et la fréquence moyenne des ondes perturbatrices ont également été calculées à l'aide de techniques statistiques.



Fig. 2.8. Un schéma d'une sonde d'épaisseur de film individuelle [90].



Fig. 2.9. Un exemple de variation de l'épaisseur de film en fonction du temps [90].

Mazza et Rosa [91] 2006, ont utilisé une sonde conductrice à double fil dans un tube de 26 mm de diamètre pour mesurer l'épaisseur moyenne du film liquide d'une bulle pendant le passage des gaz dans un milieu diphasique.

2.2.3. Les techniques optiques

Parmis les techniques les plus utilisés, pour mesurer les caractéristiques hydrodynamiques du film liquide sont les techniques optiques. Cela est dû au fait que cette technique n'est pas intrusive et ne provoque pas des perturbations aux écoulements.

2.2.3.1. La méthode de détection d'Interface

Ce type de méthode est basé sur la détection des interfaces liquide-gaz et liquide-solide.

Ursenbacher et al. [92] 2004, ont développé une nouvelle technique optique représentée dans la Figure. 2.10, le rôle de cette technique est de détecter avec précision l'interface vapeurliquide dans un écoulement diphasique à l'intérieur d'un tube horizontal de 1.36 cm de diamètre. Pour mettre en évidence l'interface vapeur-liquide, un laser monochromatique de 532 nm de longueur d'onde est utilisé perpendiculaire à l'axe du tube. La Rhodamine B est un traceur fluorescent ajoutée à la phase liquide (R22 et R410A), pour réaliser des mesures. Une série de photographies ont été réalisé à l'aide d'une caméra à haute vitesse, afin de déterminer le taux du vide par analyse d'image informatisée.



Fig. 2.10. Schéma de la configuration optique [92].

Gstoehl et al. [93] 2004, ont réalisé une nouvelle méthode optique, pour mesurée l'épaisseur du film liquide comprise entre 80 µm et 1.4 mm qui s'écoule sur un tube horizontal de 19.05 mm de diamètre extérieur présenté dans la Figure 2.11. La Rhodamine B à été ajoutée aux liquides expérimentaux (eau, éthylène-glycol et eau-glycol).

La technique utilise une caméra vidéo numérique à grande vitesse, pour capturer les images de l'interface liquide qui est éclairées par une nappe laser, avec le contraste renforcé par une poudre fluorescente dans le fluide. Comparant ces images par une analyse informatisée, la hauteur du film est déterminée. Leurs résultats sont comparés à ceux prédits par la théorie du film de Nusselt, autour du périmètre supérieur du tube montrant un accord relativement bon mais un accord beaucoup plus médiocre sur le périmètre inférieur.



Fig. 2.11. Schéma de la configuration de mesure de l'épaisseur du film [93].

2.2.3.2. La méthode de variation d'intensité lumineuse

Ces méthodes sont basées sur la capacité d'un milieu transparent à absorber la lumière visible, par conséquent, l'intensité lumineuse est atténuée lors de son passage dans le milieu. Différents liquides absorbent le rayonnement à différentes longueurs d'onde, donc cette technique prend en compte non seulement la lumière visible, mais aussi l'infrarouge et les micro-ondes. Fondamentalement, cette technique implique une source de faisceau laser, une lentille et un capteur approprié. Un faisceau laser est couplé dans l'écoulement diphasique dans un canal transparent et son intensité est mesurée après avoir traversé le canal. Plus le film liquide est épais, plus l'atténuation lumineuse est importante.

L'utilisation de l'atténuation laser est décrite par Ohba et al. [94] 1992, où le rayonnement réfléchi par une interface gaz-liquide est mesuré. La variation de l'intensité du rayonnement réfléchi est liée à l'épaisseur du film. Le grand avantage de cette technique est que l'écoulement n'est pas perturbé. La mesure du flux total réfléchi se fait à travers la même fibre optique qui lance le laser au point de mesure. L'intensité du rayon réfléchi qui revient par la fibre optique est dirigée vers une photo détectrice qui mesure son intensité. Cette technique ne détecte l'épaisseur que lorsque l'interface est parallèle à la pointe de la fibre optique.

Une technique photométrique pour les mesures d'épaisseur de film présenté dans la Figure 2.12, décrite par Mouza et al. [95] 2000, l'épaisseur est déterminée en mesurant l'intensité du faisceau laser passant du fond du tuyau au film liquide et à travers le filtre à la photodiode de silicium. Puis ils ont ajoutée à l'eau le colorant bleu de méthylène pour améliorée l'absorption de la lumière, qui absorbe efficacement la lumière dans une gamme de longueurs d'onde où la source laser émet. Les mesures d'épaisseur de film liquide effectuées par photométrie sont comparées directement aux mesures prises simultanément avec une sonde de conductance à fil parallèle.



Fig. 2.12. Schéma de la configuration optique utilisée pour les mesures d'épaisseur de film [95].

Afin de mesurer l'épaisseur de la phase liquide Utaka et al. [96] 2004, ont appliqué une technique d'atténuation de la lumière autour d'une bulle d'air au cours de son processus de croissance qui se déplaçait dans une micro-conduite chauffée. La loi de Lambert a été utilisée pour déterminer l'épaisseur du film, en fonction de l'intensité du faisceau ayant un diamètre de 3 mm et une longueur d'onde de 632,2 µm. Un schéma du système de mesure est présenté dans la Figure 2.13.



Fig. 2.13. Dispositif expérimental de la technique de mesure [96].

2.2.3.3. La méthode de réflexion totale de la lumière

Le phénomène de réflexion totale et de réflexion partielle interne de la lumière peuvent être utilisé pour mesurer l'épaisseur du film liquide, qui nécessite une section d'essai transparente.

Lorsqu'un rayonnement passe d'un milieu transparent à un autre, une partie de son intensité est réfléchie par l'interface et une autre part vers le deuxième milieu, selon un angle de réfraction mesuré à partir d'une ligne normale à l'interface donnée par la loi Snell-Descartes.

Hurlburt et Newell [97] 1996, ont développée deux techniques optiques pour mesurer la surface d'un film liquide. Les deux techniques utilisent la réflexion interne totale qui se produit à une interface liquide-vapeur en raison de la différence d'indice de réfraction entre un liquide et une vapeur. La première technique est utilisée pour la détermination de l'épaisseur du film. Une caméra vidéo enregistre la distance entre une source de lumière et les rayons réfléchis par l'interface liquide-vapeur. Cette distance peut être montrée comme étant linéairement proportionnelle à l'épaisseur du film. Une représentation de la technique de mesure de l'épaisseur de film est présentée dans la Figure 2.14.


Fig. 2.14. Technique de mesure de l'épaisseur du film [97].

La deuxième technique mesure les vitesses des ondes de surface. Deux photosensors, espacés d'une distance fixe, sont utilisés pour enregistrer l'intensité variable dans le temps de la lumière réfléchie par l'interface liquide-vapeur. La vitesse est alors déduite du décalage temporel entre les deux signaux. Une représentation de la technique de mesure de la vitesse d'onde de film est présentée dans la Figure 2.15.



Fig. 2.15. La disposition des capteurs utilisés pour mesurer la vitesse des ondes [97].

Shedd et Newell [98] 1998, ont développé une technique de mesure optique de l'épaisseur du film. Dans cette méthode, la lumière est réfléchie par la surface d'un film liquide s'écoulant sur une paroi transparente. Cette lumière réfléchie génère une image à l'extérieur de la paroi qui est capturée et numérisée à l'aide d'un appareil photo à couplage de charge et carte de capture d'image dans un ordinateur de bureau. L'image est traitée pour déterminer les positions des rayons lumineux réfléchis, avec lesquels l'épaisseur du film est calculée. Des épaisseurs de film de l'ordre de 0,01 mm peuvent être déterminées à l'aide de composants peu coûteux, avec la possibilité d'une plus grande précision en utilisant un équipement d'imagerie plus avancé. La Figure 2.16 montre un schéma d'une configuration de mesure.



Fig. 2.16. Schéma des composants du système de mesure de l'épaisseur du film [98].

Une nouvelle méthode optique, a été développée par Xishi et Qiu [99] 2005, pour mesurer l'épaisseur du film liquide au sein d'un écoulement diphasique dans une conduite de diamètre interne 0.75 mm présentant un régime poche-bouchon.

Cette méthode est principalement basée sur la réflexion interne totale de la lumière, un laser qui produisait un faisceau très fin est utilisé comme une source lumineuse. A l'aide d'une caméra CCD les franges résultantes ont été filmées. Son signal a été traité afin d'obtenir l'épaisseur du film liquide qui est géométriquement liée à la variation de fréquence spatiale des franges réfléchies. Ils ont mesuré des épaisseurs de film de 9 à 30 μ m.

Une étude expérimentale a été effectuée par Pautsch and Shedd [100] 2006, pour mesurer l'épaisseur du film liquide pendant le refroidissement d'une puce électronique par pulvérisation avec le FC-72 créé à la fois par une buse unique à faible débit, puis quatre buses

à débit élevé sur la base du principe de la réflexion interne totale de la lumière. Une source de lumière monochromatique a été utilisée et une fine couche de peinture a été appliquée sur le côté non chauffé de la puce a refroidie pour diffuser la monochromatique.

2.2.3.4. La méthode basée sur les ombres laser à faisceau

Les méthodes basées sur les ombres impliquent une seule source de lumière collimatée et sont basés sur le fait que lorsque la lumière qui n'est pas perpendiculaire à l'interface atteint un deuxième milieu transparent, une partie de la lumière est réfléchie et une partie est réfractée. Cette distorsion crée une variation spatiale de l'intensité lumineuse qui peut être détectée par l'observation visuelle et un transducteur optique.

Zhang et al. [101] 2000, ont mesuré l'épaisseur du film liquide à l'aide d'une nappe lumineuse "laser" basée sur le principe de l'ombre, comme indiqué schématiquement à la Figure 2.17.



Fig. 2.17. Dispositif de mesure d'épaisseur de film [99].

Dans le cas d'un film dynamique et à l'aide d'une photodiode, l'intensité lumineuse est mesuré pour déduire l'épaisseur du film liquide, et dans le cas d'un film statique en utilisant une caméra. Des épaisseurs de film de 0,4 à 0,9 mm ont été mesurées.

2.2.3.5. La méthode basée sur la diffusion de faisceau laser

Cette technique est basée sur la diffusion de la lumière par des particules beaucoup plus petites que la longueur d'onde de la lumière dissoute dans une solution liquide de base.

Salazar et Marschall [102] 1975, ont utilisé une technique pour mesurer l'épaisseur du film liquide en écoulement, par diffusion laser de particules sphériques de latex (0,087 μ m) de diamètre. Ces particules ont une densité similaire à l'eau utilisée. Un faisceau laser (He-Ne, 0,6328 μ m) a éclairé le film liquide à travers une plaque de plexiglas transparente comme indiqué dans la Figure 2.18. Les photodiodes ont été utilisées pour mesurer la lumière diffusée par les particules. L'épaisseur du film liquide est mesurée en détectant les changements dans la longueur d'une colonne de lumière diffusée générée par le faisceau laser. Des épaisseurs de film allant de 0,7 mm à 3 mm ont été obtenues et une relation linéaire a été trouvée entre l'intensité lumineuse atteignant la photodiode et l'épaisseur du film.



Fig. 2.18. Colonne de lumière diffusée produite par le faisceau laser [102].

2.2.3.6. La méthode d'intensité de fluorescence

La fluorescence est une méthode capable de fournir des informations précises sur le profil du film liquide, en particulier sa vitesse et son épaisseur. Cette méthode est basée sur l'ajout d'un marqueur à un liquide, ce mélange produit est irradié avec une longueur d'onde spécifique. Afin de mesurer l'épaisseur du film liquide, l'intensité du rayonnement est théoriquement déterminée en termes de nombre de molécules fluorescentes dans le liquide ; ensuite une courbe reliant l'épaisseur du film à l'intensité de la luminosité fluorescente est construite.

Cette méthode de mesure qui dépend de l'ajout d'un marqueur au sein du liquide peut modifier les propriétés du fluide étudié.

Jun et Liu [103] 1993, ont présenté de nouvelles mesures des instabilités primaires des films liquides minces, utilisant la méthode d'imagerie par fluorescence et la déviation du faisceau laser qui permet des mesures précises de la variation de l'épaisseur du film en temps réel avec une précision de l'ordre du micron. Le nombre critique de Reynolds a été mesuré en fonction de l'angle d'inclinaison β . Le système d'écoulement et de mesure sont représentés schématiquement dans la Figure 2.19.



Fig. 2.19. Dispositif expérimental de la méthode de mesure [103].

Pour détecter les ondes et mesurer leurs propriétés, ils ont utilisée la déviation du faisceau laser comme méthode de mesure. Les photodiodes de détection de position sont utilisées pour détecter la déviation du faisceau laser. Ajoutant au fluide une petite concentration de colorant fluorescent sous un éclairage ultraviolet et numérisons les images résultantes. L'éclairage est assuré par des lumières noires fluorescentes orientées parallèlement à la direction de l'écoulement situé au-dessus du film. Une caméra à haute résolution permet d'obtenir des images en très peu de temps.

Hidrovo et Hart [104] 2001, a présenté une technique optique unique, utilisant la réabsorption et l'émission de deux colorants fluorescents (Pyrromethene 567 et Rhodamine 640) pour

mesurer avec précision l'épaisseur du film. Cette technique est nommée Emission Reabsorption Laser Induced Fluorescence (ERLIF). Ils ont montré que lorsque deux colorants différents sont utilisés ensemble dans un film liquide, le rapport de leurs émissions est indépendant de l'intensité lumineuse d'excitation. Il est également nécessaire que l'un des colorants possède la propriété d'absorber une partie de l'émission du deuxième colorant afin de conserver l'information d'épaisseur de film dans le rapport d'émission de colorant. Cette technique leurs a permis d'obtenir une relation linéaire entre le rapport de l'intensité de l'émission de colorants et l'épaisseur du film liquide, avec une mesure d'épaisseur de film comprise entre 5 à 400 µm. Makarytchev et al. [105] 2001, ont mesuré l'épaisseur du film liquide obtenu entre 0,05 à 1,5 mm a été déterminée. Les expériences ont été réalisées pour une solution aqueuse d'un colorant avec une concentration fluorescente de 50 ppmv. Une source de lumière ultraviolette a été utilisée pour introduire la fluorescence. Le système de mesure a été étalonné au moyen de couches de liquide stationnaires d'épaisseur connue.

La méthode de fluorescence a été utilisée avec succès par Kim et Kim [106] 2006, pour mesurer l'épaisseur du film liquide de 10 à 60 μ m. Pour réaliser des films d'épaisseurs exactes et connues, ils ont utilisé deux plaques de verre. Un film formé entre les deux plaques après avoir placé une goutte de liquide de volume connu sur une plaque et recouvrant l'autre. L'épaisseur du film peut être estimée à partir du diamètre de la plaque et du volume de liquide tombé. À l'aide d'un appareil photo numérique les images sont capturées puis analysé. Après le processus d'imagerie, un écart type sur toute la plage d'étalonnage inférieur à \pm 1,0 % a été obtenu. Les expériences ont révélé que l'intensité de la couleur des deux colorants changeait de manière linéaire sur toute la plage de 10 à 65 μ m à 0,1 % en fraction massique. Il est important de souligner le fait que des épaisseurs de film solide jusqu'à 10 nm ont été mesurées avec succès par l'utilisation de méthodes de fluorescence.

2.2.3.7. La méthode de Laser Focus Displacement

Le principe de base de cette technique est d'utilisé le Co-focal, afin de mesurer l'épaisseur et la largeur du film liquide. Un schéma de dispositif LFD utilisé pour étudier l'hydrodynamique du film est présenté dans la Figure. 2.20.



Fig. 2.20. Schéma de l'appareil de mesure Laser Focus Displacement [107].

Un laser produit un faisceau de lumière divergeant, passant à travers un séparateur et une lentille de collimation avant de passer par une lentille objective qui conduit la lumière à converge, la lentille objective focalise le faisceau collimatée sur un point focal, qui peut osciller sur toute l'épaisseur du film en faisant osciller la lentille objective dans la direction normale, et la fréquence et l'amplitude d'oscillation peuvent être ajustées et contrôlées. Le récepteur optique de la lumière détecte l'intensité maximale de la réflexion de la lumière lorsque le point focal du faisceau incident traverse l'interface air-liquide. Le fonctionnement de l'appareil de mesure LFD correspond au pic d'intensité lumineuse détecté avec l'emplacement de lentille objectif, ainsi, on peut déterminer l'épaisseur du film liquide.

Précédemment on a présenté les travaux de Takamasa et Hazuku [42] 2000, qui ont utilisé la technique LFD afin de mesurer avec précision les épaisseurs de film dynamiques.

Takamasa et Kobayashi [108] 2000, ont appliqué la même technique à l'intérieur d'un tube vertical, ou l'eau s'écoule vers le bas afin de mesurer l'épaisseur du film liquide. Le faisceau

laser traverse la région extérieure du tube, la méthode a été évaluée expérimentalement et a fonctionné de manière satisfaisante pour des diamètres internes de tube de 10 à 30 mm.

Han et Shikazono [109] 2008, ont appliqué la technique de laser focus displacement pour mesurer l'épaisseur du film liquide dans un micro tube de cinq diamètres différents (0.3, 0.5, 0.7, 1.0 et 1.3 mm). Ils ont utilisé trois fluides différents (éthanol, eau, FC-40) circulant avec de l'air. L'équipement utilisé représenté dans la Figure 2.21 a une résolution de 0,01 μ m, avec un diamètre de projection du laser de 2 μ m et un temps de réponse de 640 μ s.



Fig. 2.21. Diagramme schématique de l'installation expérimentale [109].

Le Moteur a été utilisé pour déplacer le liquide à l'intérieur de la conduite d'essai, la plage de vitesse du moteur est de 0 à 0,6 m/s. Des seringues à plusieurs sections transversales ont été utilisées pour contrôler la vitesse du liquide dans le micro tube. La vitesse de l'interface gazliquide a été mesurée à partir des images capturées par la caméra à grande vitesse. Les images ont été prises à plusieurs fréquences d'images en fonction de la vitesse de la bulle. Ils ont aussi développé une corrélation capable de prédire l'épaisseur du film liquide de la bulle en fonction des paramètres d'écoulement sans dimension. Cette technique leur a permis de mesurer l'épaisseur du film de 2 à 140 μ m, avec une erreur d'environ 1 %.

Wegener et al. [107] 2010, ont étudié sur une plaque inclinée les effets du débit de liquide, de l'angle d'inclinaison et de la tension superficielle sur la largeur et l'épaisseur du film liquide.

L'épaisseur et la largeur du film sont mesurées à l'aide d'un LFD, et ces mesures servent de vérification du modèle numérique utilisé dans les calculs. Les résultats révèlent que la largeur du film diminue et que l'épaisseur moyenne du film augmente à mesure que le film descend sur la plaque inclinée. L'épaisseur et la largeur du film diminuent mais sa vitesse augmente à mesure que l'angle d'inclinaison de surface augmente. Les mesures de l'épaisseur du film et de la largeur du film se comparent favorablement aux résultats simulés numériquement.

2.2.3.8. La méthode d'interférométrie

Dans le but de la mesure de l'épaisseur du film liquide, les chercheurs ont utilisé la technique de l'interférométrie optique qui est basée sur les interférences entre deux ou plusieurs ondes lumineuse. Les franges lumineuses sont récupérées sur un écran afin de mesurer l'épaisseur du film liquide.

Ohyama et al. [110] 1988, ont utilisé la technique de l'interférométrie optique permettant des mesures d'épaisseurs instantanées de liquide de l'ordre de 10 µm à 1 mm. La méthode est basée sur le rayon réfléchi à l'avant et à l'arrière du film et les franges d'interférences générées par ces rayons sur un écran. En comptant le nombre de franges, il est possible de déterminer l'épaisseur du film.

Nozhat [111] 1997, à utilisé la même technique de l'interférométrie optique basée sur des franges d'interférences pour obtenir des mesures d'épaisseur de film d'eau distillé qui s'écoule sur la surface intérieure d'un tube verticale présenté sur la Figure 2.22. Pour les faibles débits de film (nombre de Reynold inférieur à 20), des épaisseurs de film inférieures à 0,04 mm ont été obtenues. Avec une erreur de l'ordre de 4%.



Fig. 2.22. Schéma du dispositif expérimental [111].

Ils ont aussi tracé un graphe qui présente la variation du film liquide en fonction de nombre de Reynolds représenté sur la Figure 2.23.



Fig. 2.23. La variation du film liquide en fonction du nombre de Reynolds [111].

3.1 Etude corrélative d'un film liquide sur une plaque inclinée

L'eau est le liquide le plus utilisé dans les systèmes de refroidissement, dans son état liquide il possède d'excellentes propriétés thermo-physiques et remplit parfaitement sa fonction quand elle est bien contrôlée. L'écoulement d'un film sur une plaque a été largement utilisé dans diverses applications industrielles.

L'étude des paramètres hydrodynamiques du film liquide est l'un des problèmes les plus importants qui intéressent l'industrie, puisqu'il dépend de plusieurs paramètres comme les propriétés thermo-physiques du fluide, épaisseur, vitesse, orientation, dimension, les propriétés thermo-physiques du matériau et l'état de surface, et trouve son application dans le domaine de la sidérurgie, et particulièrement dans les réacteurs nucléaires, les évaporateurs tubulaires, les condenseurs...etc.

En vue d'étudier le film liquide, de nombreuse corrélation ont été développées pour déterminer l'épaisseur du film liquide. Nusselt [7] 1916, est considéré comme l'œuvre référence pour l'étude du film, de nombreux travaux ont été menés dans ce domaine afin de quantifier l'épaisseur du film liquide comme Portalski [32] 1963, et récemment plusieurs autres comme Moran et al. [43] 2002, Huang et al. [48] 2014, Yu et Cheng [66] 2014, Zhou et al. [112] 2009.

L'épaisseur du film liquid peut être prédit par des corrélations, notre choix s'est porté sur quatre corrélations de la littérature. Les données expérimentales ont été récupérées de travails récents, pour différents fluides utilisés et inclinaisons de la plaque par rapport à l'horizontale.

Une comparaison a été faite entre chacune des corrélations et les données expérimentales récupérées.

3.1.1 Etat de l'art des corrélations empiriques

Pour quantifier l'épaisseur du film liquide, de nombreuses études ont proposées des corrélations pour déterminer les paramètres hydrodynamiques du film liquide, en faisant varier les paramètres influant sur l'écoulement du film liquide sur les plaques, tels que les paramètres géométriques, le matériau utilisé, l'angle de l'inclinaison de la plaque, et les paramètres thermo-physiques du fluide. Le but de ces corrélations est de prédire l'épaisseur du film liquide en fonction des données géométriques et hydrodynamiques, la corrélation est alors comparée aux données expérimentales, une analyse statistique permet alors de déterminer l'erreur des valeurs corrélées avec celles des données expérimentales.

3.1.2 Corrélations retenues

Nous avons retenu quatre corrélations, une ancienne et les trois autres sont récentes, elles sont présentées dans le Tableau 3.1, toutes ces corrélations dépendent du nombre de Reynolds qui est porté à la puissance de 0,322 à 0,435 et des propriétés thermo-physiques du fluide, ainsi à un coefficient constant, ces corrélations dépendent de l'angle d'inclinaison de la plaque par rapport à l'horizontale.

Tableau 3.1 : Corrélation de prédiction de l'épaisseur du film liquide.

Auteur	Equation
Nusselt [7] 1916	$\delta = 3^{1/3} \cdot \mathrm{Re}^{1/3} \left(\frac{\nu^2}{g \sin \varphi}\right)^{1/3}$ (3.1)
Zhou et al [112] 2009	$\delta = 0.831. \operatorname{Re}^{0.435} \left(\frac{v^2}{g \sin \varphi} \right)^{1/3} $ (3.2)
Yu et Cheng [66] 2014	$\delta = 0.462. \operatorname{Re}^{0.422} \left(\frac{v^2}{g \sin \varphi} \right)^{1/3} $ (3.3)
Huang et al [48] 2014	$\delta = 1,05.\mathrm{Re}^{0.322} \left(\frac{\nu^2}{g\sin\varphi}\right)^{1/3}$ (3.4)

La théorie de Nusselt [7] 1916, est considérée comme une référence très importante, est largement utilisée, non seulement parce qu'elle nous donne une équation (3.1) pour estimer l'épaisseur du film liquide, mais aussi une forme de base pour interagir avec la relation entre l'épaisseur du film et le nombre de Reynolds :

$$\delta = a.\operatorname{Re}^{b}\left(\frac{\nu^{2}}{g\sin\varphi}\right)^{1/3}$$

Où a et b sont des constantes, normalement adapté aux données expérimentales. Cependant, ces constantes ont tendance à varier énormément dans les différentes corrélations.

Donc d'après les quatre corrélations qu'on a, on remarque qu'elles ont la même forme juste les constantes a et b qui sont considérées comme des variables. Ainsi que les paramètres thermo-physiques du fluide qui son aussi des variables par rapport à la température du fluide. Ces corrélations étudient l'épaisseur du film liquide en écoulement sur des plaques, quel que soit l'angle d'inclinaison de la plaque.

3.1.3 Analyse des données expérimentales

Un ensemble de données expérimentales ont été récupérées de la littérature, qui ont trait à l'étude expérimentale de l'écoulement du film liquide sur les plaques, voir Tableau 3.2.

Trois fluides sont concernés, l'eau, l'huile de silicone, et le fluide silicone. Dans cette étude, les propriétés thermo-physiques des différents fluides ont été récupérées selon les expériences expérimentales et selon la température de chaque fluide étudié.

Plus de 200 points ont été récupérées des études expérimentales de la littérature, ces points représentent l'épaisseur du film liquide en fonction du nombre de Reynolds. La position de la plaque elle est différente et représente un angle d'inclinaison à chaque fois différent, et le matériau des plaques utilisés est différent.

Les propriétés physico-thermiques de l'eau ont été récupérées du site internet du NIST (National Institute of Standards and Technology).

N°	Auteur/année	Fluide	Matériel de la plaque	L'angle φ	Dimension (mm)	Gamme de Re	Nombre de points
1	Ambrosini et al. [113] 2002	Eau	Acier inox	45	2000×600	170-3300	50
2	Moran et al. [43] 2002	Huile de Silicone	Cuivre	45	1920×80	11-220	20
3	Lel et al. [114] 2005	Fluide de Silicone	Plaque en plexiglas	13-30- 60	1600×240	2-700	127
4	Yu et Cheng. [66] 2014	Eau	Acier inox	32-46- 62	400×5000	200-3600	21
5	Hu et al. [115] 2020	Eau	Acier inox	15-45	5000×1230	80-900	12

Tableau 3.2 : Données recueillies de la littérature.

Les points des données expérimentales récupérés, sont illustrés dans la Figure 3.1 de chaque expérience.





Fig.3.1. Les graphes représentatif des données expérimentales récupérées de l'épaisseur en fonction du nombre de Reynolds.

3.1.4 Comparaison des corrélations

Une comparaison des données expérimentales de points récupérées (Tableau 3.2) appliqué à chacune des corrélations choisies (Tableau 3.1) à été réalisé. C'est-à-dire le but est de compenser les valeurs de l'épaisseur du film liquide et le nombre de Reynolds récupérées, à chacune des corrélations choisies (Tableau 3.1), est présentée ci-dessous dans la Figure 3.1. Afin de faire une évaluation comparative une définition de l'erreur a été retenue, comme suit :

$$Erreur = \left| \frac{\delta_{\exp} - \delta_{cal}}{\delta_{\exp}} \right|$$
(3.5)

$$Erreur_{Moyenne} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Erreur_i}{n}$$
(3.6)



La corrélation de Nusselt [7] 1916, donnes des résultats regroupés par rapport à la médiane, l'erreur moyenne est de 27% et le coefficient de corrélation et de 0,93.



Des résultats presque similaires à celle de Nusselt sont trouvés avec la corrélation de Zhou et al. [112] 2009, avec une erreur moyenne de 30% et un coefficient de corrélation égale à 0,93.



Pour la corrélation de Yu et Cheng [66] 2014, on arrive à trouver des résultats regroupés mais décalés par rapport à la médiane, les valeurs prédites sont supérieurs aux données expérimentales avec une erreur moyenne de 35% et un coefficient de corrélation égal à 0.93.



Fig.3.2. Evaluation des corrélations avec les données expérimentales.

La corrélation de Huang et al. [48] 2014, on arrive à trouver des résultats regroupés mais décalés par rapport à la médiane, les valeurs prédites sont inférieures aux données expérimentales avec une erreur moyenne de 21% et un coefficient de corrélation égal à 0.93.

La Figure 3.2 nous indique l'évaluation des quatre corrélations en comparant les résultats des valeurs prédites par rapport aux valeurs expérimentales récupérées.

3.1.5 Elaboration d'une nouvelle corrélation

L'épaisseur du film liquide dépend de plusieurs paramètres, parmi ceux-ci, nous avons les caractéristiques thermo-physiques du fluide, l'angle de l'inclinaison de la plaque et les données expérimentales.

Une proposition d'une nouvelle corrélation a été élaborée et validée par les mêmes données expérimentales récupérée et comparée aux autres corrélations.

La nouvelle corrélation présente la même forme que les autres corrélations de la littérature, juste les constantes a et b qu'ils sont différent. La nouvelle corrélation de l'épaisseur du film liquide elle est représentée sous la forme suivante :

$$\delta = a.\operatorname{Re}^{b}\left(\frac{\nu^{2}}{g\sin\varphi}\right)^{1/3}$$

Pour réaliser une nouvelle corrélation, on doit tracer un graphe des données expérimentales récupérées de l'épaisseur du film liquide δ sur la valeur des propriétés thermo-physique du fluide et on précise l'angle de l'inclinaison φ de la plaque et la pesanteur g $\left(\frac{\nu^2}{g\sin\varphi}\right)$ en fonction de nombre de Reynolds représenter dans la Figure 3.3.





Utilisant la courbe de tendance en trouve un coefficient, a= 1,517 et b= 0.288 et la nouvelle corrélation trouvé doit être écrit sous la forme suivant :

$$\delta = 1,517. \operatorname{Re}^{0,288} \left(\frac{\nu^2}{g \sin \varphi} \right)^{1/3}$$
 (3.7)

A travers cette corrélation on peut calculer l'épaisseur du film liquide prédit et le comparer avec l'épaisseur expérimentale.

La Figure 3.4 nous présente la relation entre l'épaisseur du film liquide prédit avec la nouvelle corrélation et celui de l'expérience. La plupart de point sont concentrés au niveau de la ligne médiane, avec une erreur moyenne de 21% et un coefficient de corrélation égal à 0.92.



Fig.3.4. Validation de la nouvelle corrélation avec les données.

D'après la Figure 3.4 on remarque que la plupart des points se regroupe sur la médiane, cela signifie que les données de l'épaisseur expérimentales rapprochent beaucoup à l'épaisseur calculée par la nouvelle corrélation élaboré.

3.1.6 Conclusion

Des corrélations ont été utilisées pour déterminer l'épaisseur du film liquide, et comparées avec des données de la littérature. Des résultats appréciables ont été prédits avec les corrélations de Nusselt [7] et Zhou et al. [112].

La corrélation proposée à donner des résultats similaires a ceux de Nusselt [7] et Zhou et al. [112] par ce que les données expérimentales de l'épaisseur du film liquide comparent aux données calculées rapprochent beaucoup de la médiane.

La nouvelle corrélation peut être utilisée pour le calcul de l'épaisseur de n'importe quel film liquide (eau, l'huile de silicone, le fluide de silicone) qui s'écoule sur une plaque, avec un angle d'inclinaison.

La nouvelle corrélation à une erreur moyenne faible et un coefficient de corrélation similaire aux autres corrélations, ce qui donnera une validité à la nouvelle corrélation.

3.2 Etude expérimentale d'un film liquide hors impact du jet

La quantification des paramètres hydrodynamiques tels que la vitesse d'écoulement et l'épaisseur du film liquide sont essentiels pour évaluer l'intensité du transfert thermique pendant le refroidissement des plaques hautement chauffées. Dans cette étude, un montage expérimental nous a permis de tracer le profil des vitesses du film liquide à la limite de la plaque horizontale, une nouvelle approche a été utilisée pour mesurer la vitesse du fluide ; par traitement statistique, nous avons lié le profil des vitesses au débit. En utilisant les corrélations de Tebbal et Mzad [13] paramétrant le jet impactant une plaque horizontale, nous avons établi alors une relation liant l'épaisseur du film aux caractéristiques géométriques et hydrodynamiques du sprayer.

3.2.1 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été mis au point, constitué d'un sprayer impactant un jet sur une plaque horizontale à une hauteur *H* variable, comme le montre la Figure 3.5. Le sprayer utilisé est sous forme d'un canal cylindrique avec un fond sphérique, une fente à profil conique est réalisée à l'intérieur. Les paramètres géométriques du sprayer sont indiqués dans la Figure 3.5.

A partir des caractéristiques géométriques du sprayer, la section transversale d'ouverture de la surface de sortie du jet est déterminée, on a alors :

$$a = 2(h - \delta) tg \frac{\varphi}{2}, \tag{3.8}$$

$$b = 2(2[R - (h - \delta) + h.\delta] - h^2 - \delta^2)^{1/2}.$$
(3.9)

L'aire de section de l'ouverture de la buse S est :

$$S = 0.0349 Arctg\left(\frac{b.r^2}{2r-a}\right) - b\left(r - \frac{a}{2}\right)$$
(3.10)

$$r = \frac{a^2 + b^2}{4}$$
(3.11)

Avec



$$\xi = \frac{h - \delta . r}{2R} \tag{3.12}$$



Fig. 3.5. Schéma du dispositif expérimental.

Ce même dispositif a été utilisé pour l'étude du jet dans la zone I d'impact par Tebbal et Mzad [13], indiqué sur la Figure 3.6. Dans notre étude expérimentale, on s'intéresse à l'étude de l'hydrodynamique du film dans la zone II de la même Figure. La formation du film liquide dans la zone II dépend des paramètres géométriques et aussi des conditions hydrodynamiques, d'après Bratura et Tebbal [116], telles que la hauteur H entre le sprayer et la surface de la plaque, et ΔP la variation de la pression de la pulvérisation comme l'a souligné Patrick et al. [117], la distance L entre la limite de l'éllipse et la frontière de la plaque horizontale, soit la largeur de la zone II.



Fig.3.6. Schéma montrant la zone d'étude.

Les dimensions de la plaque sont de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, et la longueur *L* est égale à 300 mm. Dans notre étude, on s'intéresse au comportement du film liquide hors surface d'impact, dans la zone II, afin de quantifier les paramètres hydrodynamiques du film, à savoir la vitesse moyenne d'écoulement et l'épaisseur.

A la frontière de la plaque horizontale, sur la ligne de courant en prolongement de l'axe y, comme indiqué dans la Figure 3.5, nous avons placé une batterie de tubes pour colleter le volume V d'eau projeté pendant un temps t, la batterie s'étale sur une largeur le long de l'axe Y, et se situe à une hauteur X, du niveau de la plaque. Plusieurs essais ont été faits pour différentes hauteurs X; le détail de la position de la batterie est présenté dans la Figure 3.7.



Fig.3.7. Positionnement de la batterie de collecte.

Cette batterie de récupération du film liquide est constituée de plusieurs tubes gradués voir la Figure 3.8 ci-dessous :



Fig. 3.8. Batterie des tubes.

Chaque tube aura collecté un volume V pendant un temps t; le rapport calculé $Q_v = \frac{V}{t}$ représente le débit, il était compris entre 0 et 0,267.10⁻⁶ m³/s. La batterie de collecte était positionnée sur une distance Y comprise entre 0 et 350 mm de la limite de la plaque. Trois séries de mesures ont été exécutées pour des valeurs de la hauteur X valant 60, 80 et 100 mm. Toutes ces expériences ont été faites pour des paramètres hydrodynamiques connues H=400 mm, ΔP =0,32 MPa, et des caractéristiques géométriques du sprayer définies dans le Tableau suivant :

Tableau 3.3. Les paramètres géométriques du sprayer utilisé.

φ (deg)	h (mm)	b (mm)	a (mm)	$S (mm^2)$	ξ
60°	6.5	6.03	17.235	180	0.225

3.2.2 Résultats et discussions

3.2.2.1 Présentation de la méthode projectile

La méthode projectile est une technique de mesure de la vitesse du fluide sur l'extension de la ligne de courant. La particule élémentaire de fluide arrivant au bord de la plaque et ayant une vitesse V_0 sera projetée en décrivant une parabole, la collecte de volumes de fluide dans des tubes pendant une durée t nous permettra de déterminer le débit Q_v passant au point de collecte (X;Y). L'opération sera répétée à différentes hauteurs *X* du niveau de la plaque.

La récupération des données et leur traitement nous amènent à tracer le débit du fluide en fonction de la vitesse ; le profil obtenu suit une loi normale. L'analyse statistique déterminera la valeur moyenne de la vitesse d'écoulement du fluide et l'écart-type.

La vélocimétrie d'images de particules (PIV) est une technique de mesure apparue à la fin des années 1970. Elle permet d'accéder au champ de vitesse instantanée. La vitesse locale du fluide est mesurée en enregistrant des images des particules traceuses introduites dans l'écoulement et en déterminant la distance parcourue par ces particules et le temps entre les images successives de la même particule.

La méthode projectile est un ensemble manuel qui ne nécessite pas de traceurs dans le fluide, la vitesse est obtenue par une approche statistique, donner la moyenne avec une marge ; l'assemblage ne peut être effectué que si le liquide est versé au-delà de la plaque.

D'un autre côté, la méthode PIV est plus précise et équipée d'un traitement automatique des signaux ; le fluide doit être chargé de particules fluorescentes, la vitesse peut être déterminée dans un canal à la surface.

• Procédure de la méthode projectile

1. Installation d'une Batterie des tubes de collecte illustrée dans la Figure 3.8 sur le trajet d'évacuation du fluide positionné à (X, Y) sur la référence de la Figure 3.7.

- 2. Répéter l'opération à la hauteur X, la même chose que la partie 1.
- 3. Enregistrer les données sur les volumes collectés pour une période spécifique *t*.

4. Tracer des courbes sur le même graphe, donnant le débit Q_v en fonction de Y, pour différentes positions de X.

5. Calculer la vitesse *V* correspondante pour chaque point (*X*, *Y*) et tracer la courbe du débit Q_v en fonction de la vitesse du fluide *V*.

6. Détermination de la vitesse moyenne V par une analyse statistique des données, en utilisant la loi normale.

3.2.2.2 L'analyse des données

Les résultats des éxpériences est illustré dans la Figure 3.9, montrant le débit en fonction de la distance *Y* par rapport au bord de la plaque, trois courbes en forme de cloche représentant chacune une hauteur donnée *X*. lorsque X = 60 mm, *Y* varie de 65,40 à 261,53 mm, à X = 80 mm *Y* prend les valeurs de 74,90 à 275,80 mm; et lorsque *X* vaut 100 mm, *Y* se situe entre

86,54 et 302,67. Les valeurs du débit passent par des pics valant $0,267 \times 10^{-6}$ à X = 60, puis $0,227 \times 10^{-6}$ à X = 80 et finalement $0,203 \times 10^{-6}$ pour X = 100 mm.



Fig.3.9. Données expérimentales pour différentes valeurs de X.

Les trois courbes de la Figure.3.9 ont la même forme et sont décalées l'une par rapport à l'autre, quand Y augmente, le débit augmente, passe par un pic, et puis il diminue ensuit ; lorsque X augmente, le pic de la courbe considéré diminue et se décalle vers la droite, plus X augmente, plus la courbe s'élargit et s'aplatit.

La quantité élementaire arrivant au bord de la plaque a une vitesse V_0 , elle est projetée en décrivant une parabole, puis il est récupéré dans les tubes. La distance parcourue selon l'axe *Y* est determinée par la relation :

$$Y = V_0 t \tag{3.13}$$

Et la distance parcourue selon l'axe *X* est :

$$X = \frac{1}{2}gt^{2}$$
 (3.14)

De l'équation (3.13) et (3.14) on obtient :

$$V_0 = Y \cdot \sqrt{\frac{g}{2X}} \tag{3.15}$$

Pour chaque point des courbes de la Figure.3.9, correspond un couple (X, Y), et un débit donné Q_v ; la vitesse V_0 du point (X;Y) peut être déterminée, on trace ensuite les courbes donnant le débit en fonction de la vitesse, voir la Figure 3.10.



Fig.3.10. Comportement de la vitesse en fonction du débit.

La Figure 3.10 represente la relation entre la vitesse et le débit, pour la même valeur de la vitesse V = 1,30 m/s, le débit est maximal et atteint les même pics que ceux de la Figure 3.9. Les trois courbes ont la même forme et obéissent toutes à la loi normale. En conséquence, le pic du débit diminue lorsque la hauteur *X* augmente, mais reste à une valeur V_0 fixe autour de 1,34 m/s ; cette vitesse est donc independante de la valeur de *X*.

3.2.2.3 Modélisation des caractéristiques du film

Le regroupement des résultats présentés dans la Figure 3.11, en utilisant les propriétés de la loi normale, nous donne la densité de probabilité de la vitesse pour le débit le plus probable ; elle a été calculé moyennant l'équation (3.16), La vitesse moyenne du fluide est évaluée à $V = 1,34 \pm 0,51$ et couvre 68% de la probabilité.

$$f(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(V-\mu\right)^2}{2\sigma^2}\right)$$
(3.16)



Fig.3.11. La fonction de densité de la probabilité de la vitesse.

En liant le débit avec la densité de probabilité de la vitesse, on détermine la fonction de répartition, montrée dans la Figure 3.12, et déterminé à partir de l'équation (3.17) :

$$F(v) = \frac{1}{2} \left(1 + erf\left(\frac{V - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right)$$
(3.17)

La courbe de la Figure 3.12 représente la fonction de répartition du profil de vitesse, c'est-àdire pour chaque valeur de la vitesse d'écoulement du film correspond un débit volumique réel déterminé à partir de la fonction de répartition et du débit global de sortie de la buse du sprayer.



Fig.3.12. La fonction de répartition du débit en fonction de la vitesse.

3.2.2.4. Calcul de l'épaisseur du film

Le débit sortant du sprayer ayant les caractéristiques présentées au Tableau 3.3 décrit un jet impactant la plaque sur une surface elliptique. Les caractéristiques du jet ont été étudiées par Tebbal et Mzad [13]. Et ont pu modéliser le champ de dispersion en fonction des paramètres géométriques et hydrodynamiques de l'installation. La fonction de répartition est définit sous la forme suivante :

$$g'(x, y) = g'_{\max}(0) \exp\left[-0.5\left(\frac{x_i^2}{x_{\max}^2 \cdot \sigma_x^2} + \frac{y_i^2}{y_{\max}^2 \cdot \sigma_y^2}\right)\right]$$
(3.18)

Tirant avantages des propriétés de cette fonction, il est possible de déterminer le débit sortant du sprayer et projeté sur la plaque, il peut être obtenu par l'équation suivante :

$$Q_{\nu} = g'_{\max}(0).x_{\max}.y_{\max}$$
(3.19)

Le calcul du débit Q_v peut être fait par les corrélations établies par Tebbal et Mzad [13], donnant les formulations de $g'_{\max}(0)$, x_{\max} et y_{\max} , énumérés ci-dessous :

$$g'_{\text{max}}(0) = 2.1039 K_1^{1.206} \zeta^{-0.702}$$
 (3.20)
 $K_1 = S(2\Delta p.\rho)^{0.5} . H^{-2}$

Avec

Moyennant les données expérimentales, les corrélations sont établies pour déterminer x_{max} et y_{max} qui dépendent de la hauteur H et de tan ($\varphi/2$) ainsi que de la section de l'orifice du sprayer S, et sont présenté comme suit :

$$x_{\rm max} = 2412.K_2^{-0.468} \tag{3.21}$$

$$y_{\rm max} = 21, 27. K_2^{0,062} \tag{3.22}$$

Avec : $K_2 = H tg \varphi/2$

Connaissant les paramètres hydrodynamiques choisis pour l'expérience, à savoir une pression de $\Delta P = 0,32$ MPa et une hauteur de H = 400 mm séparant la buse de la plaque et les paramètres géométriques de la buse du Tableau 3.3, on peut calculer le débit sortant de la buse.

Ce même débit impactant la plaque va s'écouler hors zone de pulvérisation, avec une épaisseur δ et une vitesse *V* arrivé à la frontière de la plaque. Il aura la vitesse V_0 du projectile étudié précédemment, cette vitesse est la même sur le périmètre de l'ellipse, éloignée de la zone d'impact à une distance *L*.

Le périmètre de l'ellipse peut être calculé avec la formule (3.23) :

$$P = 2.\pi \sqrt{\frac{1}{2} \left(\left(L + x_{\max} \right)^2 + \left(L + y_{\max} \right)^2 \right)}$$
(3.23)

Le débit sortant de la buse est calculé à partir de l'équation (3.19). Sera le même à une distance *L* tout autour de la zone d'impact et déterminée par l'équation (3.24).

$$Q_{v} = PV\delta \tag{3.24}$$

En calculant l'épaisseur du film liquide avec l'équation (3.24), et en utilisant le même profil de vitesse pour une pression de 0.16 et 0.64 MPa, on arrive à des résultats illustrés par la Figure 3.13, qui représente l'épaisseur du film liquide en fonction du débit volumique.



Fig.3.13. Relation entre le débit volumique et l'épaisseur du film.

La Figure 3.13 montre la relation entre le débit volumique et l'épaisseur, cette dernière va augmenter passant par un pic et ensuite diminuer lorsque le débit sortant du sprayer augmente. Les trois courbes suivent la même forme, seulement lorsque la différence de pression augmente, l'épaisseur croît aussi de manière significative.

3.2.3 Conclusion

Ce travail qui porte sur l'étude expérimentale de l'hydrodynamique d'un film liquide sur une plaque horizontale, en utilisant une approche nouvelle pour la mesure des caractéristiques du film, nous permet d'affirmer que :

- Le profil de la vitesse de l'écoulement du film au bord de la plaque obéit à la loi normale.
- La hauteur X n'influe pas sur les caractéristiques du film à savoir son épaisseur et sa vitesse.
- La différence de pression ΔP et la hauteur H ont un impact sur l'épaisseur de l'écoulement.

Une relation permettant de calculer le débit sortant de la buse et impactant la plaque à été déduite et l'épaisseur du film à été déterminée en fonction des paramètres géométriques du sprayer et des paramètres hydrodynamiques tels que ΔP et H.

3.3. Simulation du refroidissement d'une plaque hautement chauffée par film liquide

Le traitement thermique par l'eau ou l'air est utilisé dans de nombreux processus industriel, pour contrôler la dissipation superficielle d'un matériau porté à des températures élevées. Ce phénomène se trouve dans le domaine industriel tels que, le refroidissement des plaques métallique hautement chauffée dans le domaine de la sidérurgie. Il existe trois procédés intéressants pour refroidir des surfaces métalliques :

- 1. Le refroidissement par film liquide, (réacteur nucléaire).
- 2. Le refroidissement par pulvérisation, (plaque métallique chauffée).
- 3. Le refroidissement par immersion, (rond à béton).

L'utilisation de l'eau à pour but d'augmenter les transferts thermiques sur les zones d'impact des surfaces hautement chauffée. Afin de concevoir un système de refroidissement efficace, il est important de comprendre les mécanismes de transfert de chaleur pendant le processus de refroidissement des plaques hautement chauffée.

Afin d'améliorer la productivité avec des coûts énergétiques baisse, de réduire les dépenses et d'améliorer la qualité des produits, l'utilisation de la simulation de phénomènes physiques dans les processus industriels est de plus en plus croissante.

La dernière partie du chapitre vise à examiner par simulation numérique l'influence des paramètres géométriques et hydrodynamiques du sprayer et leur impact pendant le processus de refroidissement par film liquide sur une plaque hautement chauffée.

3.3.1. Choix du domaine de simulation

Dans notre étude, une plaque métallique à été utilisée qui prend la forme d'un prisme de section rectangulaire. La température de la plaque est de l'ordre de 1100 °C cette valeur proche de la réalité quand la plaque sort du four. Au cours de déplacement de la plaque hautement chauffée à la section de refroidissement sous sprayers un refroidissement par

convection naturelle accompagné de rayonnement thermique est pris en compte, un jet d'eau impactant la face supérieur de la plaque tandis que les autres faces sont soumis à l'interaction avec l'environnement ambiant. Sur la face supérieure de la plaque une extraction importante de chaleur à été réalisé ainsi que les autres faces menée par décroissance de la température au cours du temps.

Afin d'établir une distribution tridimensionnelles de la température T(x,y,z,t), nous avons choisi une plaque de dimensions $x \times y \times z = 450 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$. L'étude thermique est réalisée en régime transitoire dans des conditions aux limites mixtes. L'objectif de cette étude de simulation numérique est de clarifier l'influence de la dispersion de l'eau hors la zone d'impact du jet sur le transfert de chaleur pendant le processus de refroidissement.

3.3.2. Simulation thermique

La préparation du domaine de la plaque solide est la première étape dans une étude de simulation numérique. Les dimensions de la plaque sont représentées sur la Figure 3.14.



Fig. 3.14. Représentation tridimensionnelle de la plaque.

3.3.3. Maillage du domaine

Le maillage est généré par le code de calcul Comsol Multiphysics et le maillage choisi est de type fin et régulier. La plaque est subdivisée en de petits éléments finis. Les caractéristiques de la plaque sont regroupées dans le Tableau suivant :

Domaine	TI-6AL-4V (UNS R56400)
Conductivité thermique [W/(m.K)]	$\lambda(T)$
Densité [kg/m³]	$\rho(T)$
Capacité calorifique à pression constante	Cp(T)
[J/(kg.K)]	
Diffusivité thermique [m²/s]	$\alpha(T)$
Emissivité de surface	$\varepsilon(T)$

Tableau 3.4 : Propriétés thermo physiques de la plaque.

Tableau 3.5 : Propriétés thermo physiques du fluide de travail.

Propriétés	σ	ρ	v	Ср	L	λ	Tsat	TLeid
de l'eau	[N/m]	$[kg/m^3]$	$[m^2/s]$	[kJ/(kg.K)]	[kJ/kg]	[W/(m.K)]	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$
Valeurs	73.75.10 ⁻³	1000	1.10-6	4.18	2272	607.1.10 ⁻³	100	230

Le matériau est porté à position horizontale fixe en dessous du sprayer pour le refroidissement. Le matériau de la plaque est composé d'alliage de titanium-aluminium vanadium, de la série UNS R56400 (Ti-6Al-4V), et sa température initiale à sa sortie du four est de l'ordre de 1100 °C.

Objectif dans notre étude, est de réalisé un refroidissement à l'aide d'un sprayer qui impact notre plaque métallique hautement chauffée. L'étude est réalisée hors la zone d'impact du jet. Lorsque l'eau de refroidissement 25 °C entre en contact avec la surface de la plaque hautement chauffée, il va crée un film d'eau en ébullition de coefficient de transfert de chaleur h_D (convection diphasique), la radiation thermique de la plaque chaude ainsi la convection de l'air sur la plaque sont aussi prisent en compte. On prend en considération que notre film liquide de refroidissement vient du sprayer qui s'écoule hors la zone d'impact du jet.



Fig. 3.15. Représentation tridimensionnelle du maillage.

Le code de calcul utilisé est COMSOL MULTIPHYSICS. La géométrie et le maillage de la plaque sont représentés sur la Figure 3.15. Le matériau de la plaque et ses caractéristiques thermo physiques sont sélectionnés à partir de la base de données du logiciel. Le but de cette étude est de résoudre un problème du transfert de chaleur par conduction hors la zone d'impact du jet d'eau sur une plaque horizontale en régime transitoire.

3.3.4. Conditions aux limites

L'équation de la chaleur peut être résolue si une seule des deux conditions aux limites est présentée. La première condition aux limites est de type Dirichlet, cette condition utilise la température au bord de la plaque :

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_0 \tag{3.25}$$

La deuxième condition aux limite spécifie un flux de chaleur ou :

$$q = -n\lambda\nabla T \tag{3.26}$$

Avec :

q : représente le flux de chaleur au bord de la plaque.

n : représente le vecteur normal au bord de la plaque.

On peut définir la température en tout point de la plaque (uniforme), comme une condition initiale :

$$T (x,y,z,0) = T_0 (x,y,z) = T_{ini} = 1100 \ ^{\circ}C \tag{3.27}$$

Notre plaque est composée de six faces de forme rectangulaires, chacune d'elles est soumettre à une condition aux limites appropriées.

3.3.5. Conditions aux limites appliquées

Le but de notre étude, est de réalisé une simulation numérique sur un film liquide d'eau qui s'écoule sur une plaque horizontale hors la zone d'impact du sprayer avec des dimensions de la plaque citer précédemment. Le film liquide vient du sprayer c'est-à-dire les paramètres géométriques du sprayer à une influence sur la formation du film liquide.

Les radiations thermique ainsi la convection de l'air sont prisent en compte dans cette étude, l'application des conditions aux limites et de types flux de chaleur indiqué aux six faces comme suit :

- Condition aux limites sur la face d'impact :

La surface supérieure de la plaque est la face soumis par l'impact du jet d'eau qui vient du sprayer qui est responsable à la formation du film liquide, caractériser par trois flux de chaleur qui sont l'ébullition du film liquide d'eau formé sur la surface de la plaque, la convection de l'air et le rayonnement, ces flux de chaleur sont représentée par les équations suivantes :

$$q = q_{spray} + q_{conv} + q_{rad}$$
(3.28)

Ou :

$$q_{spray} = h_D \left(T_P - T_{\acute{e}bu} \right) \tag{3.29}$$

$$q_{conv} = h_a \left(T_P - T_{amb} \right) \tag{3.30}$$

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon \left(T_P^4 - T_{amb}^4 \right) \tag{3.31}$$

 h_D et h_a , sont des coefficients du transfert thermique diphasique et par convection avec l'air sont données par les équations suivantes :

$$h_D = \frac{q_{spray}}{(T_P - T_{\ell bu})} \tag{3.32}$$

Et :

$$h_a = 0,046.T_p + 6.8 \tag{3.33}$$

Bratuta et Ivanowsky [118] 1982, on établi une corrélation permettant de calculer le flux de chaleur à la surface d'impact hautement chauffée et la pulvérisation d'eau sous sprayer à travers deux paramètres à savoir la différence de pression et la quantité du fluide refroidissant :

$$q = 4, 6.10^{6} \Delta P^{0.1} g_{\text{max}}^{0.4}$$
(3.34)

Les valeurs du coefficient h_D , on peut les obtenir d'après les résultats de l'étude expérimentale sur le comportement du film liquide représenté dans la deuxième partie de ce chapitre.

Les valeurs du coefficient h_D , et la dispersion maximal g'_{max} du sprayer impactant la plaque est représentée dans les Tableaux (Tab 3.6, Tab 3.7). La température de l'air ambiante et de l'ordre de 25 °C. L'émissivité thermique ε est calculée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = 0,1536 + 1.8377.10^{-4} (T_0 - 300) \tag{3.35}$$

Tableau 3.6 : Représente la dispersion maximale dans la zone d'impact en fonction des paramètres géométrique et hydrodynamique de sprayer.

φ (deg)	$S (mm^2)$	ξ	g'_{max} (mm ³ /mm ² .S)	$h_D (w/m^2.K)$
60°	180	0.225	340,10	10614,917

Tableau 3.7 : Représentation des conditions aux limites.

Frontières	1,2,3,5,6	4
Туре	I	Flux de chaleur
Coefficient de transfert de chaleur (w/m ² .K)	69.96	h _D
Température externe [K]	298.15	373.15
Température ambiante [K]	298.15	298.15

- Les autres faces de la plaque : les autres faces de la plaque sont soumises à deux flux de chaleur la convection de l'air et le rayonnement.

3.3.6. Représentation des résultats



Fig. 3.16. État initial de la plaque à sa sortie du four métallurgique à une température de 1100°C.



Fig. 3.17. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température A- Après 5 secondes, B-Après 10 secondes.


Fig. 3.18. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 15 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.19. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 20 secondes.



Fig. 3.20. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 25 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.21. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 30 secondes.



Fig. 3.22. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 40 secondes.





Fig. 3.23. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 50 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.24. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 60 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.25. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 70 secondes.



Fig. 3.26. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 80 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.27. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 100 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.28. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 120 secondes.

A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.29. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 130 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.30. Lancement du refroidissement par simulation et distribution de la température après 135 secondes. A-vue de dessus, B-vue de dessous.



Fig. 3.31. Variation de la température pour un épaisseur de la plaque $\delta = 0.020$ m. $\Delta P = 0.32$ MPa, $h_D = 10614.917$ w/m².K.



Fig. 3.32. Variation de la température pour différents épaisseurs de la plaque. $\Delta P=0.32 \text{ MPa}, h_D=10614.917 \text{ w/m}^2.K.$

3.3.7. Discussions des résultats obtenus

Les résultats obtenus par la simulation numérique nous a permis d'obtenir différentes distributions de température sur la plaque métallique. Le refroidissement de la plaque est réalisé par un film d'eau liquide qui vient du sprayer. A l'aide des paramètres géométrique du sprayer ainsi que les paramètres hydrodynamique, en calculant la quantité du liquide refroidissant.

La plaque métallique hautement chauffé à la sortie du four à une température de 1100 °C, cette température est réel est utilisé dans l'industrie métallurgique. Les résultats obtenus du refroidissement de T_0 jusqu'à la fin du processus de refroidissement, pour atteindre une température de la plaque à 100 °C été représentée sur les Figures (Figure 3.16 à Figure 3.30) et les résultats constatés sont comme suit :

- On observe sur la face supérieure de la plaque métallique une manifestation du refroidissement. les parties de la plaque les plus refroidies représentées par une couche uniforme en bleu (Figure 3.16 à Figure 3.30).
- La progression du refroidissement s'effectue sur la surface supérieure de la plaque vers le bas continuellement avec le temps ou l'eau de refroidissement s'écoule (Figure 3.16 à Figure 3.30).
- L'impact du refroidissement est observé sur la modification des couches de la face supérieure et les autres faces.
- Le refroidissement de la plaque hautement chauffée a été observé pendant 135 secondes jusqu'à ou la température de la plaque atteint la température d'ébullition de l'eau.
- Les Figures (Figure 3.31 et Figure 3.32) montrent la variation de la température pour différents épaisseurs de la plaque (2 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 25 mm) à pression fixe de 0.32 MPa et un coefficient de transfert thermique diphasique h_D. On note ainsi que la plaque avec l'épaisseur le plus mince 2 mm atteint la température de 100 °C pendant 4 secondes, et 15 secondes pour l'épaisseur de 5 mm, 45 secondes pour l'épaisseur de 10 mm, 135 secondes pour l'épaisseur de 20 mm et 185 pour l'épaisseur de 25 mm.
- On reste toujours dans l'analyse de l'évolution de la température, on note que l'étude menée par Choual [119] a signalée un temps de refroidissement de 145 secondes pour atteindre une température de 100 °C alors que le temps constaté pour notre étude et pour les mêmes conditions de simulation que l'étude de Choual [119], est de 135 secondes.

3.3.8. Conclusion

- Les différentes variations de température de la plaque métallique hautement chauffée à été prédit par la simulation numérique est cela en fonction des paramètres géométrique et hydrodynamique du sprayer à l'instant t.

- L'extraction de la chaleur la plus importante a été signalée sur la plaque la plus mince en 4 secondes seulement pour un coefficient h_D de 10614.917 w/m².K. Et pour le même coefficient h_D, on a signalé le temps nécessaire pour que la plaque métallique hautement chauffée atteint la température de 100 °C.

- On à constaté que le refroidissement de notre plaque métallique hautement chauffée pour les mêmes conditions de simulation de Choual [119] pour atteindre la température de 100 °C et court de 10 secondes.

Conclusion générale

Dans le domaine industriel, les systèmes de refroidissement existent sous plusieurs formes ; les films liquides, par sprayer et par immersion. Le choix du mode de refroidissement a une empreinte particulière en fonction de l'extraction des quantités de flux de chaleur.

L'étude que nous avons effectuée au cours de cette thèse a permis de couvrir des aspects très importants de ce type de refroidissement qui sont : l'élaboration d'une nouvelle corrélation pour le calcul de l'épaisseur de n'importe quel film liquide (eau, l'huile de silicone, le fluide de silicone) qui s'écoule sur une plaque, avec un angle d'inclinaison. L'étude expérimentale de l'hydrodynamique d'un film liquide sur une plaque horizontale, utilisant une approche nouvelle pour la mesure des caractéristiques du film liquide et un diagnostic thermique par simulation numérique pour voir l'impact de l'étude expérimentale sur le transfert de la chaleur. Nos principales conclusions se résument dans ce qui suit :

- La nouvelle corrélation à une erreur moyenne faible et un coefficient de corrélation similaire aux autres corrélations connues de la littérature, ce qui donnera une validité à la nouvelle corrélation.
- L'épaisseur du film a été déterminée en fonction des paramètres géométriques du sprayer et des paramètres hydrodynamiques tels que ΔP et *H*.
- Une relation permettant de calculer le débit sortant de la buse et impactant la plaque a été déduite.
- Le profil de la vitesse de l'écoulement du film au bord de la plaque obéit à la loi normale.
- La hauteur X n'influe pas sur les caractéristiques du film à savoir son épaisseur et sa vitesse.
- La différence de pression ΔP et la hauteur H ont un impact sur l'épaisseur de l'écoulement.
- On a constaté que le refroidissement de notre plaque métallique hautement chauffée pour les mêmes conditions de simulation des travaux précédentes pour atteindre la température de 100 °C ; est court de 10 secondes.

Références bibliographiques

[1] Thibaut B., Tuyère Diphasique à jet de brouillard, Mécanique [physics.med-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, (2009). Français.

[2] Roumy R, Structure des écoulements diphasiques eau-air. Etude de la fraction de vide moyenne et des configurations d'écoulement, (1969).CEA·R·3892.

[3] Hewitt G. F., Hall-Taylor N. S., Annular Two-Phase Flow. Chemical engineering division, A.E.R.E., Harwell, England. First édition, (1970).

[4] Yunus A. Cengel, R. H. turner, Heat Transfer: A Pratical Approch, Mac Graw Hill, second edition, (2002).

[5] Sacadura J.F et d'autres, Initiation aux transferts thermiques, paris, (1982).

[6] Collier, J.G., and Thome, J. R. Convective Boiling and Condensation, 3rd ed., Clarendon Press, Oxford, England, (1994).

[7] Nusselt W., The condensation of steam on cooled surfaces (Traduit par D. Fullarton), Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Vol. 60, n. 27, pp. 541-575, (1916).

[8] Rohsenow W. M., A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids." ASME Transactions 74, pp. 969–975. (1952).

[9] Chato J. C., Laminar Condensation inside Horizontal and Inclined Tubes. ASHRAE Journal 4, p. 52. (1962).

[10] Leontiev A., Théorie des échanges de chaleur et de masse, Editions Mir, Moscou, (1985).[11] Hampson H. Özis, ik N., An Investigation into the Condensation of Steam. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, London 1B, pp. 282–294. (1952).

[12] Griffith. P., Dropwise Condensation. In Heat Exchanger Design Handbook, ed. E. U. Schlunder, Vol 2, Ch. 2.6.5. New York: Hemisphere, (1983).

[13] Tebbal M, Mzad H., An hydrodynamic study of a water jet dispersion beneath liquid sprayers, ForschungimIngenieurwesen, 68(3):126 – 132, (2004).

[14] Rekada M, Tebbal M, Influence of the cooling by sprayers on the convection coefficient.First intenational thermal energy congress, ITEC 93, Marrakesh, (1993).

[15] Choual K, Tebbal M, Experimental study of the dispersion beneath liquid sprayers in the intersection area of jets on a horizontal plate. MECHANIKA, 23(6): 835-844, (2017).

[16] Nasr G.G. Yule A.J. Bending L. Industrial Sprays and Atomization, Design, analysis and applications, springer-verlag London (2002).

[17] https://www.usinenouvelle.com/expo/img/buse-a-turbulence-axiale-cone-plein-faible debit-wl-011085928-product_zoom.jpg.

[18] LECHLER (industrie spécialisé dans les technologies de pulvérisation), buses à cône plein. Site web.

[19] TECSI (industrie spécialisé dans les technologies de pulvérisation), NOZZLES DIVISION, Catalogue révision. Site web.

[20] Bird RB, Stewart W.E, and Lightfoot E.N, Transport Phenornena. Wiley, NY. pp. 3-1 79. (1960).

[21] Kapitsa P.L, Collected Papers of Kapitsa. Vol. II (1938-1964). -ed. D. Ter Haar. Pergarnon Press, NY. pp.662-709. (1965).

[22] Kaixiang P., Liang Ma., Jie Dong. A practical propagation path identification scheme for quality-related faults based on nonlinear dynamic latent variable model and partitioned Bayesian network. Journal of the Franklin Institute 000. 1–25. (2018).

[23] Abbasi B. Pressure-based predection of spray cooling heat transfer. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, USA, (2010).

[24] E.G. Bratuta and L. Zanotchkine. Intensification of heat transfer by dispersed fluids. Machinostraenia Energy, 38(84):71–75, (in Russian), (1984).

[25] Tebbal M., Correlation of the thermal transfer coefficient and the dispersion of the fluid on a surface at high temperature. 5th International meeting on heat transfer, J.I.Th 91, T1, Monastir, Tunisia, (in French), (1991).

[26] Bolle L., Moureau J.C., Spray cooling of hot surfaces, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1: 1-97, (1982).

[27] Choi K.J., Yao S.C., Heat transfer mechanisms of horizontally impacting sprays, International Journal of Heat and Mass Transfer; 30(2):1291-1296, (1987).

[28] Kapitsa P.L. 1949. Wave flow of thin fluid layers of liquid. ZH. Eksp. Teor. Fiz, 19, 105.

[29] Kirkbride, C. Goo Tran ,. AIChE 30.170, (1933).

[30] Fulford G.D, The Flow of Liquids in Thin Films. In: Advances in Chemical Engineering,Vol. 5. Academic Press, NY. pp. 15 1-235. (1964).

[31] Dukler A.E., Bergelin O.P, Characteristics of flow in falling films. Chemical Engineering Progress, 48(11), pp. 557-563. Toronto, Canada. (1952).

[32] Portalski S., Studies of falling liquid film flow: film thickness on a smooth vertical plate.Chemical Engineering Science, 18, pp. 787-804. (1963).

[33] Telles A.S., Dukler A.E., Statistical characteristics of thin, vertical, wavy, liquid films. Ind. Eng. Chem. Fund., 9(3), pp. 41 2-42 1. (1970).

[34] Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., and Alekseenko S.V., Stationary two dimensional rolling waves on a vertical film of fluid. J. Engng Phys., 30(3), pp. 5 17-521. (1976).

[35] Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Alekseenko S.V., and Orlov V.V., Instantaneous velocity profile in a wavy fluid film. J. Engng Phys., 33, pp. 10 12-1 01 6. (1977).

[36] Salazar R.P., Marschall E., Time-average local thickness measurement in falling liquid film flow. Int. J. Multiphase Flow. 4, pp. 405-412. (1978).

[37] Takahama H and Kato S., Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without concurrent gas flow. Int. J. Multiphase Flow, 6, pp. 203-215. (1980).

[38] Karapantsios T.D, Paras S.V. Karabelas A.J., Statistical characteristics of free falling films at high Reynolds numbers. Int. J. Multiphase flow, 15(l), pp. 1-2 1. (1989).

[39] Karapantsios T.D., Karabelas A.J., Surface characteristics of roll waves on free falling films. Int. J. Multiphase Flow, 16(5), pp. 835-852. (1990).

[40] Karapantsios T.D., Karabelas A.J., Longitudinal characteristics of wavy falling films. Int.J. Multiphase Flow, 2 1 (l), pp. 1 19- 127. (1995).

[41] Karimi G, Kawaji M., A study of hydrodynamic characteristics of nonconductive falling films in counter-current annular flow. Proc. 3 1" National Heat Transfer Conference. Houston. Texas. HTD-Vol. 326.205-221. (1996).

[42] Takamasa, T., Hazuku, T., Measuring interfacial waves on film flowing down a vertical plate wall in the entry region using laser focus displacement meters. Int. J. Heat Mass Transf. 43 (15), 2807e2819. (2000).

[43] Moran, J. Inumaru 1, M. Kawaji., Instantaneous hydrodynamics of a laminar wavy liquid film, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Canada. (2002).

[44] Mzad, H., & Tebbal, M., Thermal diagnostics of highly heated surfaces using waterspray cooling. Heat and Mass Transfer, 45(3), 287-295. (2009).

[45] E.S. Benilov, S.J. Chapman, J.B. McLeod, J.R. Ockendon, and V.S. Zubkov. On liquid films on an inclined plate. Journal of Fluid Mechanics, 663(25):53–69, (2010).

[46] C.B. Tibiriçá, F.J. do Nascimento, and G. Ribatski. Film thickness measurement techniques applied to micro-scale two-phase flow systems. Experimental Thermal and Fluid Science, 34(4):463–473, (2010).

[47] H. Mzad and M. Elguerri. Simulation of twin overlapping sprays underneath hydraulic atomizers: influence of spray hydrodynamic parameters. Atomization and Sprays, 22(5): 447–460, (2012).

[48] X.G. Huang, Y.H. Yang, P. Hu, K. Bao. Experimental study of water–air countercurrent flow characteristics in large scale rectangular channel. Annals of Nuclear Energy, 69:125–133, (2014).

[49] W-F. Du, Y-H. Lu, R-C. Zhao, L. Chang, and H-J. Chang. Film thickness of free falling water flow on a large-scale ellipsoidal surface. Progress in Nuclear Energy, 105:1–7, (2018).

[50] H. Ouldrebai, E.K. Si-Ahmed, M. Hammoudi, J. Legrand, Y. Salhi, and J. Pruvost. A laser multi-reflection technique applied for liquid film flow measurements. Experimental Techniques, 43:213–223, (2019).

[51] J. Cai and X. Zhuo. Researches on hydrodynamics of liquid film flow on inclined plate using diffuse-interface method. Heat and Mass Transfer, 56:1889–1899, (2020).

[52] Grimely S.S., Trans. Inst. Chem. Engrs., 23, pp. 228. (1945).

[53] Clayton C.G.A., The behavior of liquid films in countercurrent two-phase flow. Phd. thesis, Gonville and Caius College, Cambridge, England. (1958).

[54] Wilkes, J.O and Nedderman, P., The measurement of velocities in thin films of liquid, chem. Eng. Sci., 17, 177-178.

[55] Reiss L.P. and Hanratty T.J., Measurements of instantaneous rates of mass transfer to a small sink on a wall. A.1.Ch.E. J., 8, pp. 245. (1962).

[56] Portalski S., Velocities in film flow of liquids on vertical plates. Chemical Engineering Science, 19, pp. 575-582. (1964).

[57] Cook R.A, Clark R.H., The experimental determination of velocity profiles in smooth falling liquid films. Canadian Journal 01 Chemical engineering, 49, pp. 412- 416. (1971).

[58] Portalski S, Clegg A, J,. An experimental study of falling liquid films, chem. Eng. Sci.,27, 1257 265. (1972).

[59] Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Alekseenko S.V., and Orlov V.V., Instantaneous velocity profile in a wavy fluid film. J. Engng Phys., 33, pp. 1012-1016. (1977).

[60] Alekseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Wave formation on vertical falling liquid films. Int. J. Multiphase Flow, 11(5), pp. 607-627. (1985).

[61] Koziol K, Ulatowski J., Franke K., Velocity fields in falling films. International Chemical Engineering, 21 (4), pp. 580-584. (1981).

[62] Mudawar I., and Houpt R.A., Measurement of mass and momentum transport in wavylaminar falling liquid films. Int. J. Heat Mass Transfer, 36(17), pp. 4 15 1-4 162. (1993).

[63] P. Adomeit and U. Renz. Hydrodynamics of three-dimensional waves in laminar falling films. International Journal of Multiphase Flow, 26(7):1183–1208, (2000).

[64] Fábio S. de Oliveira and Jurandir I. Yanagihara. Film Thickness and Wave Velocity Measurement Using Reflected Laser Intensity. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. (2006).

[65] S.V. Alekseenko, V.A. Antipin, A.V. Bobylev, and D.M. Markovich. Application of PIV to velocity measurements in a liquid film flowing down an inclined cylinder. Experiments in Fluids, 43:197–207, (2007).

[66] Y.Q. Yu and X. Cheng. Experimental study of water film flow on large vertical and inclined flat plate. Progress in Nuclear Energy, 77:176–186, (2014).

[67] Charogiannis, A.; An, J.S.; Markides, C.N. A simultaneous planar laser-induced fluorescence, particle image velocimetry and particle tracking velocimetry technique for the investigation of thin liquid-film flows. Exp. Therm. Fluid Sci., 68, 516–536. (2015).

[68] Ruiqi Wang, Riqiang Duan, Haijun Jia. Experimental Validation of Falling Liquid Film Models: Velocity Assumption and Velocity Field Comparison. Polymers 13,1205. (2021).

[69] Atkinson, B.; Carruthers, P.A. Velocity Profile Measurements in Liquid Films. Chem. Eng. Res. Des., 43, 33–39. (1965).

[70] Nedderman, R.M. The Use of Stereoscopic Photography for the Measurement of Velocities in Liquids. Chem. Eng. Sci., 16, 113–119. (1961).

[71] Dietze, G.F.; Al-Sibai, F.; Kneer, R. Experimental study of flow separation in laminar falling liquid films. J. Fluid Mech., 637, 73–104. (2009).

[72] Oldengarm, J.; van Krieken, A.H.; van der Klooster, H.W. Velocity profile measurements in a liquid film flow using the laser Doppler technique. J. Phys. E Sci. Instrum., 8, 203–205. (1975).

[73] Al-Sibai, F.; Leefken, A.; Renz, U. Local and Instantaneous Distribution of Heat Transfer Rates and Velocities in Thin Wavy Films. Int. J. Therm. Sci., 41, 658–663. (2002).

[74] Moran, K.L.M. Experimental Study of Laminar Liquid Films Falling on an Inclined Plate. Master's Thesis, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, (1997).

[75] Charogiannis, A.; Denner, F.; van Wachem, B.G.M.; Kalliadasis, S.; Scheid, B.; Markides, C.N. Experimental investigations of liquid falling films flowing under an inclined planar substrate. Phys. Rev. Fluids, 3, 114002. (2018).

[76] Q. Lu, N.V. Suryanarayana, C. Christodoulu, Film thickness measurement with an ultrasonic transducer, Experimental Thermal and Fluid Science 7, 354–361. (1993).

[77] P.C. Pedersen, Z. Cakareski, J.C. Hermanson, Ultrasonic monitoring of film condensation for applications in reduced gravity, Ultrasonics 38, 486–490. (2000).

[78] R.D.M. Carvalho, O.J. Venturini, F. Neves Jr. and F.A. França, Axial bubbly flow topology: A comparative study using the ultrasonic technique and high-speed filming, in: Proceedings of the 5th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, Bialystok, Poland, (2008).

[79] M.R. Özgü, J.C. Chen, N. Eberhardt, A capacitance method for measurement of film thickness in two-phase flow, Review of Scientific Instruments 44, 1714–1716. (1973).

[80] M.W.E. Coney, The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow, Journal of Physics E: Scientific Instrument 6 903–910. (1973).

[81] G.R. Thwaites, N.N. Kulov, R.M. Nedderman, Liquid film properties in two phase annular flow, Chemical Engineering Science 31, 466–481. (1976).

[82] J.E. Laurinat, T.J. Hanratty, J.C. Dallman, Pressure drop and film height measurements for annular gas-liquid flow, International Journal of Multiphase Flow 10, 341–356. (1984).

[83] Tae-hwan Lyu, Issam Mudawar. Simultaneous measurements of thickness and temperature profile in a wavy liquid film falling freely on a heating wall, Experimental heat transfer, vol. 4, pp.217-233, (1991).

[84] J.F. Klausner, L.Z. Zeng, D.M. Bernhard, Development of a film thickness probe using capacitance for asymmetrical two-phase flow with heat addition, Review of Scientific Instruments 63, 3147–3152. (1992).

[85] H.C. Kang, M.H. Kim, The development of a flush-wire probe and calibration method for measuring liquid film thickness, International Journal of Multiphase Flow 18, 423–437. (1992).

[86] G.E. Thorncroft, J.F. Klausner, A Capacitance sensor for two-phase liquid Film thickness measurements in a square duct, Transactions of the ASME:, Journal of Fluids Engineering 119, 164–169. (1997).

[87] T. Fukano, Measurement of time varying thickness of liquid film flowing with high speed gas flow by a constant electric current method, Nuclear Engineering and Design 184, 363–377. (1998).

[88] R. Kumar, M. Gottmann, K.R. Sridhar, Film thickness and wave velocity measurements in a vertical duct, Transactions of the ASME I: Journal of Fluids Engineering 124, 634–642. (2002).

[89] J.R. Burns, C. Ramshaw, R.J. Jachuck, Measurement of liquid film thickness and the determination of spin-up radius on a rotating disc using an electrical resistance technique, Chemical Engineering Science 58, 2245–2253. (2003).

[90] P. De Jong, K.S. Gabriel, A preliminary study of two-phase annular flow at microgravity: experimental data of film thickness, International Journal of Multiphase Flow 29, 1203–1220. (2003).

[91] R.A. Mazza and E.S. Rosa, Espessura de filme média em um escoamento horizontal padrão intermitente em golfadas (slug flow), in: Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT, Curitiba, Brazil, (2006).

[92] T. Ursenbacher, L. Wojtan, J.R. Thome, Interfacial measurements in stratified types of flow.Part I: New optical measurement technique and dry angle measurements, International Journal of Multiphase Flow 30, 107–124. (2004)

[93] D. Gstoehl, J.F. Roques, P. Crisinel, J.R. Thome, Measurement of falling film thickness around a horizontal tube using a laser measurement technique, Heat Transfer Engineering 25, 28–34. (2004).

[94] Ohba, K., Tanaka, H., Kawakami, N. and Nagae, K., Twin-fiber optic liquid film sensor for simultaneous measurement of local film thickness and velocity in two-phase annular flow, Proceedings of the 6th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, pp. 39.1.1-39.1.6. (1992).

[95] A. A. Mouza, N. A. Vlachos, S. V. Paras, A. J. Karabelas, Measurement of liquid film thickness using a laser light absorption method, Experiments in Fluids 28, 355-359, Springer-Verlag, (2000).

[96] Y. Utaka, Y. Tasaki and S. Okuda, Micro-liquid–layer behavior and heat transfer characteristics of boiling in a micro-channel vaporizer, in: Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Science and Engineering – ENCIT, Rio de Janeiro, Brazil, paper 0798, (2004).

[97] E.T. Hurlburt, T.A. Newell, Optical measurement of liquid film thickness and wave velocity in liquid film flows, Experiments in Fluids 21, 357–362. (1996).

[98] T.A. Shedd, T.A. Newell, Automated optical liquid film thickness measurement method, Review of Scientific Instruments 69, 4205–4213. (1998). [99] W. Xishi, H. Qiu, Fringe probing of liquid film thickness of a plug bubble in a micropipe, Measurement Science and Technology 16, 594–600. (2005).

[100] A.G. Pautsch, T.A. Shedd, Adiabatic and diabatic measurements of the liquid film thickness during spray cooling with FC-72, International Journal of Heat and Mass Transfer 49, 2610–2618. (2006).

[101] J.T. Zhang, B.X. Wang, X.F. Peng, Falling liquid film thickness measurement by an optical-electronic method, Review of Scientific Instruments 71, 1883–1886. (2000).

[102] R.P. Salazar, E. Marschall, Thickness measurement in liquid film flow by laser scattering, Review of Scientific Instruments 46, 1539–1541. (1975).

[103] J. Liu, J. D. Paul, J. P. Gollub., Measurements of the primary instabilities of film flows,J. Fluid Mech, vol. 250, pp. 69-101, (1993).

[104] C.H. Hidrovo, D.P. Hart, Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement, Measurement Science and Technology 12, 467–477. (2001).

[105] S.V. Makarytchev, T.A.G. Langrish, R.G.H. Prince, Thickness and velocity of wavy liquid films on rotating conical surfaces, Chemical Engineering Science 56, 77–87. (2001).

[106] J. Kim, M.H. Kim, A photochromic dye activation method for measuring the thickness of liquid films, Measurement 39, 497–504. (2006).

[107] Drallmeir, J. A Wegener, J.L., &. Armaly, B.F., Developing laminar gravity-driven thin liquid film flow down an inclined plane. Journal of fluid engineering, 132(8), 081301. (2010).

[108] T. Takamasa, K. Kobayashi, Measuring interfacial waves on film flowing down tube inner wall using laser focus displacement meter, International Journal of Multiphase Flow 26, 1493–1507. (2000).

[109] Y.B. Han and N. Shikazono, Thickness of liquid film formed in slug flow in micro tube, in: Proceedings of the ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Whistler, Canada, (2008).

[110] T. Ohyama, K. Endoh, A. Mikami, Y.H. Mori, Optical interferometry for measuring instantaneous thickness of transparent solid and liquid films, Review of Scientific Instruments 59, 2018–2022. (1988).

[111] W.M. Nozhat, Measurement of liquid-film thickness by laser interferometry, Applied Optics 36, 7864–7869. (1997).

[112] D.W. Zhou, T. Gambaryan-Roisman, P. Stephan, Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensoring technique, Experimental Thermal and Fluid Science 33, 273–283, (2009).

[113] W. Ambrosini N. Forgione, F. Oriolo, Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures, International Journal of Multiphase Flow 28, 1521–1540. (2002).

[114] V. V. Lel, F. Al-Sibai, A. Leefken, U. Renz, Local thickness and wave velocity measurement of wavy films with a chromatic confocal imaging method and a fluorescence intensity technique, Experiments in Fluids, 39: 856–864. (2005).

[115] Po Hu, Xingguan Huang, Kai Bao, Guixue Zhu, Experiment study on film width and thickness of free falling water film on a large inclined plate, Nuclear Engineering and Design 358, 110445. (2020).

[116] E.G Bratuta, M. Tebbal. Influence of the jet on the fluid dispersion. IzvestiaVouzob, Métallurgie, 12:108-111, (1983).

[117] B. Patrick, B. Barber, D. Brown. Practical aspects of the design, operation and performance of caster spray systems. Revue de Métallurgie, 98: 383-390, (2001).

[118] Bratuta, E. G., and Ivanowsky, A. Y., Intensification of Heat and Mass Transfer During Cooling by Dispersed Fluids, Energa-Machinotroenia, 33, pp. 98–101. (1982).

[119] Choual, identification de la dispersion dans la zone d'intersection des jets identiques sur une plaque horizontale, Thèse de doctorat, (2018).